Mathias Bauer · Willi Freeden
Hans Jacobi · Thomas Neu *Hrsg.*

Handbuch Oberflächennahe Geothermie

Springer Spektrum

Handbuch Oberflächennahe Geothermie

Mathias Bauer · Willi Freeden · Hans Jacobi · Thomas Neu
Hrsg.

Handbuch Oberflächennahe Geothermie

Springer Spektrum

Herausgeber
Mathias Bauer
Lehr- und Forschungsgebiet
„Arbeits- und
Gesundheitsschutz“
RWTH Aachen
Aachen
Deutschland

Willi Freeden
Lehr- und Forschungsgebiet „Geomathematik“
TU Kaiserslautern
Kaiserslautern
Deutschland

Hans Jacobi
Jacobi & Partner Industrieberatung
Essen
Deutschland

Thomas Neu
Bergbau-Energie-Umwelt-Infrastruktur
proG.E.O. Ingenieurgesellschaft mbH
Saarbrücken
Deutschland

ISBN 978-3-662-50306-5 ISBN 978-3-662-50307-2 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Spektrum
© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck, Dr. Stephanie Preuß

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Der Beitrag der erneuerbaren Energien bei der Energieversorgung wächst ständig. Großes Entwicklungspotenzial unter den Erneuerbaren Energien besitzt die Erdwärmenutzung mit ihrem für menschliche Dimensionen unerschöpflichen Energievorrat. Erdwärme wird genutzt zum Heizen und Kühlen und zur stabilen Grundversorgung von Strom. Den Vorteilen – z. B. saisonale Unabhängigkeit von Wind, Sonne und anderen Wetterphänomenen, lokale autarke Produktion, umweltfreundlicher Charakter, optisch unauffälliger und geringer Flächenbedarf, optimale Energieausnutzung – stehen Risikomanagement und Umweltaspekte gegenüber. Insgesamt ist die Ressource Geothermie von größter Bedeutung und ein wesentlicher Bestandteil künftiger Energieversorgung.

Oberflächennahe Geothermie nutzt Bohrungen bis zu einer Tiefe von etwa 400 m. Die dort vorherrschenden Temperaturen von etwa 25 °C ermöglichen ein Beheizen und Kühlen von Gebäuden und technischen Anlagen. Erdwärme wird in offenen und geschlossenen Systemen gewonnen. Zu den offenen Systemen zählen Brunnenanlagen, zu den geschlossenen Systemen gehören Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Koaxialsonden und Energiepfähle. In der oberflächennahen Geothermie ist zumeist der Einsatz von Primärenergie, z. B. einer Wärmepumpe, unvermeidlich. Für die Stromerzeugung ist die oberflächennahe Geothermie weniger geeignet, dies erfordert den Einsatz Tiefer Geothermie (vgl. Handbuch Tiefe Geothermie, Springer Spektrum, 2014).

Das vorliegende Handbuch stellt umfassend das Themenspektrum im Bereich Oberflächennahe Geothermie dar. Es vermittelt Grundlagen wie das Wärmepotential der Erde, die oberflächennahe Geologie, geophysikalische Grundlagen, mathematische Methoden, Risikomanagement und Bohrtechniken. In den angewandten Kapiteln geht es wesentlich um Geothermieprojekte aus Sicht eines Bauherrn, u. a. um Heizlastberechnung, Projektmanagement, Umweltaspekte, Finanzierung und Fördermöglichkeiten sowie die Dimensionierung von Anlagen. Auch verfahrenstechnische Grundlagen, Maschinentechnik, Qualitätssicherung, Fragen der Kommunikation und Akzeptanz wie auch der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes finden Behandlung.

Die verschiedenen Beiträge im vorliegenden Handbuch von unterschiedlichen Experten sollen dem interessierten Leser mehr Wissen vermitteln. Sie widmen sich explorativen, planerischen, rechtlichen, technischen, wirtschaftlichen und sicherheitsrelevanten

Aspekten der Beschäftigung mit oberflächennaher Erdwärme in der Region Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Alles in allem ist ein umfassender Überblick in der inhaltlich-kanonischen Abfolge eines oberflächennahen Geothermieprojektes angestrebt:

- Prospektion und Exploration,
- Projektmanagement und Planung,
- Realisierung und Bau,
- Nutzung und Erfahrung,
- Perspektiven.

Wesentliches Ziel ist die wissenschafts- und technologiebasierte Information über adäquate geowissenschaftliche Vorabinformation, Genehmigungsprozesse und rechtliche Belange, Umwelt- und Risikomanagement, technische Komplexität, wirtschaftliche Effizienz sowie Bewertung des Spannungsfeldes sozialer, politischer und öffentlichkeitswirksamer Einwirkungen.

Das Werk erhebt keinen Anspruch auf eine umfassende inhaltliche Durchdringung des Gesamtkomplexes Oberflächennahe Geothermie und seiner Subsysteme. Es versteht sich vielmehr als informativer und zuverlässiger Partner zu einem intensiveren und vertieften Verständnis.

Die Autoren und Herausgeber haben viel Zeit und Anstrengung investiert, um dieses Handbuch inhaltlich aktuell und hochwertig zu gestalten. Der Springer-Verlag zeigte sich allzeit offen für Anregungen und Wünsche. Besonderer Dank gebührt Frau Sabine Bartels und Herrn Clemens Heine, die wesentlich zum Gelingen beigetragen haben.

Die Herausgeber würden sich freuen, wenn es dem Handbuch gelänge, Oberflächennahe Geothermie den Entscheidungsträgern in Wirtschaft, Gesellschaft und Politik als höchst intelligente Wärmenutzungsform von umweltfreundlichem und langfristig kostengünstigem Charakter näher zu bringen und einen Beitrag zur Versachlichung der Diskussion von Risiken und sozialer Akzeptanz zu liefern. Konstruktive Kritik, Kommentare und Anmerkungen sind allzeit willkommen.

Im Februar 2018 M. J. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi, T. Neu

Über die Herausgeber

Professor Mathias Bauer

- Mathias Bauer, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Rohstoff-Ingenieurstudium mit Zusatz Erdöl- und Erdgasgewinnung an der RWTH Aachen University 1980 bis 1985
- Promotion im Bereich Sicherheitstechnik (Gas-/Staubexplosionen)
- Habilitation über das Thema „Integrierte Managementsysteme“ (Entwicklung und Umsetzung Arbeitsschutzmanagementsystem)
- Buchautor mehrerer Fachbücher, Herausgeber der Buchreihe „Bexbacher/Aachener Beiträge für Consulting, Business und Management“ und Autor von mehr als 80 wissen- schaftlichen Fachbeiträgen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz, Betriebsorganisation
- Mitglied in zahlreichen Fachgremien und Ausschüssen, u. a. 10 Jahre Bundesjury Jugend forscht, zuletzt als Sprecher der Jury
- 1992 Handlungsbevollmächtigter, stv. Hauptabteilungsleiter für Berufsbildung, Arbeits- und Umweltschutz, Arbeitsmedizin sowie Leiter des am freien Markt tätigen Service- Centers Arbeits- und Umweltschutz eines Großkonzerns
- 2004–2005 Prokurist, Hauptabteilungsleiter für Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz in einem Energiekonzern
- 2005–2008 Mitglied der Werksleitung in einem Großbetrieb im Energiebereich
- von 1997 bis 2002 zusätzlich Privatdozent an der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet für Arbeits- und Gesundheitsschutz

- seit 2003 apl. Univ.-Professor der der RWTH Aachen University
- 1998–2003 zusätzlich Rektor der Fachhochschule für Bergbau, Rohstoffveredelung und Arbeitswissenschaften, Saarbrücken
- 2000 Gastdozent an der Universität Aurel Vlaicu in Rumänien und 2002 Verleihung der Ehrendoktorwürde
- 2000 Mitbegründer und Gesellschafter der CBM GmbH, seit 2009 Consultant

Professor Willi Freeden

- Willi Freeden, Prof. Dr. rer. nat., Dipl.-Math.,
- Studium in Mathematik, Geographie und Philosophie an der RWTH Aachen, 1971 Diplom in Mathematik, 1972 Staatsexamen in Mathematik und Geographie, 1975 Promotion in Mathematik, 1979 Habilitation in Mathematik an der RWTH Aachen,
- 1979 Privatdozent an der RWTH Aachen, 1981/1982 Visiting Research Professor an der Ohio State University, Columbus (Department of Geodetic Science and Surveying), 1984 Professor in Mathematik an der RWTH Aachen (Institut für Reine und Angewandte Mathematik), 1989 Professor in Technomathematik (Industriemathematik), 1994 Leiter der Arbeitsgruppe Geomathematik, 2002 Dekan des Fachbereichs Mathematik, TU Kaiserslautern, 2002 Leiter der universitätsweiten Graduate School (ISGS) „International School for Graduate Studies“ der TU Kaiserslautern, 2003–2006 Vorsitzender des Rheinland-Pfalz Landesarbeitskreises „Curriculare Standards im Fach Mathematik in der Lehrerausbildung an RP-Universitäten“, 2002–2006 Vizepräsident für Forschung und Technologie an der Technischen Universität Kaiserslautern,
- seit 2005 Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK), Bayerische Akademie der Wissenschaften,
- 2010 Editor des „Handbook of Geomathematics (HBGM)“, 2015 Zweite Edition des HBGM, 2014 Mitherausgeber des Springer Spektrum „Handbuch Tiefe Geothermie“ (HbTG), 2017 Mitherausgeber des Springer Spektrum „Handbuch der Geodäsie“ (HbG), 2017 Editor des Birkhäuser „Handbook of Mathematical Geodesy“,
- 2009 Editor in Chief des Springer „International Journal on Geomathematics (GEM)“,

- 2014 Editor in Chief der Springer Book Series „Geosystems Mathematics“,
- 2015 Editor in Chief der Birkhäuser Series „Lecture Notes in Geosystems Mathematics and Computing“,
- Mitglied der Editorial Boards von mehr als zehn internationalen Zeitschriften der Mathematik und den Geowissenschaften,
- (Mit-)Organisator von mehr als 50 internationalen Konferenzen und Symposia,
- Verfasser von mehr als 180 Beiträgen in internationalen Zeitschriften und Journalen der Mathematik und den Geowissenschaften,
- (Mit-)Verfasser von zwölf wissenschaftlichen Forschungs- und Lehrbüchern im Bereich Geomathematik.
- Leiter der BMWi-Projekte GEOFÜND und SPE

Professor Hans Jacobi

Studium Dipl.-Ing., später Dr. Ing., Berufsweg vom Schichtführer zum Vorstand, Mandate in Aufsichtsräten und Beiräten, Eigene Beratungsgesellschaft, Honorarprofessor an der RWTH Aachen

Präsident der GDMB, Präsident des ORC Fachverbandes

Herr Jacobi ist geschäftsführender Gesellschafter der Jacobi und Partner Industrieberatung GmbH. Er war viele Jahre in verantwortlichen Positionen im Bergbau, zuletzt als Vorstandsvorsitzender einer Aktiengesellschaft. Er war verantwortlich für Produktion, Restrukturierung von Bergwerken und Neubau von Anschlussbergwerken sowie Restrukturierung und Neubau von Kokereien. Er baute für den Konzern das internationale Geschäft auf, hat in eigener Verantwortung umfangreiche Veränderungsprozesse vorbereitet, moderiert und durchgeführt.

Als Präsident der GDMB, Gesellschaft der Metallurgen und Bergleute e. V. ist er für die Arbeit von Fachausschüssen der Metallurgie, und des Bergbaus, darunter ein Fachausschuss für Geothermie verantwortlich.

Der ORC Fachverband hat die Verbreitung einer Technologie zur Stromerzeugung auf niedrigem Temperaturniveau als Ziel.

Dipl.-Ing. Thomas Neu

- 1979 bis 1984 Bergbaustudium an der TU Clausthal, Studienschwerpunkt Rohstoffwirtschaft
- 1984 bis 1995 Saarbergwerke AG, verschiedene Aufgaben in Stab und Linie unter und über Tage, zuletzt Abteilungsleiter technisch-wirtschaftliche Planung und Umweltschutzbeauftragter des Bergwerkes Warndt/Luisenthal
- Bis Juli 2003 Technischer Geschäftsführer der SAARMontan Gesellschaft für bergbaubezogene Dienstleistungen mbH, Saarbrücken
- Bis Februar 2008 Geschäftsführender Gesellschafter der DRILLTHERM Gesellschaft für Erdwärmeanlagen, Brunnenbau und Bohrungen mbH, Saarbrücken, sowie der FORAT HERM Eurl, St. Avold
- Bis Februar 2010 Geschäftsführender Direktor der ENRO Energie SE, Essen und Geschäftsführer von deren Tochtergesellschaften ENRO Geothermie GmbH, Essen, und ENRO Geothermie Entwicklung GmbH, Ludwigsfelde.
- Bis Mai 2013 Geschäftsführer der Geothermische Kraftwerksgesellschaft Traunreut GmbH, Traunreut
- Ab Juni 2013 geschäftsführender Gesellschafter der pro G.E.O Ingenieurgesellschaft mbH, Saarbrücken, Bergbau – Geothermie – Umwelt – Infrastruktur

Die Autoren

Christian Blick, Dr. rer. nat., Dipl.-Math., M. Sc., Studium in Mathematik und Maschinenwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern 2006–2011, M.Sc. Studium in Mathematical Engineering, 2009–2010 an der LTH Lund, Schweden, 2011–2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Kaiserslautern der Arbeitsgruppe Geomathematik und im Rahmen dieser Tätigkeit von 2012–2016 Mitarbeiter im BMWi-Verbundprojekt „GEOFÜND“ (Leiter: Prof. Dr. W. Freeden), 2015 Promotion in Mathematik, seit 2016 Angestellter der „Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH (CBM)“, Bexbach, im Rahmen des BMWi-Projekts „SPE“.

Anna Borg, Dipl.-Psych. ist Leiterin des Geschäftsfeldes Unternehmens- und Personalentwicklung bei der Gesellschaft für Business und Management mbH (CBM). Nach dem Studium der Psychologie und Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin und Dozentin an der Universität des Saarlandes wechselte sie 2007 in die Beratung. Bei der CBM baute sie neben ihrer Beratertätigkeit das Geschäftsfeld Unternehmens- und Personalentwicklung auf und aus. Ihre Arbeitsfelder sind die Konzeption und Umsetzung von Projekten zu Organisationsentwicklung, Kommunikation, Sicherheitskultur und Arbeits- und Gesundheitsschutz. Neben der Beratertätigkeit ist sie als Projektleiterin in der Forschung in bundesgeförderten Forschungs- und Entwickelungsvorhaben (BMWi/BMBF) aktiv. So leitete sie 2012 bis 2015 das BMWi Verbundprojekt TIGER (Tiefe Geothermie – Akzeptanz und Kommunikation einer innovativen Technologie).

Klaus Bücherl, Dipl-Geol., arbeitet seit 30 Jahren als Sachverständiger für Boden und Grundwasser. 1989 gründete er die LUBAG Labor für Umweltberatung, Analytik und Geologie GmbH, eines der führenden bayerischen Geobüros. 15 Jahre lang war er geschäftsführender Gesellschafter des Unternehmens, das heute zur Tauw Gruppe gehört. Klaus Bücherl ist in verschiedenen Berufsverbänden bundesweit aktiv: Unter anderem war er von 2007 bis 2015 stellvertretender Vorsitzender des Bundesverbandes Deutscher Geowissenschaftler BDG e.V. Im Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. bekleidet er mehr als 10 Jahre lang die Funktion des Obmanns für den Fachausschuss F 2 Probenahme. Seit September 2015 ist er Gründungsvorstand des V18 – Vereinigung der Sachverständigen und Untersuchungsstellen nach § 18 BBodschG

e.V. und als Mediator unterstützt er Personen dabei, bei Konflikten außergerichtlich eine für alle gerechte und faire Lösung zu finden.

Christine Buddenbohm, Dipl.-Geol., 1981–1984 Geologiefacharbeiter mit Abitur, 1984–1989 Studium der Geologie an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 1991–1994 Wissenschaftlich-technische Mitarbeiterin bei der Geothermie Neubrandenburg GmbH, 1995–1996 Baugrundgutachterin beim Ingenieurbüro Hofmann & Partner Neubrandenburg, 1997–1998 Umweltbeauftragte bei GAGFAH BIV GmbH, NL Neubrandenburg, 1998–1999 Existenzgründung, 1999–2009 freiberufliche (selbständige) Tätigkeit als Geologin, Tätigkeitsschwerpunkte: Altlasten, Brunnenbau, Geothermie, Auditierung nach DVGW (A) W 120 der Zertifizierung Bau e.V., 2009–2012 Leiterin des Geschäftsbereich Brunnen- und Rohrleitungsbau bei Zertifizierung Bau GmbH, Berlin, seit 03.05.2012 Geschäftsführende Gesellschafterin der SakostaCCB GmbH, Themenschwerpunkte: Altlasten- und Baugrundgutachten, Planung geothermischer Anlagen, Bohrbegleitung, Auditierung von Bohrunternehmen nach DVGW (A) W 120 i.A. der Zertifizierung Bau GmbH

Frank Burkhardt, B. Eng., aufgewachsen mit und im Familienunternehmen Burkhardt das sich seit ca. 1970 mit Geothermie beschäftigt und 1959 als Bohr- und Brunnenbauunternehmen gegründet wurde. Nach der erfolgreichen Ausbildung zum Brunnenbauer absolvierte er ein Studium zum Bauingenieur, welches er 2011 als B. Eng. erfolgreich abschloss. Parallel stieg er in die Geschäftsführung der Fa. Burkhardt ein. 2013 erhielt er den Innovationspreis des GTV- Bundesverband Geothermie. An der Entwicklung der „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ des Landes Baden- Württemberg war er maßgeblich beteiligt. Seit 2017 leitet er die Firma als geschäftsführender Gesellschafter in 3. Generation. Frank Burkhardt setzt sich für die Qualitätserhöhung und Qualitätssicherung im Bereich der oberflächennahen Geothermie ein und ist in verschiedensten Gremien vertreten.

André Deinhardt, Dr., ist promovierter Staatswissenschaftler und studierter Betriebswirt. Vor seiner Tätigkeit beim Bundesverband Geothermie war er u. a. Leiter der Unternehmensbetreuung bei der Berlin Partner GmbH, der Wirtschaftsförderungsgesellschaft des Landes Berlin. Seit 2013 ist er Geschäftsführer des Bundesverbandes Geothermie e. V.

Gregor Dilger, ist Diplom-Verwaltungswissenschaftler. Studienbegleitend sammelte er bei der Agentur für Erneuerbare Energien Erfahrungen in der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit. Danach war er zwei Jahre für den Bundesverband Wärmepumpe tätig. Seit 2013 ist er Referent für Presse und Politik beim Bundesverband Geothermie e. V.

Lena Eggeling, B. Sc., arbeitete nach ihrem Studium der Angewandten Geowissenschaften am dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bei der EnBW Energie Baden-Württemberg AG als Projektleiterin im Bereich Geothermie. Derzeit promoviert sie an der Universität Göttingen zum Thema Charakterisierung geothermischer Reservoire mittels Radionuklidanalytik.

Kord Ernstson, Prof. Dr., ist Geophysiker (Dr. rer. nat) und Geologe (Dr. rer. nat. habil.); beratender Geophysiker und Geologe, Freiberufler mit eigenem Büro; Professur an der Universität Würzburg.

Daniel Fischer, Diplom-Geologe (Diplom Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2010), sieben Jahre Berufserfahrung in angewandter Geophysik und Geologie mit besonderem Schwerpunkt bei Erdwärmesonden (Messungen und Weiterentwicklungen von miniaturisierten Bohrloch-Messsonden) und im Bergbau. Internationale Projekterfahrungen in Europa und Amerika.

Walter Frenz, Univ.-Prof., Dr. jur., studierte Rechtswissenschaft an den Universitäten Würzburg, Caen und München. 1987 legte er die Maîtrise en Droit public ab, 1989 das 1. und 1992 das 2. Staatsexamen, 1991 die Promotion. 1992/1993 war er AG-Leiter Staatsrecht an der Universität Bonn, 1994 bis 1996 wissenschaftlicher Assistent an der Universität Münster sowie Professor für deutsches Recht an der Katholischen Universität Nijmegen. Seit 1997 ist er Universitätsprofessor an der RWTH Aachen und dort Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Berg-, Umwelt- und Europarecht.

Tillman Gauer, Dipl.-Ing., ist seit 2014 Mitarbeiter an den Fachgebieten Immobilienökonomie und Massivbau & Baukonstruktion der TU Kaiserslautern. Während des Studiums des Maschinenbaus mit der Vertiefung Energietechnik an der TU Kaiserslautern hat er Auslandsaufenthalte an der Chalmers Tekniska Högskola in Göteborg (Schweden) und der University of Technology Sydney (Australien) absolviert. In seiner Funktion als Wissenschaftlicher Mitarbeiter betreut Herr Gauer unterschiedliche Vorlesungen aus den Bereichen „Energie & Gebäude“ sowie Immobilienökonomie. In diesem interdisziplinären Umfeld bearbeitet er Forschungsprojekte, die Neubau und Bestandsentwicklung umfassen. Die Forschungsschwerpunkte von Herrn Gauer liegen im Bereich der Speicherung und erneuerbaren Bereitstellung von Energie sowie Energieversorgungskonzepten v.a. in Zusammenhang mit Gebäuden und Gebäudegruppen. Im Fokus stehen dabei die Wärmespeicherung in der Gebäudestruktur sowie die Integration unterschiedlicher Energieträger. Sein besonderes Interesse gilt der systemischen und interdisziplinären Betrachtung von Fragestellungen aus dem Bereich Energie & Umwelt.

Johann Goldbrunner, Prof. Dr., Promotion 1980 Universität Graz (Geologie, Paläontologie), 1988 Habilitation an der Technischen Universität Graz im Fach „Hydrogeologie“, 1976–1993 Wissenschaftlicher Mitarbeiter Forschungsgesellschaft Joanneum, 1981–1991 Vertragsassistent am Institut für Technische Geologie und Mineralogie, Technische Universität Graz, 2001 tit.ao. Univ.-Prof. Technische Universität Graz, 1993 Gründung des Technischen Büros Geoteam, seit 1993 Geschäftsführer, Allgemein Beeideter und Gerichtlich Zertifizierter Sachverständiger für Geologie.

Johannes Gottlieb, Dr., Diplom-Bergbau-Ingenieur (TU Bergakademie Freiberg) und Diplom-Mathematiker, Promotion in mathematischer Physik (Universität Halle). 42 Jahre Berufserfahrungen in Geotechnik, Bergbau, Geophysik in Industrie und Forschung. Seit

1999 selbstständig in der Geothermie, geschäftsführender Gesellschafter der Montanes-Gruppe.

Thomas Grab, Dr.-Ing., nach seinem Umweltengineering-Studium arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für technische Thermodynamik an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Er promovierte 2014 im Bereich Maschinenbau mit dem Titel „Verbesserung der Filmverteilung auf Fallfilmverdampferoberflächen am Beispiel geothermischer Phasenwechselsonden“. Forschungsschwerpunkte liegen im energetischen Monitoring, der Nutzung von Grubenwasser sowie der oberflächennahen Geothermie, der Untersuchung von Wärmetransportvorgängen mit Phasenänderungen in Thermosiphons und Heat Pipes. Seit 2017 ist er Koordinator des Scientific Diving Centers der TU Bergakademie Freiberg.

Ulrich Gross, Prof. Dr.-Ing. habil., Professor für Technische Thermodynamik an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (seit 1992); gewähltes Mitglied im Fachkollegium 404 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (2004–2012); Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften (seit 1999); Mitglied von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (seit 2006). Editor-in-Chief des „International Journal of Thermal Sciences“ (seit 2002). Hauptarbeitsgebiete: Thermophysikalische Stoffeigenschaften bei Temperaturen bis zu 1600 °C; Untersuchung von Wärmetransportvorgängen mit Phasenänderungen unter dem Ziel der Prozessoptimierung und Energieeinsparung; oberflächennahe Geothermie.

Clemens Heine, Studium der Mathematik und Philosophie (Diplom) in Heidelberg. Seit 1988 ist er Mitarbeiter des Springer-Verlags und arbeitet seit 2015 als Executive Editor Mathematics and Applied Sciences für die Marke Birkhäuser. Zu seinen Verantwortlichkeiten gehören dabei die Betreuung der Zeitschriften „Pure and Applied Geophysics“, „Swiss Journal of Geosciences“ und das „Swiss Journal of Palaeontology“ , GEM International Journal on Geomathematics sowie der Buchreihen „Geosystems Mathematics“ und „Lecture Notes in Geosystems Mathematics and Computing“.

Thomas Heinze, Prof. Dr.-Ing., Dipl.-Phys., 1986 Physik-Diplom mit Auszeichnung an der RWTH Aachen, Hauptforschungsgebiet: Lasermesstechnik für die Brennverfahrensentwicklung von Verbrennungsmotoren. 1990 Promotion mit Auszeichnung über dieselmotorische Gemischbildung an der RWTH Aachen; 1991 Post-Doktorant am Institut Français du Pétrole (IFP) bei Paris; 2005 Berufung an die Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw-saar), Lehrgebiete : Kraft- und Arbeitsmaschinen und Automatisierungstechnik. 12 Jahre Industrietätigkeit in leitenden Positionen bei HJS-Fahrzeugtechnik, Siemens Automobiltechnik und ArvinMeritor, Arbeitsschwerpunkte in der Entwicklung von Abgasreinigungssystemen und Motorsteuerungssystemen.

Reiner Homrighausen, Dr., Dipl.-Geologe, Geschäftsführer der RH Drilling-Technology GmbH ist als Berater von Minen-Gesellschaften, Bohrunternehmen und Behörden im Ausland tätig. Nach seinem Studium in Deutschland, Österreich und den USA war er

als Explorationsgeologe in vielen Ländern Afrikas tätig. Bis 2016 begleitete er leitende Positionen in national und international tätigen Firmen der Bohrindustrie, die auf den Gebieten des Brunnenbaus, des Explorationsbohrens, des Bohrens für die Gewinnung geothermischer Energie und des Bohrens für die Erkundung und Bewertung von unkonventionellen Kohlenwasserstofflagerstätten tätig sind.

Eva-Maria Jakobs, Univ.-Prof. Dr. phil., forscht und lehrt an der RWTH Aachen. Gegenstand ihrer Professur für Textlinguistik und Technikkommunikation sind kommunikative Prozesse und Aufgaben in Technik und Wirtschaft. Ihr Forschungsteam befasst sich mit Fragen der Technikwahrnehmung, -gestaltung und -kommunikation in Anwendungsbereichen wie Erneuerbare Energien, Mobilität, IuK und Industrie 4.0. Sie ist Ko-Direktorin des Instituts für Industriekommunikation und des Human-Computer Interaction Center der RWTH Aachen sowie ordentliches Mitglied der Akademie der Technikwissenschaften (acatech).

David Koppmann, M. Sc., seit dem Abschluss seines Bauingenieurstudiums mit der Vertiefungsrichtung Tunnelbau und Geotechnik an der RWTH Aachen im Jahre 2013 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen tätig. Dort beschäftigt er sich mit dem Forschungsschwerpunkt der Nutzung oberflächennaher Geothermie mittels thermisch aktivierter Bauteile.

Jens-Uwe Kühl, Dipl.-Ing., studierte 2000–2006 Bauingenieurwesen an der Universität Rostock. Von 2006–2010 war er Fachgruppenleiter Oberflächennahe Geothermie und 2010–2015 Geschäftsführer; seit 2015 ist er Inhaber und Geschäftsführer bei H.S.W. Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH.

Sylvia Kürten, Dr., nach dem Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen tätig. Sie beendete Ihre Tätigkeit an der Hochschule mit ihrer Dissertation „Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen“. Seit 2014 ist sie als Bauingenieurin im Ingenieurbüro Gell & Partner GbR in Aachen tätig.

Björn-Martin Kurzrock, Prof. Dr., ist seit Juni 2013 Professor für Immobilienökonomie an der TU Kaiserslautern, zuvor von April 2008 bis Mai 2013 als Juniorprofessor. Mit dem Fachgebiet gestaltet er den Facility Management (B.Sc. und M.Sc.) im Fachbereich Bauingenieurwesen mit, seit 2015 als Studiengangsleiter. Er forscht insbesondere in den Bereichen Bestandsentwicklung und Digitalisierung im Immobilienmanagement sowie Wissenstransfer und Anreizsysteme in der Bau- und Immobilienwirtschaft. Er lehrt Kurse u. a. in Strategischem FM, Immobilienmanagement, Immobilien-Investmentmanagement, Immobilien-Projektentwicklung, Bestandsentwicklung und Immobilienbewertung. Von 2006 bis 2008 war er bei der IPD Investment Property Databank (heute: MSCI) in Wiesbaden als Head of Research tätig. Stationen davor waren bei internationalen Unternehmen als Financial Analyst und Research Analyst im Bereich Bestandsanalyse und Benchmarking von Immobilien-Portfolios. Er promovierte am Real Estate Management

Institute (REMI) der EBS European Business School (EBS Universität für Wirtschaft und Recht). Das Studium der Betriebswirtschaftslehre absolvierte er an der EBS und der Georgia State University Atlanta (USA). Seit 2008 ist Professor Kurzrock Mitglied im Herausgebergremium der Zeitschrift für Immobilienökonomie (ZIÖ). Er ist seit Mai 2016 Member of the Board der European Real Estate Society (ERES) und dort Repräsentant für die Gesellschaft für immobilienwirtschaftliche Forschung (gif). Von den Studierenden im Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern wurde er mehrfach mit dem Fachschaftspreis für hervorragende Lehre ausgezeichnet.

Clemens Lehr, Dipl.-Geol., studierte Geologie und Paläontologie an der Johann-Wolfgang-Goethe Universität, Frankfurt. Von 1994–1997 war er Gesellschafter und Projektmanager bei Protec GmbH und 1997–2014 Gesellschafter-Geschäftsführer bei Geosysteme GmbH. Seit 1997 leitet er das Geotechnische Umweltbüro Lehr, das sich mit geothermalen Systemen, der Entwicklung geopysikalischer Messgeräte für die Geothermie (GRT-Messgeräte, EGRT Fiberoptical Systems); geophysikalische Messsonden, Energie-Monitoring-Systeme, Entwicklung thermophysikalischer und numerischer Software, Boden-, Wasser- und Bodenluft-Sanierungssysteme sowie Mess- und Monitoring-Technik befasst. Er ist seit 2013 Mitglied des Arbeitskreises AK Geothermie der FH-DGG und FI-DGGT/DGG und Mitautor der Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – EA Geothermie. Seit 2015 hat er einen Lehrauftrag an der Technischen Universität Darmstadt.

Katharina Link, Dr., berät als Inhaberin der Geo-Future GmbH (Frauenfeld) im Bereich Geothermie. Seit 2012 leitet sie u. a. im Auftrag die internationale Arbeitsgruppe „Direct Use of Geothermal Energie“ der IEA Geothermal, welche auch innovative oberflächennahe Geothermiesysteme umfasst. Dr. Katharina Link ist zudem als Mitarbeiterin der Geo-Energie Suisse AG (Zürich) an der Entwicklung von innovativen EGS-Projekten beteiligt. Bereits in ihrer Forschungstätigkeit als Geologin an der Universität Freiburg i. Br. hat sie sich u. a. mit den thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Grundgebirges befasst.

Karl-Norbert Lux, Dr. rer. nat. Dipl.-Geophys., 1969–1973 Studium der Angewandten Geophysik, Bergakademie Freiberg, Abschluss als Diplom-Geophysiker; 1978–1980 Zusatzstudium Grundwasser an der TU Dresden; 1985 Promotion an der Bergakademie Freiberg zum Dr. rer. nat. (außerplanmäßige Aspirantur 1981–1985); 1973–1990 VEB bzw. Kombinat GEOPHYSIK, Bohrlochgeophysik in der Rohstofferkundung (Erdöl/Erdgas, Braunkohle, Feste Minerale, Erz), im Grundwasser und in der Ingenieurgeologie; 1990–2000 Prokurist, ab 1993 Geschäftsführer-Gesellschafter der BLM-GmbH; seit Ende 2000 freiberuflicher Geophysiker (Mitinhaber der GFL – Dr. Lux Geophysikalische Fachberatung GbR) mit den Schwerpunkten Planung, Organisation, Durchführung von Messungen im Untergrund; Geophysikalische Bohrlochmessungen sowie Oberflächengeophysik; Auswertung und Interpretation der Messungen, Gutachten und Consulting zur Geophysik einschließlich spezieller geohydraulischer Probleme

Simeon Meier, Dipl.-Ing., Ingenieur, Geschäftsführer bei der enOware GmbH, mehrjährige Erfahrung in der Projektleitung und Entwicklung innovativer online-basierter Messsysteme und elektronischer Lösungskonzepte.

Helga Nutz, Dr. rer. nat., Dipl.-Math. techn., Studium Technomathematik an der Universität Kaiserslautern; 1998 Diplom; 2002 Promotion in Mathematik; 2002–2003 Forschungsreferentin der Universität Kaiserslautern; 2006–2016 Mitarbeiterin der AG Geomathematik (Leiter: Prof. W. Freeden) der TU Kaiserslautern und im Rahmen dieser Tätigkeit von 2012–2016 Koordinatorin im BMWi-Verbundprojekt GEOÜND; seit 2016 Angestellte der „Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH (CBM)“, Bexbach, im Rahmen des BMWi-Projekts „SPE“.

Renate Pechnig, Dr.-Ing., nach der Promotion an der RWTH Aachen (1996) leitete sie für mehrere Jahre die Arbeitsgruppe Bohrlochgeophysik am Institut für Angewandte Geophysik der RWTH Aachen und ist bis heute der Hochschule über ihre Lehrtätigkeit verbunden. Seit 2003 ist sie Geschäftsführerin der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Aachen, und verantwortlich für Projekte im Bereich der oberflächennahen und tiefen Geothermie mit einem Schwerpunkt auf der Erfassung und Modellierung thermischer Prozesse im Untergrund.

Martin Sabel, Dr., Diplom-Geologe, Geschäftsführer des Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 1994–2000 Studium der Geowissenschaften an den Universitäten Kiel, Köln und Bonn, 2000–2003 Promotion zum Thema Paläoklima im Rahmen des interdisziplinären Projekts „Forschungsbohrung Eckfelder Maar“ am Mineralogisch-Petrologischen Institut der Universität Bonn, 2003–2007 Projektleiter am Landesamt für Umwelt-, Naturschutz und Geologie des Landes Mecklenburg-Vorpommern in Stralsund in den Bereichen Umweltanalytik, -monitoring und Qualitätssicherung, 2007–2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Material und Umwelt, Umwelteinflüsse und Schädigungsmechanismen an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin, Seit 2012 Referent für Geothermie beim BWP e.V., seit 2014: stellvertretender Geschäftsführer; seit 2017: Geschäftsführer

Marietta Sander, Technische Hochschule Georg Agricola (bis 12/2016 International Geothermal Association, c/o Hochschule Bochum) arbeitete von 2/2011 bis 12/2016 als Executive Director in der International Geothermal Association (IGA). Sie war verantwortlich für die Leitung der Geschäftsstelle in Bochum, sektorspezifische Beratung, die Zusammenarbeit mit internationalen Organisationen, Öffentlichkeitsarbeit als auch Finanz- und Mitgliedsmanagement. Vor ihrer IGA-Tätigkeit war sie in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als Projektleiterin für das GEOTHERM Sektorvorhaben in Ostafrika zuständig. Zuvor war sie als zertifizierte Projektmanagerin Regenerative Energien und als Diplom-Geographin im Umwelt- und Ressourcenschutz in der internationalen Entwicklungszusammenarbeit in Vietnam, Südafrika, Lesotho und Peru tätig.

Sass, Ingo, Prof. Dr. rer. nat., studierte 1984–1987 an der Universität Hamburg und 1987–1990 an der Universität Karlsruhe (TH), Diplom in Angewandter Geologie: Hydrogeologie; 1991–1994 Dissertation zum Thema „Brunnen und Filter für die Sanierung von Untergrundkontaminationen“. 1990–1991 Projektingenieur bei Pall Schumacher GmbH, Crailsheim, 1994–1998 Technischer Geschäftsführer bei FlowTex GUT GmbH, Ettlingen und 1999–2005 Vorstand bei CDM Consult AG sowie Geschäftsführer Süddeutschland bei CDM Consult GmbH. Seit 2004 ist er beratender Ingenieur der Ingenieurkammer Baden-Württemberg. 2005–2009 Professor (W3) für Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor an der TU Darmstadt, seit 08/2009 Berufung auf die Stiftungsprofessur (W3) „Angewandte Geothermie“ an der TU Darmstadt, finanziert vom NaturPUR Institut der HSE AG. Seit 2011 ist er öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Geothermie der Ingenieurkammer Hessen und beratender Ingenieur der Ingenieurkammer Hessen.

Jochen Schneider, Dr., promovierte am Institut für Geowissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität in Heidelberg. Als Geschäftsführer eines Freiburger Fördervereins für erneuerbare Energien, war er verantwortlich für die Öffentlichkeitsarbeit zur Geothermie in der Oberrheinregion. 2007 wechselte er zur Hydroisotop GmbH, bevor er 2012 die Hydrosion GmbH gründete, die sich mit Wasseranalytik und -interpretation bei geothermischen Nutzungen beschäftigt.

Alexander Sperr, 1989–1991 Lehre zum Zentralheizungs- und Lüftungsbauer, Firma Josef Schneider, Stimpfach, 1991–1998 Studium der Gebäudetechnik an der Technischen Universität Berlin, 1996–1998 Studienpraktikum und studentischer Mitarbeiter bei Energie-System-Technik GmbH, Ingenieurbüro für Gebäudetechnik, Berlin, 1998–2001 Assistent im Studiengang Gebäudetechnik/Gebäudeklimatik an der Hochschule Biberach, 2002–2006 Lehrauftrag in Strömungstechnik an der Hochschule Biberach, 2001–2005 Dozent im Energiemanager-Lehrgang der IHK Akademie Schwaben für die Fächer Wärmebedarfsberechnung, Heizungstechnik, Solartechnik und Prozesswärme, 2001–2008 Technischer Laborleiter des Labors für Raumluft- und Klimatechnik an der Hochschule Biberach, 2008–2013 Fachgebietsleiter „Hauswärmetechnik, Lüftung und Klimatisierung“ beim BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. und bei der HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. in Berlin, seit 2013 Referent Technik und Normung beim Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.

Thomas Storch, Dr.-Ing., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. 2014 promovierte er im Bereich Energietechnik mit dem Titel: „Grundlegende Untersuchungen zum Wirkprinzip von geothermischen Phasenwechselsonden“. Aktuelle Forschungsbereiche sind das energetische Monitoring, die oberflächennahe Geothermie und Grubenwassernutzung, sowie allgemein die Untersuchung von Wärmetransportvorgängen mit Phasenänderungen in Thermosiphons und Heat Pipes.

Marc-Alexander Tilg, M. Sc., Lagerstätten- und Explorationsgeologe, seit 2015 mit dem Schwerpunkt Geothermie. Projektgeologe bei der Montanes Explorationsgesellschaft mbH.

Simone Walker-Hertkorn, Prof. Dr., ist seit mehr als 17 Jahren auf dem Gebiet der Geothermie tätig. Sie hat sich in dieser Zeit bundesweit einen Ruf als erfahrene Spezialistin für die Nutzung der Erdwärme erworben. Als Mitglied im Richtlinienausschuss der VDI 4640 sowie durch die Mitarbeit in verschiedenen Gremien und Arbeitskreise, zum Beispiel als Experte im Auftrag der DVGW Cert GmbH bei der W 120 Überprüfung, wirkt sie maßgeblich an der Formulierung von Qualitätsstandards in der Geothermie mit. Seit 2008 ist sie Professorin an der Fakultät Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Deggendorf mit dem Schwerpunkt Geothermische Energiesysteme. Der Fachbereich Geothermische Energiesysteme hat seinen Sitz am Wissenschaftszentrum in Straubing, wobei neben der Geothermie auch die Innovative Gebäudetechnik mit Schwerpunkt Wärmepumpe gelehrt wird.

Roland Wyss, Dr., Inhaber der gleichnamigen Beratungsfirma in Frauenfeld (Schweiz), arbeitet als Geologe und Experte in den Fachbereichen: Geothermie, Hydrogeologie und Ingenieurgeologie (u. a. Tunnelbau, Naturgefahren). Nach dem Studium und Assistenzjahren an der Universität Bern war Roland Wyss in verschiedenen Firmen im In- uns Ausland tätig. Arbeitsgebiete waren vor allem: Erdöl- und Erdgasexploration, Tunnel- und Stollenbau, Geothermie, Grundwasserabklärungen, Naturgefahren, Baugrunduntersuchungen und Kartierarbeiten. Zudem war er während vier Jahren als Dozent für verschiedene Lehraufträge an der ETH Zürich tätig. Roland Wyss hat in den vergangenen dreißig Jahren Geothermieprojekte in verschiedenen Funktionen betreut. Er war von 2006 bis 2016 Geschäftsführer/Generalsekretär von GEOTHERMIE.CH.

Martina Ziefle, Univ.-Prof. Dr. phil., ist Inhaberin des Lehrstuhls für Communication Science an der RWTH Aachen University. Sie ist eine von vier Gründungsdirektorinnen des 2011 ins Leben gerufenen Human-Computer Interaktion Center. Die Expertise des Lehrstuhls liegt in der empirisch-experimentellen Modellierung der Akzeptanz von Technik sowie der Interaktion und Kommunikation zwischen Mensch und Technik. Die Forschung zur Technikwahrnehmung konzentriert sich auf das Beschreiben, Quantifizieren und Modellieren kognitiver und emotionaler Fähigkeiten der Endkunden, ihre Wahrnehmung und Akzeptanz von Technologie in Abhängigkeit vom Technologietyp und dem Nutzungskontext. Auch werden neue digital unterstützte Kommunikationsformen sowie Interfacegestaltung unter Berücksichtigung individueller, rollen-, geschlechts- und kulturbezogener Bedarfe untersucht. Von besonderer Bedeutung für betriebene Akzeptanzforschung sind gesellschaftlich hochrelevante, aber in ihrer Bewertung stark variierende, und umstrittene Technologien (z. B. Mobilfunktechnologie, Tiefe Geothermie, Informations- und Kommunikationstechnologien, die im häuslichen Umfeld integriert werden), für die Akzeptanzkartographien erstellt werden. Diese auf menschlichen Wahrnehmungsurteilen

basierenden Modelle erlauben verschiedene bei Technologien gleichzeitig wahrgenommene Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen und menschliche Entscheidungen zu simulieren.

Roman Zorn, Dr. rer. nat., Diplom-Geologe. Langjährige Erfahrung in angewandter Forschung in der oberflächennahen und der tiefen Geothermie. Seit 2006 European Institute für Energieforschung (EIFER) in Karlsruhe, Direktor Geo-Labore. Partner der enOware GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1 Geothermie – Ein kurzer Abriss 1
Willi Freeden und Clemens Heine
1.1 Schalengestalt der Erde 3
1.2 Wärmepotential der Erde 4
1.3 Geschichte der Geothermie 6
1.4 Arten geothermischer Reservoire und Systeme 7
1.4.1 Klassifikation nach der Temperatur 7
1.4.2 Klassifikation nach der Tiefe 8
1.5 Explorationsmethoden und -Datensysteme 12
1.6 Modellierung von Reservoirmodellen 16
1.7 Nutzung der Erdwärme 17
1.8 Vorteile und Nachteile der Geothermie 18
1.9 Fazit 20
1.10 Ausblick 20
Literatur 21

2 Bedeutung der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien 23
Björn-Martin Kurzrock und Tillman Gauer
2.1 Immobilienbestand in Deutschland 24
2.1.1 Gebäudearten und -kategorien 25
2.1.2 Gebäudetypologien 27
2.1.3 Energieeffizienz von Gebäuden 27
2.2 Energetische Anforderungen, Vorgaben und Anreize 31
2.2.1 Anforderungen und Vorgaben auf Bundes- und Länderebene 31
2.2.2 Förderprogramme auf Bundesebene 31
2.2.3 Ergänzende Instrumente von Bundesländern und Kommunen 32
2.3 Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren 34
2.3.1 Wärmebedarf 34

2.3.2 Wärmerzeugung 35
2.3.3 Wärmeverteilung/Wärmeübertragung 37
2.3.4 Wärmespeicher 38
2.3.5 Vom Gebäude zum Quartier 39
2.3.6 Zwischenfazit: Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren 51
2.4 Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien 52
2.4.1 Stärken 52
2.4.2 Schwächen 54
2.4.3 Chancen 55
2.4.4 Risiken 58
2.4.5 Zwischenfazit: Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien 60
2.5 Zusammenfassung und Ausblick 62
Literatur 63

3 Geologische und geophysikalische Untersuchungen 65
Kord Ernstson
3.1 Einführung 67
3.2 Tiefe und Oberflächennahe Geothermie 69
3.3 Geologie und Hydrogeologie in der Oberflächennahen Geothermie 72
3.3.1 Kartenwerke 73
3.3.2 Das digitale Geländemodell (DGM) 81
3.3.3 Etwas Wärme-Physik: Heizung, Kühlung, Speicherung von Wärme und Kälte 90
3.3.4 Offene Systeme 92
3.3.5 Geschlossene Systeme 94
3.3.6 GRT (Geothermal Response Test), geologische und hydrogeologische Rechenmodelle und geologische Risiken 96
3.3.7 Die Fälle Staufen und Böblingen 98
3.4 Wichtige Prinzipien der geophysikalischen Messverfahren 100
3.4.1 Charakteristische Unterschiede bei den Verfahren 100
3.4.2 Erkundungstiefen 105
3.4.3 Auflösungsvermögen 106
3.4.4 Signal-Rausch-Verhältnis S/R 108
3.4.5 Datenverarbeitung 110
3.4.6 Von der Messung zur (hydro)geologischen Aussage: Mehrdeutigkeit geophysikalischer Messungen 118
3.5 Petrophysikalische Parameter 119
3.5.1 Geoelektrik 120
3.5.2 Seismik 122
3.5.3 Bodenradar (Georadar, GPR, *ground penetrating radar*) 123
3.5.4 Gravimetrie 123

3.5.5 Geomagnetik . . . 125
3.5.6 Radiometrie . . . 126
3.5.7 Geothermische Parameter . . . 127
3.6 Die Messverfahren . . . 128
3.6.1 Geoelektrik . . . 130
3.6.2 Seismik . . . 149
3.6.3 Bodenradar . . . 164
3.6.4 Gravimetrie . . . 166
3.6.5 Geomagnetik . . . 170
3.6.6 Radiometrie . . . 173
3.6.7 Geothermie . . . 175
3.6.8 Neuentwicklungen . . . 179
3.6.9 Bohrlochgeophysik . . . 180
3.7 Geophysik und der Aquifer . . . 180
3.7.1 Porosität . . . 181
3.7.2 Permeabilität/Transmissivität . . . 181
3.7.3 Kluftporosität und Permeabilität/Transmissivität im Festgestein . . . 184
3.7.4 Grundwasserspiegel . . . 186
3.7.5 Grundwasserfließrichtung und Fließgeschwindigkeit . . . 189
3.7.6 Generelle Grundwasserbewegungen – indirekter Zugang . . . 190
3.8 Geophysik und geologisch-geotechnische Risiken bei der Oberflächennahen Geothermie . . . 191
3.8.1 Tektonik . . . 191
3.8.2 Karst, Verkarstung . . . 194
3.8.3 Salinar: Anhydrit und Gips . . . 196
3.8.4 Hangrutsche . . . 198
3.8.5 Hohlraumortung . . . 199
3.8.6 Altlasten . . . 202
3.9 Geophysik als Dienstleistung . . . 206
3.9.1 Ingenieurgeophysik . . . 206
3.9.2 Unzulänglichkeiten – ein geophysikalisches Beispiel . . . 207
3.9.3 Fehlerquellen und Fehler . . . 209
3.9.4 Ausschreibungen, Berichte und Gutachten . . . 211
3.9.5 Geophysik und Bohrungen . . . 211
3.9.6 Zum Thema Wünschelrute, Erdstrahlen und Verwandtes . . . 213
3.10 Schlussbemerkungen . . . 215
Literatur . . . 216

4 Innovative Explorationsmethoden in der Gravimetrie und Reflexionsseismik . . . 221
Christian Blick, Willi Freeden und Helga Nutz
4.1 Einleitung . . . 222

4.2 Grundlagen der gravimetrischen Exploration . . . 225
4.3 Grundlagen der seismischen Tomographie . . . 226
4.4 Multiskalentechniken mittels Wavelets . . . 228
4.5 Postprocessing im Explorationsgebiet E . . . 232
4.6 Dekorrelation von Signaturen in E . . . 239
4.7 Tiefendetektion geologischer Formationen lokal in E . . . 246
4.8 Lokale Multiskalenverbesserung in der Bohrlochumgebung . . . 249
4.9 Inverses Problem der Ermittlung der Dichte in E aus Potentialdaten des Komplements von E . . . 251
4.10 Zusammenfassung und Ausblick . . . 253
Literatur . . . 255

5 Mathematische Lösungspotentiale, Strategien und Dilemmata . . . 257
Willi Freeden und Helga Nutz
5.1 Einleitung . . . 258
5.2 Grundgleichungen in der Exploration . . . 259
5.2.1 Gravimetrie . . . 260
5.2.2 Geomagnetfeldbestimmung . . . 260
5.2.3 Akustisch basierte seismische Tomographie (Helmholtz-Ansatz) . . . 261
5.2.4 Akustisch basierte seismische Tomographie (d'Alembert-Ansatz) . . . 262
5.3 Strategien und Dilemmata . . . 264
5.3.1 Regularisierung und Fehlerspezifikation . . . 267
5.3.2 Stetige und diskrete Regularisierung . . . 270
5.3.3 Dilemmata und Methodologien . . . 271
5.3.4 Grobe Eingruppierung der Regularisierungsmethoden . . . 272
5.4 Zusammenfassung und Ausblick . . . 276
Literatur . . . 278

6 Auswirkungen der Grundwasserbeschaffenheit auf Bau und Betrieb Oberflächennaher Geothermieanlagen . . . 281
Lena Eggeling und Jochen Schneider
6.1 Einleitung . . . 282
6.2 Offene Systeme . . . 283
6.2.1 Probenahme und Analytik . . . 283
6.2.2 Einfluss der Wasserqualität auf den Betrieb . . . 284
6.3 Geschlossene Systeme . . . 286
6.3.1 Analysenkonzepte zur Charakterisierung sulfathaltiger Gesteine . . . 286
6.3.2 Chemische Zusammensetzung von Wärmeträgerfluiden . . . 289
6.3.3 Temperaturinduzierte Änderungen der Chemie . . . 290
Literatur . . . 292

7 Risikomanagement bei Planung, Bau und Betrieb von Geothermieanlagen 295
Hans Jacobi und Thomas Neu
7.1 Einführung . . . 296
7.2 Risikomanagement: Definition und Methoden . . . 296
7.3 Identifikation potenzieller Risiken in der Oberflächennahen Geothermie . . . 298
7.4 Bewertung der Risiken . . . 300
7.5 Maßnahmen zur Verringerung der Risiko-Eintrittswahrscheinlickeit und zur Schadensminimierung . . . 312
7.6 Schlussbetrachtung . . . 321
Literatur . . . 321

8 Rechtliche und politische Rahmenbedingungen für oberflächennahe Geothermieprojekte . . . 323
André Deinhardt und Gregor Dilger
8.1 Rechtliche Bestimmungen . . . 325
8.1.1 Wasserrechtliche Genehmigung . . . 325
8.1.2 Bergrecht . . . 326
8.2 Technische Regelwerke . . . 326
8.2.1 DVGW W120-2 . . . 326
8.2.2 VDI 4640 . . . 326
8.3 Wärmemarkt als Rahmen . . . 327
8.3.1 Was bewegt den Markt? . . . 328
8.4 Förderung der Geothermie als Erneuerbare Energie . . . 328
8.4.1 Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz . . . 329
8.4.2 Marktanreizprogramm (MAP) . . . 329
8.4.3 Marktanreizprogramm (MAP) – KfW-Teil . . . 330
8.4.4 Energieeinsparverordnung (EnEV) . . . 330
8.4.5 Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) . . . 331
8.4.6 Anreizprogramm Energieeffizienz . . . 331
8.4.7 Erneuerbare-Energien-Richtlinie . . . 332
8.5 Wahrnehmung von Geothermie in der Öffentlichkeit . . . 332
Literatur . . . 333

9 Oberflächennahe Geothermie und Bergrecht . . . 335
Walter Frenz
9.1 Problemaufriss . . . 336
9.2 Relevanz des Bergrechts . . . 337
9.2.1 Nur bei nicht grundstücksbezogener Gewinnung . . . 337
9.2.2 Gewerbliche und wissenschaftliche Aufsuchung . . . 338
9.2.3 Speicherung und Entnahme von Wärmeenergie . . . 339
9.2.4 Grundwasser als Trägermedium . . . 339
9.2.5 Bohrungen . . . 339

9.3 Bergrechtliche Haftung für Schäden aus Geothermiebohrungen 342
9.3.1 Reichweite 342
9.3.2 Bohrbezug 342
9.3.3 Kausalität 344
9.3.4 Sozialadäquanz 345
9.3.5 Schutzzweck 346
9.3.6 Zwischenergebnis 347
9.4 Betriebsplanpflicht 347
9.5 Verbindung zu Fracking 349
9.6 Gesamtfazit 350
Literatur 350

10 Anforderungen an ein Geothermieprojekt aus der Sicht eines Bauherren 353
Klaus Bücherl und Simone Walker-Hertkorn
10.1 Einführung 354
10.2 Auswahl und Beauftragung eines geothermischen Fachplaners 355
10.2.1 Zeitpunkt der Beauftragung 355
10.2.2 Vergabe und Vertragsgestaltung 357
10.3 Projektablauf 359
10.3.1 Grundlagenermittlung, Machbarkeitsprüfung 359
10.3.2 Vorplanung 360
10.3.3 Entwurfsplanung 363
10.3.4 Genehmigungsplanung 364
10.3.5 Ausführungsplanung 364
10.3.6 Vergabe der Leistungen 364
10.3.7 Ausführung 365
10.3.8 Dokumentation 366
10.3.9 Zusammenfassung 367
10.4 Optimale Einsatzgebiete der Oberflächennahen Geothermie 367
Literatur 369

11 Bohrtechnik für oberflächennahe geothermische Energiequellen 371
Reiner Homrighausen
11.1 Oberflächennahe Bohrungen und ihre Definition 373
11.2 Die Projekte gestern, heute und morgen 374
11.3 Die heutige moderne Technik 375
11.3.1 Das Bohrgerät, die Bohranlage 375
11.3.2 Das Bohrzubehör 378
11.3.3 Das Spülungstanksystem 382
11.3.4 Das Verpresssystem/die Kompaktmischanlage 383
11.3.5 Benötigter Platzbedarf 384
11.3.6 Die Logistik während der Bohrarbeiten 386
11.4 Die Bohrverfahren 386
11.4.1 Das Rotary-Druckspülbohrverfahren ohne Hilfsverrohrung . . . 387

11.4.2 Das Rotary-Druckspülbohrverfahren mit gleichzeitiger Verrohrung . . . 390
11.4.3 Das Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren mit Luft als Spülungsmedium . . . 392
Literatur . . . 394

12 Die Anforderungen der Wärmepumpe an die Wärmequelle . . . 395
Martin Sabel und Alexander Sperr
12.1 Die Wärmepumpe . . . 396
12.2 Energieeffizient Heizen und Kühlen . . . 398
12.2.1 Energieeffizienz – was ist das? . . . 398
12.2.2 Energieeinsparverordnung (EnEV) . . . 398
12.2.3 Energieeffizienz von Wärmepumpen . . . 400
12.2.4 Kühlen mit Wärmepumpen . . . 404
Literatur . . . 408

13 Geothermische Phasenwechselsonden als Wärmeentzugssystem . . . 409
Thomas Storch, Thomas Grab und Ulrich Groß
13.1 Einleitung . . . 410
13.2 Funktionsweise einer geothermischen Phasenwechselsonde . . . 411
13.2.1 Aufbau und Funktionsweise von Heat Pipes und Thermosiphons . . . 411
13.2.2 Aufbau und Funktionsweise einer Phasenwechselsonde . . . 413
13.2.3 Vor- und Nachteile im Vergleich zu Flüssigkeitszirkulationssonden . . . 414
13.3 Anwendungsbereiche von Thermosiphons bzw. Fallfilmverdampfern . . . 415
13.3.1 Geschichtliche Entwicklung von Thermosiphons in der Oberflächennahen Geothermie . . . 416
13.3.2 Anwendungsbeispiele von Thermosiphons und Fallfilmverdampfern . . . 417
13.4 Auslegungsgrundlagen und physikalische Grundlagen . . . 420
13.4.1 Arbeitsstoffe . . . 420
13.4.2 Leistungsgrenzen und Arbeitsbereich . . . 421
13.4.3 Anfahrverhalten und zyklischer Wärmeentzug . . . 427
13.4.4 Temperaturverteilung entlang der Sonde . . . 430
13.4.5 Füllmenge und statische Dampfdrucksäule . . . 432
13.4.6 Sondeninterne Regeneration . . . 435
13.4.7 Energetische Betrachtung . . . 438
13.4.8 Simulationen zum Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom . . . 441
13.5 Schlussbemerkung und Ausblick . . . 444
Literatur . . . 445

14 Ausbau der Bohrung zu geothermischen Quellen 451
Frank Burkhardt
14.1 Einleitung 452
14.2 Offene Systeme 452
14.2.1 Brunnenanlagen 452
14.3 Geschlossene Systeme 458
14.3.1 Erdwärmesonden Duplex und Koaxial 458
14.3.2 Koaxiale Speichersonden 470
14.3.3 Direktverdampfersonden 473
Literatur 476

15 Thermisch aktivierte Bauteile 477
Sylvia Kürten, David Koppmann und Renate Pechnig
15.1 Einleitung 478
15.2 Typen thermisch aktivierter Bauteile 479
15.2.1 Energiepfähle 479
15.2.2 Energiewände und Bodenplatten 484
15.2.3 Thermische Aktivierung von Tunnelbauwerken 487
15.2.4 Spezialsysteme thermisch aktivierter Bauteile 491
15.3 Besondere Randbedingungen bei thermisch aktivierten Bauteilen 494
15.3.1 Randbedingungen für den Anlagenbetrieb 494
15.3.2 Randbedingungen für die Bemessung 495
15.3.3 Urban Heat Island Effect 498
15.3.4 Einfluss des Grundwassers 499
15.4 Auslegung und Bemessung thermisch aktivierter Bauteile 500
15.4.1 Berechnungsansätze für Energiepfähle 501
15.4.2 Berechnungsansätze für flächige thermisch aktivierte Bauteile . 504
Literatur 507

16 Nutzung oberflächennaher Erdwärme aus einem erdgedeckten Flüssiggastank mit einer Wärmepumpe, angetrieben durch ein Blockheizkraftwerk 513
Thomas Heinze
16.1 Einleitung 514
16.2 Aufbau des Demonstrators 515
16.2.1 Komponentenauswahl 515
16.2.2 Inbetriebnahme und Einfahren der Wärmepumpe mit Wasser . . 516
16.2.3 Erster Testlauf mit Regenwasserzisterne als Erdwärmesonde . . 516
16.2.4 Zweiter Testlauf mit Luft-Wärmetauscher 517
16.2.5 Sicherheitstechnik 517
16.2.6 Kondensatrückführung in den Gastank 518
16.3 Erste Versuchsläufe mit Flüssiggas aus dem Erdtank 518
16.3.1 Optimierung der Gasentnahme am Erdtank 518
16.4 Ausblick 522

17 Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken 523
Thomas Grab, Thomas Storch und Ulrich Groß
17.1 Einleitung und geschichtliche Entwicklung 524
17.2 Aufbau und Funktionsweise einer Grubenwasseranlage 525
17.2.1 Nutzungsarten 526
17.2.2 Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten 530
17.3 Planung, Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage 532
17.3.1 Planung 533
17.3.2 Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage 539
17.3.3 Bergrecht 540
17.3.4 Wasserchemie 542
17.3.5 Öffentlichkeitswirksame Darstellung 547
17.4 Übersicht zur weltweiten geothermischen Grubenwassernutzung 548
17.4.1 Entwicklung und aktueller Stand von Grubenwasseranlagen . . . 548
17.4.2 Ausgewählte Beispiele 561
17.5 Fazit 575
Literatur 576

18 Geophysikalische Bohrlochmessungen in Geothermiebohrungen und -sonden 587
Karl-Norbert Lux
18.1 Einleitung 588
18.2 Bohrlochmesstechnische Kontrollen – Zielsetzung 589
18.3 Messtechnische Kontrollmöglichkeiten 590
18.3.1 Allgemeines 590
18.3.2 Nachweis der physischen Existenz von Abdichtungen 594
18.3.3 Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit von Abdichtungen . . 602
18.4 Optimierung der Kontrollmöglichkeiten 610
Literatur 611

19 Geothermische Messungen für die oberflächennahe Geothermie 613
Jens-Uwe Kühl und Clemens Lehr
19.1 (Geo-)Thermal Response Test (GRT/TRT) 614
19.1.1 Was ist ein GRT/TRT? 614
19.1.2 Messtechnik/Apparatur 615
19.1.3 Vorbereitung/Voraussetzungen 616
19.1.4 Messdurchführung 617
19.1.5 Auswertung der Messdaten 619
19.1.6 Ergebnisdarstellung/-Verwendung 625
19.2 Spezial-GRT/TRT 626
19.2.1 Enhanced (Geo-)Thermal Response Test (EGRT, ETRT) 626
19.2.2 GRT/TRT für Energiepfähle 628

19.2.3 GRT/TRT für horizontale Erdwärmekollektoren 630
19.3 Temperaturprofilmessungen 631
19.3.1 Allgemeines 631
19.3.2 Messtechnik 631
19.3.3 Verwendung und Interpretation der Ergebnisse 632
Literatur 634

20 Messmethoden für Monitoring, Qualitätskontrolle und Beweissicherung bei Erdwärmesonden 637
Johannes Gottlieb, Marc-Alexander Tilg, Daniel Fischer, Roman Zorn und Simeon Meier
20.1 Einleitung 638
20.2 Schadensvermeidung im Rahmen der geologischen Bewertung und EWS-Planung 639
20.3 Komponenten der Qualitätssicherung während und nach EWS-Installation 641
20.3.1 Erfassung geometrischer Parameter der EWS 641
20.3.2 Qualitätsprüfung der Zementierung 642
20.3.3 Ermittlung von Temperatur und Entzugsleistung 643
20.4 Methoden der Informationsgewinnung 645
20.4.1 Messsonden 645
20.4.2 Messmolche und Messkugeln 648
20.4.3 Langzeitmonitoring und erweiterter Thermal Response Test mit Messkugeln als neue Qualitätssicherungskonzepte 650
Literatur 651

21 Qualitätssicherung und Zertifizierung 653
Christine Buddenbohm
21.1 Einleitung 654
21.2 Mittel der Qualitätssicherung 655
21.3 Qualitätssicherung bei Wärmepumpenherstellern 656
21.3.1 Gütesiegel 656
21.4 Qualitätssicherung bei Bohrunternehmen 659
21.4.1 Grundlagen 659
21.4.2 Zertifizierung von Bohrunternehmen nach W 120 660
21.4.3 Zeichen „Fremdüberwachtes Bohrunternehmen für Erdwärmesonden“ 665
21.5 Qualitätssicherung bei Wärmepumpeninstallateuren 667
21.6 Qualitätssicherung bei Architekten und Fachplanern 668
Literatur 669

22 Risikopotenziale der Oberflächennahen Geothermie 671
Ingo Sass
22.1 Die 5-M-Methode 673
22.1.1 Mensch 673
22.1.2 Methode 674
22.1.3 Material 675
22.1.4 Maschinen 676
22.1.5 Medium 676
22.1.6 Fazit 677
22.2 Geologische Risiken 677
22.2.1 Quellfähige und setzungsempfindliche Gesteine 677
22.2.2 Lösliche Gesteine 678
22.2.3 Überkonsolidierte und porenwasserdruckanfällige Gesteine . . . 679
22.2.4 Tektonik 679
22.2.5 Massenbewegungen 680
22.2.6 Erdfall-, Senkungs- und Bergsenkungsgebiete 680
22.2.7 Gasaustritte 680
22.3 Hydrogeologische Risiken 681
22.3.1 Gespanntes und artesisch gespanntes Grundwasser 681
22.3.2 Stockwerke 682
22.3.3 Hydrochemische Gradienten 682
22.3.4 Entgasung 683
22.3.5 Wasserqualität 684
22.4 Umwelttechnische Risiken 684
22.4.1 Altlasten und Altablagerungen 684
22.4.2 Bergbau, Bergbaufolgeschäden 685
22.5 Risiken beim Sondeneinbau 685
22.6 Betriebsrisiken 687
Literatur 688

23 Kommunikation und Akzeptanz 691
Anna Borg, Eva-Maria Jakobs und Martina Ziefle
23.1 Handlungsbedarf 692
23.2 Akzeptanz innovativer/neuer Technologien 695
23.3 Kommunikation 699
23.3.1 Kommunikationsansätze für Geothermie 699
23.3.2 Kommunikationsstrategien für Geothermieprojekte 700
23.3.3 Kommunikationsgrundsätze 702
23.3.4 Kommunikationstools 703
23.3.5 (Digitale) Medien 706
23.3.6 Krisenkommunikation 707
23.4 Fazit 708
Literatur 709

24 Arbeits- und Gesundheitsschutz 715
Mathias Bauer
24.1 Vorbemerkungen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz 716
24.2 Gründe/Argumente für Arbeits- und Gesundheitsschutz 719
24.3 Grundlagen der Arbeits- und Sicherheitswissenschaft 720
24.4 Arbeits- und Gesundheitsschutzrecht 723
24.5 Gefährdungen und Belastungen bei Oberflächennaher Geothermie . . . 731
24.6 Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagementsystem 735
Literatur 737

25 Oberflächennahe Geothermie in Österreich 739
Johann Goldbrunner
25.1 Einleitung 740
25.2 Rechtliche Grundlagen 741
25.3 Probleme bei der Herstellung von Erdwärmesonden 741
25.3.1 Geologisch bedingte Ursachen 741
25.3.2 Technisch bedingte Ursachen 743
25.4 Konflikt mit wasserwirtschaftlichen Interessen 744
25.5 Anzahl der Erdwärmesonden in Österreich 745
25.5.1 Erdgekoppelte Heizungs-WP nach Leistungssektoren 746
Literatur 752

26 Oberflächennahe Geothermie in der Schweiz 755
Katharina Link und Roland Wyss
26.1 Einleitung 756
26.2 Bevölkerung 757
26.3 Geologie, Auswirkung auf Nutzung 758
26.4 Historische Entwicklung der Oberflächennahen Geothermie 759
26.5 Vollzugshilfen, technische Normen 759
26.5.1 BAFU-Vollzugshilfe «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund» 762
26.5.2 SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden 762
26.5.3 SIA-Norm 384/7 Grundwasserwärmenutzung 763
26.6 Qualitätssicherung: Prüf- und Anlaufstellen, Zertifikate, Gütesiegel . . . 764
26.6.1 Qualitätssicherung in der Schweiz 764
26.6.2 Schweizer Wärmepumpen-Testzentrum 765
26.6.3 Wärmepumpendoktor 765
26.6.4 FWS Fachpartner mit Zertifikat 766
26.6.5 Wärmepumpen-Gütesiegel 766
26.6.6 Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen 766
26.6.7 Wärmepumpen-System-Modul 767
26.6.8 Workshops Qualitätskontrolle, Informationsaustausch 768
26.7 Rechtsgrundlagen 770

26.8 Fördermaßnahmen . . . 771
26.9 Geothermische Energienutzung . . . 771
26.10 Aktueller Stand der Oberflächennahen Geothermiebranche . . . 774
26.11 Forschung . . . 774
26.12 Nachhaltigkeit im urbanen Bereich . . . 775
26.13 Künftige Entwicklung . . . 776
Literatur . . . 777

27 Oberflächennahe Geothermienutzung weltweit: regionale Trends und Innovationen . . . 779
Marietta Sander
27.1 Einführung . . . 780
27.2 Oberflächennahe geothermische Nutzungsformen weltweit . . . 781
27.3 Markt- und Technologietrends – regionale Schlaglichter . . . 783
27.3.1 Afrika . . . 784
27.3.2 Amerika . . . 784
27.3.3 Südamerika, Zentralamerika und Karibik . . . 787
27.3.4 Europa . . . 789
27.3.5 Asien . . . 791
27.4 Herausforderungen und Lösungen . . . 793
27.5 Schlussbemerkung . . . 794
27.6 Danksagung . . . 794
Literatur . . . 795

28 Ausblick: Schlüsselelemente, Herausforderungen, Chancen und Perspektiven . . . 797
M. J. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi und T. Neu
28.1 Arten der Nutzung in der oberflächennahen Geothermie . . . 799
28.2 Vorteile oberflächennaher Geothermie . . . 800
28.3 Geothermische Energie als erneuerbare Energiequelle . . . 800
28.4 Herausforderungen an oberflächennahe/tiefe Geothermie . . . 801
28.5 Schlüsselelemente bei der Entwicklung der oberflächennahen/tiefen Geothermie . . . 803
Literatur . . . 804

Stichwortverzeichnis . . . 807

Geothermie – Ein kurzer Abriss

1

Willi Freeden und Clemens Heine

Inhaltsverzeichnis

1.1 Schalengestalt der Erde . . . 3
1.2 Wärmepotential der Erde . . . 4
1.3 Geschichte der Geothermie . . . 6
1.4 Arten geothermischer Reservoire und Systeme . . . 7
1.4.1 Klassifikation nach der Temperatur . . . 7
1.4.2 Klassifikation nach der Tiefe . . . 8
1.5 Explorationsmethoden und -Datensysteme . . . 12
1.6 Modellierung von Reservoirmodellen . . . 16
1.7 Nutzung der Erdwärme . . . 17
1.8 Vorteile und Nachteile der Geothermie . . . 18
1.9 Fazit . . . 20
1.10 Ausblick . . . 20
Literatur . . . 21

Zusammenfassung

Geothermie setzt sich entsprechend seiner griechischen Herkunft aus zwei Worten $\gamma\tilde{\eta}$ = *Erde* und $\Theta\varepsilon\rho\mu\acute{o}\varsigma$ = *warm* zusammen. Geothermie bezeichnet also etymologisch die in der Erde auftretende Wärme.

Ziel dieses Kapitels ist es, einen kurzen Abriss des gegenwärtigen Facettenspektrums der Geothermie zu liefern. Dazu gehört neben der Oberflächennahen auch

Willi Freeden (✉)
Lehr- und Forschungsgebiet „Geomathematik“, TU Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Straße 26, 67663 Kaiserslautern, Deutschland
e-mail: freeden@mathematik.uni-kl.de

Clemens Heine
Neue Schloßstraße 34, 69117 Heidelberg, Deutschland
e-mail: clemens.heine@birkhauser-science.com

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_1

die Tiefe Geothermie, deren detaillierte Darstellung sich zwar im „Handbuch Tiefe Geothermie“ (Springer Spektrum, 2014) findet, hier aber dennoch hinsichtlich der Klassifizierung und der unterschiedlichen Energie- und Nutzungsformen Berücksichtigung finden soll.

Im Einzelnen schlüsselt sich das Kapitel wie folgt auf: Unter Zugrundelegung des Schalenmodells der Erde (vgl. Abschn. 1.1) beschäftigt sich Abschn. 1.2 mit den Standardschätzangaben des Wärmedargebots und -Potenzials der Erde und der omnipräsenten geothermischen Ressourcenbasis. In Abschn. 1.3 finden einige wesentliche Etappen der Geschichte geothermischer Bewusstwerdung und Energienutzung Erwähnung. Abschn. 1.4 liefert die gängigen Klassifikationen tiefer und oberflächennaher Reservoire sowie geothermischer Systeme hinsichtlich Temperatur und Tiefe. Abschn. 1.5 widmet sich den heute in der Exploration verfügbaren Datentypen aus Gravitation, Geomagnetik, Seismik, Thermoelastizität und Wärmefluss sowie den zugehörigen Explorationsmethoden in Kurzdarstellung. Es schließt sich eine Auflistung der häufigsten bei der Modellierung verwendeten Reservoirmodelle (in Abschn. 1.6) an. Abschn. 1.7 hat als Gegenstand die Nutzung der Erdwärme in Oberflächennaher – als auch Tiefer Geothermie. Der Beitrag schließt mit der Gegenüberstellung von Vorteilen und Nachteilen der Oberflächennahen als auch der Tiefen Geothermie (in Abschn. 1.8), einem Fazit in Form von Kernaussagen über die Geothermie (in Abschn. 1.9) und einem kurzen Ausblick (in Abschn. 1.10) über den zu erwartenden Anteil von Geothermie am künftigen Energiemix.

Schlüsselwörter

Oberflächennahe und Tiefe Geothermie · Geschichte · Klassifikation · Exploration · Modellierung · Vorteile · Nachteile · Perspektiven

Als Erneuerbare Energien oder regenerative Energien werden Energieträger bezeichnet, die der Menschheit unerschöpflich zur Verfügung stehen oder sich verhältnismäßig schnell erneuern. Damit grenzen sie sich von den fossilen Energieträgern ab. Zu den erneuerbaren Energiequellen zählen Bioenergie, Wasserkraft, Meeresenergie, Sonnen-, Windenergie und eben auch Geothermie (Erdwärme).

Der Bedarf an erneuerbaren Energien wächst täglich – er bestimmt immer mehr die heutige Wirtschaftslage und -entwicklung. Dies wird unter anderem durch das gestiegene Umweltbewusstsein aufgrund des Klimawandels und durch die zunehmende Knappheit der fossilen Rohstoffe verursacht. Geothermie ist im Gesamtspektrum der erneuerbaren Energiequellen eine der vielversprechenden Energielieferanten. Bei der Energiegewinnung mittels geothermischer Anlagen wird die im zugänglichen Teil der Erdkruste gespeicherte Wärme erschlossen. Verwunderlich ist, dass die Nutzung der Erdwärme heutzutage eine im Bewusstsein der Öffentlichkeit weitgehend unbekannte Möglichkeit der Energieerschließung darstellt. Die häufig fehlende Aufmerksamkeit steht dabei in keinerlei Verhältnis zu

den potentiellen Möglichkeiten, die diese regenerative Energieform bietet: Der Wärmeinhalt der Erde würde unseren heutigen Weltenergiebedarf in der Tat für Millionen von Jahren decken. Mit menschlichen Maßstäben gerechnet sind also die in der Erde gespeicherten Energievorräte genauso unerschöpflich wie die der Sonne (vgl. auch Freeden 2015; Knapek 2016).

1.1 Schalengestalt der Erde

Der Erdkörper ist, idealisiert betrachtet, aus konzentrischen Kugelschalen aufgebaut (Abb. 1.1), die jeweils aus Materialien deutlich unterschiedlicher Dichte bestehen. Die Kugelschale mit der geringsten Dichte liegt am weitesten außen und wird als Erdkruste bezeichnet. Die Kugelschale mit der größten Dichte liegt im Zentrum des Erdkörpers und

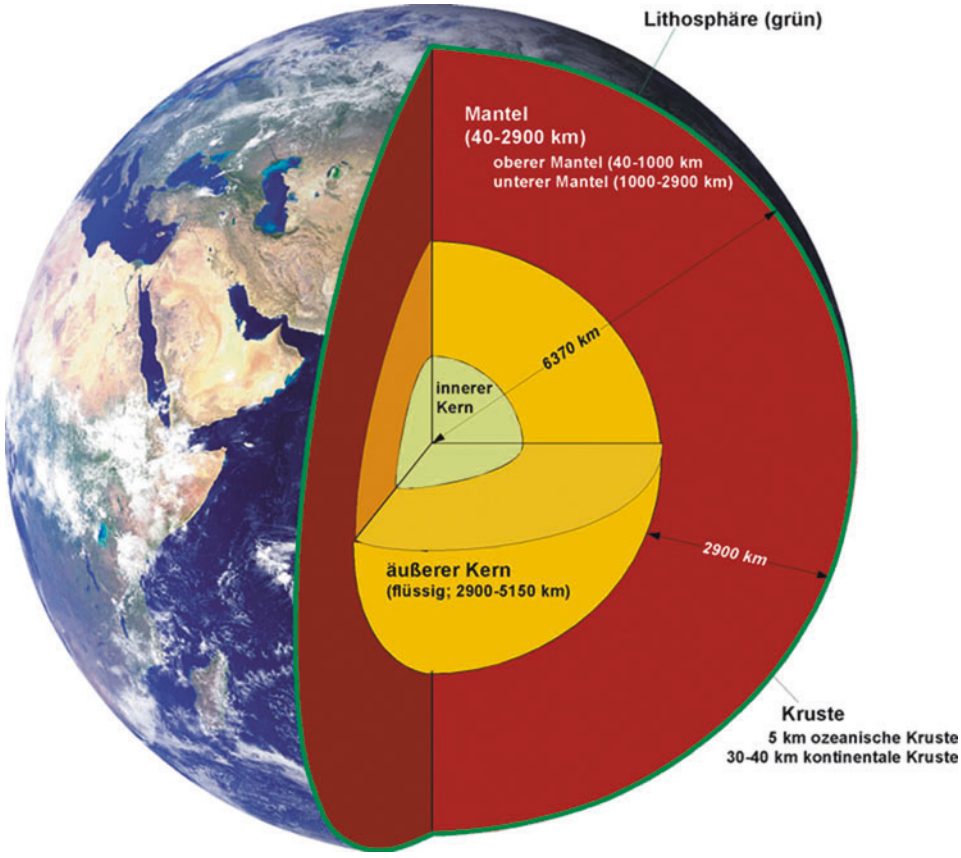


Abb. 1.1 Schalenförmigkeit der Erde inkl. Dicke- und Temperaturangabe

wird Erdkern genannt. Die Dichteschichtung im Erdkörper geht mit einer chemischen Differenzierung einher, d. h. jede Kugelschale hat eine charakteristische chemische Zusammensetzung. Der Kern hat einen Radius von mehr als 3400 km und besteht hauptsächlich aus Eisen und Nickel. Daran schließt sich nach außen der 2900 km mächtige Erdmantel aus Silikaten und -oxiden mit insgesamt hohem Anteil an Eisen und Magnesium an. Die äußere Hülle des Erdkörpers wird von der relativ dünnen (ca. 5–70 km) Kruste gebildet. Diese besteht ebenfalls vorwiegend aus Silikaten und Oxiden, jedoch mit geringerem Eisen- und Magnesiumanteil sowie einem erhöhten Anteil an Aluminium und anderen Elementen.

1.2 Wärmepotential der Erde

Nur ein Prozent unseres Erdkörpers ist weniger heiß als 1000 °C, von diesem einen Prozent ist wiederum nur ein Prozent weniger heiß als 100 °C. Allerdings ist diese Wärme jedoch nicht gleichmäßig in der Erde verteilt. Sie nimmt vom Erdkern zur Erdoberfläche hin stark ab. Die gängigen wissenschaftlichen Annahmen gehen davon aus, dass allein die oberen 10 km des Erdradius (von den insgesamt 6378 km) mit rund 100.000.000 EJ (Exajoule, 1 EJ = 10^{18} J) an Wärmeenergie das theoretische Potenzial zur mehr als 100.000fachen Deckung des gesamten aktuellen Energieverbrauchs der Erde (2010: ∼505 EJ) bergen. Die Temperaturangaben (vgl. Abb. 1.1), aber vor allem die hohen Temperaturen im Erdmantel und Erdkern, unterliegen immer noch großen Schätzfehlern. Da die Erde im Inneren sehr heiß, außen jedoch relativ kühl ist, fließt aus der Erde ein kontinuierlicher Wärmestrom in Richtung Erdoberfläche. Grundsätzlich kann Wärme durch Wärmeleitung, Konvektion und elektromagnetische Strahlung transportiert werden. In der Kruste dominiert die Wärmeleitung, in Mantel und Kern dagegen die Konvektion (vgl. Abb. 1.2). Während des Aufstieges kühlt das Mantelmaterial ab. Die Mantelkonvektion ist ein im Sinne der Strömungsmechanik chaotischer Prozess und ein Antrieb der Plattentektonik.

Schätzangaben über das Wärmedargebot der Erde finden sich in Stober 2014, wesentlich basierend auf Voruntersuchungen von Ahrens 1995, Armstead 1983, 1987 und Clauser 2006, denen wir in unserem kurzen Abriss folgen werden. Der terrestrische Wärmestrom, also die von der Erde pro Quadratmeter abgegebene Leistung (Wärmestromdichte), wird dort mit durchschnittlich 0,065 W/m^2 (65 mW/m^2) angegeben. Neben dem Verlust an Wärme gewinnt die Erde auch wieder Wärme durch die Strahlung der Sonne. Sonnenlicht ist elektromagnetische Strahlung, die im Sonneninnern durch Kernfusion entsteht und in den Weltraum abgestrahlt wird. Im Jahr trifft nach Stober (2014) in Mitteleuropa eine Energiemenge von ca. 1000 kWh/m^2 auf die Erdoberfläche. Die zur Erde kommende Sonnenenergie wird durch Wolken, Luft und Boden zu 30 % wieder in den Weltraum reflektiert. Die restlichen 70 % werden absorbiert: rund 20 % von der Atmosphäre und 50 % vom Erdboden. Letztere werden überwiegend durch Wärmestrahlung und Konvektion wieder an die Lufthülle abgegeben. Ein kleiner Bruchteil der Sonneneinstrahlung wird dazu benutzt, um die Erdoberfläche zu erwärmen, mit einer Eindringtiefe

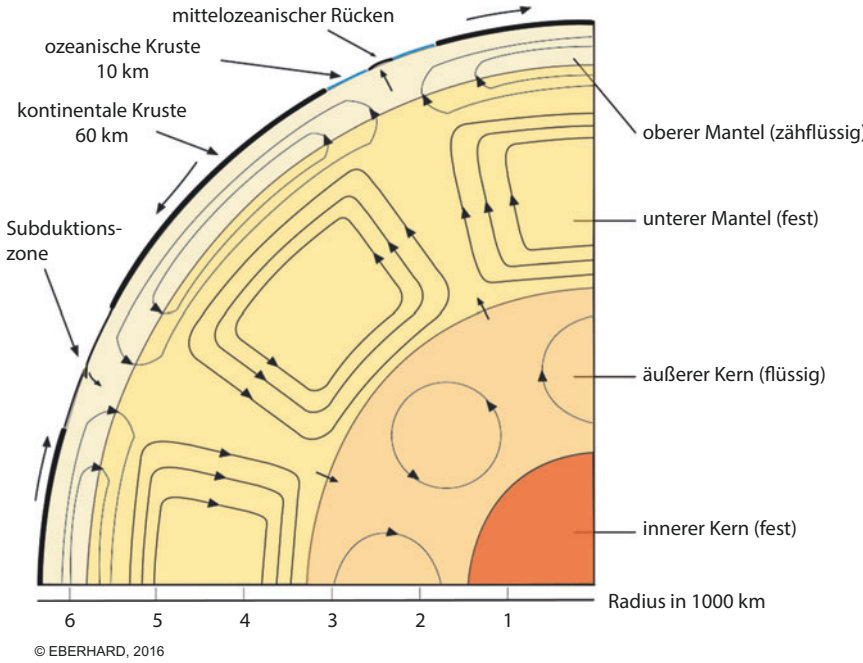


Abb. 1.2 Dynamik der Plattentektonik und Strömung in Kern und Mantel. (Eberhard 2016)

von einigen Dezimetern im Tagesgang und einigen Dekametern im Jahreszyklus. Daher hat die solare Energie auf das thermische Regime der Erde nur einen sehr beschränkten Einfluss.

In der Erdkruste nimmt die Temperatur im Mittel um etwa 3 °C pro 100 m Tiefe zu (geothermischer Gradient). Der Wärmestrom aus der Erde, der an der Erdoberfläche gemessen wird, stammt nur zu einem kleinen Teil aus dem Erdmantel oder dem Erdkern (vgl. Abb. 1.1). Über 70 % werden in der relativ dünnen Erdkruste im Wesentlichen durch radioaktiven Zerfall „gebildet“ und nur knapp 30 % dieses Wärmestromes kommen aus dem Erdkern und dem Erdmantel. Der über die gesamte Erdoberfläche integrierte Erdwärmestrom ergibt die riesige thermische Leistung von 40 Mio. MW. Die Erdkruste ist unterschiedlich dick und stofflich sehr unterschiedlich zusammengesetzt. Die kontinentale Erdkruste besteht aus sauren Gesteinen und ist deutlich dicker als die aus basischem Material aufgebaute ozeanische Erdkruste. In sauren Gesteinen ist die Wärmeproduktion deutlich höher als in basischen Gesteinen. Die produzierte Wärmeenergie kann somit innerhalb der Erdkruste sehr stark differieren. Die ständige globale Wärmeproduktion der Erde, angegeben in Energie pro Zeit und Volumen (J/(s·m^3)) durch radioaktiven Zerfall, ist in Ahrens (1995) mit 27,5·10^{12} W angegeben. Der Wärmestrom wird an der Erdoberfläche als Wärmestromdichte q in J/(s·m^2) gemessen. Die Wärmestromdichte setzt sich (Stober 2014, Stober und Bucher 2014) aus einem quasi konstanten

Strom aus dem Erdkern und Erdmantel sowie einem nicht konstanten Wärmestrom aus der Erdkruste zusammen. Die Wärmestromdichte kann sehr unterschiedlich sein; in der Theorie der Erdwärme spricht man auch hier von Anomalien. Große Anomalien treten sowohl auf den Kontinenten als auch unter den Ozeanen auf, insbesondere dort, wo die Wärme nicht nur thermisch durch das Gestein geleitet wird, sondern zusätzlich durch aufsteigende Fluide transportiert wird. Besonders große Anomalien verzeichnet man in Vulkangebieten (Wärmehotspots). Die mittlere Wärmestromdichte aus kontinentaler und ozeanischer Kruste beträgt 65 $\mathrm{mW/m^2}$ bzw. 101 $\mathrm{mW/m^2}$. Das gewichtete Mittel berechnet sich daraus zu 87 $\mathrm{mW/m^2}$ und dies entspricht einem globalen Wärmeverlust der Erde von $44{,}2 \cdot 10^{12}$ W (Pollack et al. 1993). Demgegenüber steht die ständige Wärmeproduktion der Erde durch radioaktiven Zerfall, durch Reibungswärme u. a. Netto verliert die Erde Wärme in einer Größenordnung von etwa $1{,}4 \cdot 10^{12}$ W (nach Clauser 2006). Der Abkühlungsprozess der Erde ist jedoch sehr langsam, denn Berechnungen ergaben, dass die Temperatur im Erdmantel in den letzten drei Milliarden Jahren sich nicht mehr als um 300–350 °C abgekühlt hat. Der gesamte Wärmeinhalt der Erde beträgt nach Armstead 1983 ca. $12{,}6 \cdot 10^{24}$ MJ. Die geothermische Ressourcenbasis der Erde ist demnach riesig und omnipräsent.

1.3 Geschichte der Geothermie

Seit jeher schätzen und nutzen Menschen Erdwärme dort, wo sie über eine Öffnung der Erdoberfläche direkt zugänglich ist. Prähistorische Siedlungen wurden z. B. in Japan um heiße Quellen und Vulkane gefunden. Die vulkanischen Regionen waren Anziehungspunkte, die zum Schwimmen, aber auch zum Heizen oder Kochen dienten. Häufig zitierte Beispiele dafür sind das Weltkulturerbe Pamukkale (Türkei) mit der antiken Stadt Hierapolis, aber auch die erste kommunale Wärmeversorgung durch Geothermie von 1332 im französischen Chaudes-Aigues (Cantal). Nach historischen Aufzeichnungen gab es in dieser Gegend bereits ab 1330 ein Netzwerk, das geothermisches Wasser an einige Häuser verteilte. Etwa zur gleichen Zeit wurden in Italien, in der Nähe von Volterra in der Toskana, kleine Pools von Brackwasser mit heißen Dampfvorkommen von über 100 °C für das Extrahieren von z. B. Schwefel verwendet. Im 19. Jahrhundert erlaubten mehr Wissen und mehr Leistung eine bessere Nutzung der Quellen, die schließlich zum ersten industriellen Betrieb in Larderel (Frankreich) führten. Als Visionär erwies sich der Freiberger Bergrat und Mineraloge Carl Bernhard von Cotta (Abb. 1.3) mit der für seine Zeit geradezu revolutionären Bemerkung (vgl. auch Bauer et al. 2014b):

> Sollten einst auf der mehr oder weniger bevölkerten Erde die Wälder so stark gelichtet und die Kohlenlager erschöpft sein, so ist es wohl denkbar, dass man die Innenwärme der Erde sich mehr und mehr dienstbar macht, dass man sie durch besondere Vorrichtungen in Schächten oder Bohrlöchern zur Oberfläche leitet und zur Erwärmung der Wohnungen oder selbst zur Heizung von Maschinen verwendet (von Cotta 1858).

Abb. 1.3 Carl Bernhard von Cotta (1808–1879)

Aber erst im 20. Jahrhundert wurde die von der Natur vorgegebene und damit standortgebundene Nutzung der Erdwärme auch bei geologisch nicht bevorzugten Lagen möglich. Die erste moderne Fernwärmeversorgung auf der Basis von Geothermie wurde in Reykjavik (Island) installiert. Netzwerke mit Erdwärme in Frankreich, Italien, Ungarn, Rumänien, Türkei, Georgien, China sind während der 1970er Jahre vornehmlich als Folge der Ölkrisen in Angriff genommen worden. In der Umgebung von Paris und in der französischen Hauptstadt selbst werden seit den siebziger Jahren gut 250.000 Wohnungen geothermisch beheizt.

1.4 Arten geothermischer Reservoire und Systeme

Geothermische Systeme können auf unterschiedliche Weise in Kategorien eingeteilt werden. Im Folgenden wird die Einteilung nach der Temperatur und nach der Tiefe vorgestellt.

1.4.1 Klassifikation nach der Temperatur

Länder mit aktivem Vulkanismus wie z. B. Island profitieren von Wärmereservoiren in geringer Tiefe, die sich durch ihre hohen Temperaturen von mehr als 150 °C auszeichnen. Diese Systeme werden Hochenthalpielagerstätten genannt. In der Tat wird heute die weltweite Stromerzeugung aus Geothermie durch die Nutzung von Hochenthalpielagerstätten

dominiert. Eine Ansammlung von Hochenthalpielagerstätten findet sich auch entlang des pazifischen Feuerrings.

Das Fehlen solcher Hochenthalpie-Reservoire schließt aber nicht aus, dass eine Region über ein erhebliches geothermisches Potential verfügen kann. Dieses Potential äußert sich in der Form tiefer Reservoire mit geringer Energie (höchstens 150 °C), sogenannten Niedrigenthalpielagerstätten. Eine ausführliche Kategorisierung geothermischer Reservoire aufgrund ihrer Temperatur wird in Sanyal et al. 1995 präsentiert.

1.4.2 Klassifikation nach der Tiefe

Bei der Einteilung nach der Tiefe unterscheidet man zwischen Oberflächennaher Geothermie und Tiefer Geothermie (Abb. 1.4, 1.5):

Oberflächennahe Geothermie ist der Gegenstand dieses Handbuchs bestehend aus 26 weiteren Kapiteln und der Schlusswürdigung. Oberflächennahe Geothermie ist charakterisiert durch Bohrungen mit einer maximalen Tiefe von 400 m. Dabei lässt sich festhalten, dass aus geologischer Sicht jedes Grundstück für eine Erdwärmenutzung geeignet ist. Jedoch müssen technische (vgl. z. B. Kap. 10 bis 16 dieses Handbuchs für nähere Details), rechtliche (vgl. Kap. 8, 9), wirtschaftliche (vgl. z. B. Kap. 2, 7, 10 sowie Kap. 19 bis 22) und Arbeits- und Gesundheitsschutz gemäße (vgl. Kap. 24) Aspekte beachtet werden.

Oberflächennahe Geothermie vollzieht sich unter den Zwängen einer niedrigen Temperatur. Dies macht in der Regel den Einsatz einer Wärmepumpe unerlässlich, d. h. die Anhebung der geothermisch erzielbaren Temperaturen von häufig wenig mehr als 10^0 C erfolgt über eine Wärmepumpe, die durchweg mit Strom betrieben wird. Wegen der Kostspieligkeit von Strom wird daher im Neubaubereich bereits im Vorfeld auf die Vorteilhaftigkeit der Senkung des Wärmebedarfs, z. B. durch Wärmedämmmaßnahmen geachtet.

Die Nutzung der Erdwärme erfolgt mittels Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Energiepfählen oder Wärmebrunnenanlagen. Ihre Charakterisierung erfolgt in dieser Einführung nur in grob skizzierender Weise (für eine detaillierte Betrachtung sei auf die Kap. 10 bis 16 verwiesen):

- Erdwärmesonden sind in Bohrungen verbrachte Rohre, in denen eine Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert. Als Wärmeträgerflüssigkeit werden verschiedene Fluide zumeist mit Wasser verwendet.
- Erdwärmekollektoren sind aus Rohren bestehende Wärmeüberträger, deren Verlegung horizontal im Erdreich unterhalb der örtlichen Frostgrenze erfolgt.
- Bei Energiepfählen wird in armierten Betonpfählen ein Rohrnetz eingebracht, in denen eine Wärmeträgerflüssigkeit in einem geschlossenen Kreislauf zur Wärmepumpe zirkuliert.

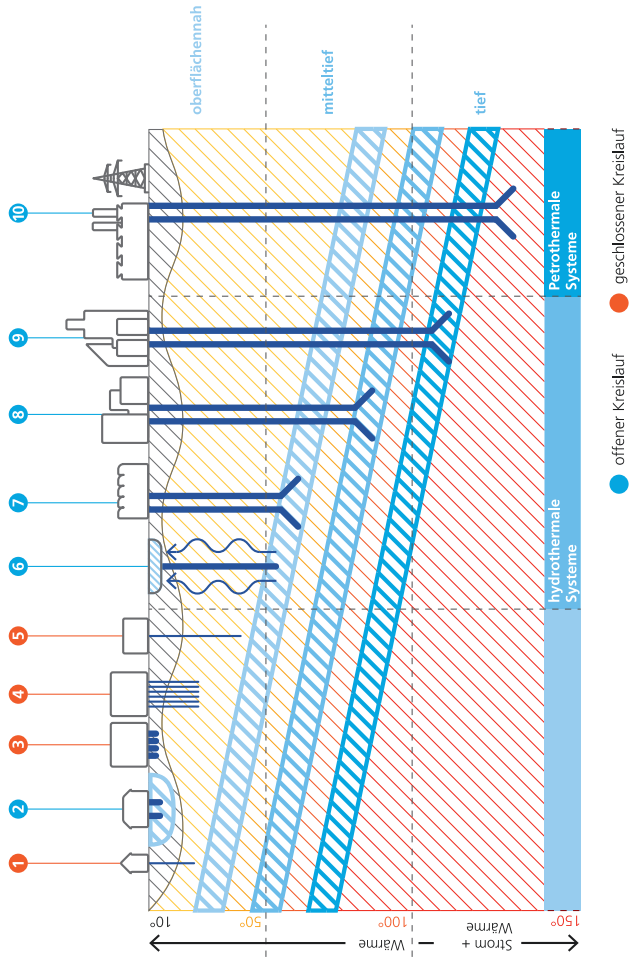


Abb. 1.4 Geothermische Systeme. (Bundesamt für Energie, 2017, Schweiz)

Abb. 1.5 Übersicht über Gebiete, die für eine hydrogeothermische Nutzung möglicherweise geeignet sind. (© LIAG Hannover)

Die gewonnene Energie wird zum Heizen aber auch zum Kühlen von Wohnhäusern und anderen Gebäuden genutzt. Zusammenfassend gilt: Vom geologischen Hintergrund her ist es im Prinzip überall auf der Welt möglich, oberflächennahe Wärmeversorgung zu installieren. Entsprechend groß ist auch die Nachfrage. 2006 wurden in Deutschland ca. 28.000

neue Anlagen installiert, 2007 waren es insgesamt bundesweit ca. 130.000 Anlagen, wobei die Gruppe von erdgekoppelten Wärmepumpen (Haushalte), Bäder/Balneologie und Fernwärme über 80 % der Nutzung ausmachen.

Selbstverständlich ist eine Erdwärmeanlage für jedes Gebäude adäquat zu dimensionieren. Die Dimensionierung hängt von der Wärmeleitfähigkeit und Grundwasserführung des Untergrundes sowie dem benötigten Bedarf an Wärmemenge ab. Oberflächennahe Geothermie, hierbei insbesondere die Nutzungsformen durch Erdwärmesonden hat in den letzten Dekaden signifikant zugenommen. Besondere Bedeutung liegt in der kombinierten Gebäudeheizung und –Kühlung, und weiterhin in der Kombination mit solarthermischen Anlagen. In der Regel arbeiten die Anlagen strombasiert, so dass Effizienz und Wirkungsgrad entscheidende Faktoren darstellen.

Nach Pressemitteilung des Bundesverband Geothermie (BVG) haben die Anpassungen bei der Förderung in Deutschland 2016, d. h. bei geringem Ölpreis Wirkung gezeigt. Es geht aufwärts mit der Oberflächennahen Geothermie, u. z. für die nutzbare Erdwärme ebenso wie in Bezug auf die Marktzahlen. Das zeigen die Förderzahlen des Marktanreizprogramms ebenso wie die Wärmepumpen-Absatzzahlen. Der Anstieg bei der Förderzahl von Erdwärmeheizungen hat auch Auswirkungen auf den Einbau von Wärmepumpen, die in oberflächennahen Geothermieanlagen eingesetzt werden. Ihr Verkauf in 2016 zog um 21,8 % gegenüber dem Vorjahr auf 20.700 Wärmepumpen an. Dies dokumentieren die Wärmepumpen-Absatzzahlen, die vom Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie und dem Bundesverband Wärmepumpe erhoben werden.

Spezifika der Oberflächennahen Geothermie in Österreich, Schweiz und wichtige Aspekte weltweit finden sich in Kap. 25, 26, 27.

Tiefe Geothermie, die spezifisch Gegenstand des 2014 publizierten Springer-Spektrum Handbuchs Bauer et al. (2014a) ist, beginnt per Definition ab einer Tiefe von mehr als 400 m und einer Temperatur von 20 °C. Von Tiefer Geothermie im eigentlichen Sinn wird gewöhnlich aber erst bei Tiefen von über 1000 m und bei Temperaturen über 60 °C gesprochen. Die Übergänge zwischen den einzelnen Systemen sind jedoch fließend und definitorisch nicht näher festgelegt. Im Falle der Tiefen Geothermie, soweit es sich nicht um Sekundärnutzung in Form von vorhandenen Bergbauanlagen, Tunnelsystemen sowie um Tiefensonden handelt, wird eine weitere Unterteilung in *hydrothermale Systeme, petrothermale Systeme* und *tiefe Erdwärmesonden* vorgenommen. Die Erschließung tief liegender Erdwärme ist mit Ausnahme tiefer Erdwärmesonden eine direkte Nutzung, d. h. hier wird in großen Tiefen natürlich vorhandenes Thermalwasser oder künstlich eingebrachtes und in der Tiefe aufgeheiztes Wasser an die Erdoberfläche gepumpt und dient sowohl der Stromerzeugung als auch der direkten Beheizung von Gebäuden (meist ohne Wärmepumpen). Die in der Oberflächennahen Geothermie verbreitete Erdwärmenutzung mit einem Wärmeträgermedium im geschlossenen System ist bei Tiefbohrungen für eine Stromerzeugung, zumindest nach heutigem Kenntnisstand, nicht geeignet.

In einem hydrothermalen System wird ein natürlicher Aquifer (wasserführendes Gebiet) zur Wärmeproduktion genutzt. Dieser Aquifer wird typischerweise als poröses Medium modelliert. Im Gegensatz dazu verfügt ein petrothermales System zwar über

heißes, geklüftetes Gestein, aber das notwendige Wärmeträgermedium muss künstlich eingebracht werden. Da die natürlichen Bruchsysteme in diesen Reservoiren oftmals einen wirtschaftlich rentablen Betrieb nicht erlauben, müssen sie künstlich stimuliert werden. Deshalb werden sie „Hot-Dry-Rock-System“ (HDR) oder *Enhanced Geothermal System* (EGS) genannt. In Deutschland (Abb. 1.5) liegt der Fokus bisher auf hydrothermalen Reservoiren und den heutzutage üblichen Reservoirmodellen, die als Ausgangspunkt zur Durchführung der Explorationsverfahren und der Simulation der auftretenden Prozesse anzusehen sind.

1.5 Explorationsmethoden und -Datensysteme

Zu Beginn eines Geothermievorhabens (siehe Abb. 1.6, Säule 1) steht die Identifizierung und Exploration eines potentiellen Reservoirs. Da erst durch eine Bohrung dessen exakte Ausmaße, Parameter und Beschaffenheit bestimmt werden können, dies aber zu kostspielig ist, sind alternative Erkundungsmethoden unverzichtbar (vgl. Kap. 3 bis 5 für eine Übersicht aus physikalisch-mathematischer Sicht). Die bisher wichtigste, in der Regel zu Beginn eines nahezu jeden tiefen Geothermievorhabens durchgeführte, aber zugleich auch kostspieligste Explorationsmethodik ist die Erkundung auf Basis seismischer Daten in Form von Seismogrammen. Die Daten werden an der Erdoberfläche oder in bereits vorhandenen Bohrlöchern gesammelt. Zur Erstellung eines Untergrundbildes aus den verfügbaren zwei- und dreidimensionalen Datensätzen werden sogenannte Migrations- und Inversionsverfahren eingesetzt. Bei der Migration werden die in den Seismogrammen bzgl. der Zeit aufgezeichneten Amplituden (Wellenfelder) zu ihrer „wahren“ Tiefe verschoben (Abb. 1.7) und damit die Form, die Position und der Reflexionskoeffizient des entsprechenden Reflektors rekonstruiert. Entscheidend für die Qualität und Zuverlässigkeit des

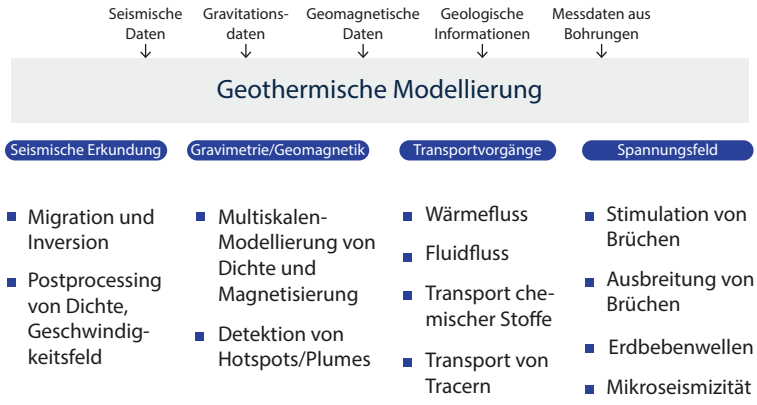


Abb. 1.6 Eingangsparameter bei der geothermischen Exploration

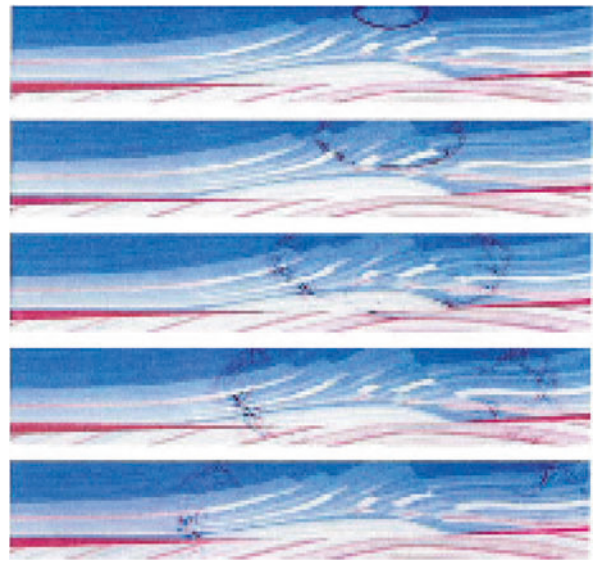


Abb. 1.7 Im Marmousi-Testmodell (vgl. z. B. Versteeg 1994) sich fortpflanzende Welle. (Aus Ilyasov 2011)

Migrationsergebnisses und der anschließenden geologischen Interpretation ist die Genauigkeit des verwendeten (approximativen) Geschwindigkeitsmodells, das durch die Geschwindigkeitsanalyse z. B. mittels Tomographie oder Inversion bestimmt werden kann. Eine iterative Anwendung eines Migrationsverfahrens kann zur Verfeinerung des Geschwindigkeitsmodells eingesetzt werden. Dabei wird ein stetiges Startmodell schrittweise lokal verbessert.

Gravimetrie, d. h. die Erkundung der Dichteverhältnisse im Erdinneren mittels Schwerkraftmessungen z. B. Federwaagen ist von der Komplexität der Messtechnik her eine kostengünstige Explorationsform, die aber zumindest in der deutschen Geothermie weniger häufig als von ihrer geophysikalischen Bedeutung her gesehen Anwendung findet. Mathematisch ist die dreidimensionale Inversion von Gravitationsfelddaten mit nicht zu unterschätzenden Schwierigkeiten (vgl. Kap. 5 für nähere Einzelheiten) verbunden. Diese beruhen auf dem direkten Zusammenhang von Gravitationspotential und Dichteverteilung der Erde (Abb. 1.8) gemäß dem Newtonschen Gravitationsgesetz. Gravimetrie führt ebenso wie Seismik zu einem im mathematischen Sinne schlecht gestellten inversen Problem. Hier besteht die Aufgabe, aus an der Erdoberfläche oder im Außenraum der Erde erhobenen Input-Daten auf geologische Output-Spezifika in der Erde zu schließen. Solche Probleme stellen auch wegen fehlender Eindeutigkeitsaussagen in der Lösungsmethodik und numerischer Instabilitäten bei der approximativen Umsetzung echte geomathematische Herausforderungen (vgl. Kap. 4 für ein neuartigen Lösungsansatz) dar, die selbstverständlich in der Tiefen Geothermie stärker als in der Oberflächennahen Geothermie entscheidende Kriterien für eine Investmentsicherheit sind.

Prinzipiell sind Verfahren wie Gravimetrie, Geomagnetik, Seismik nicht an eine bestimme Tiefe gebunden und daher in der Oberflächennahen wie auch Tiefen Geothermie

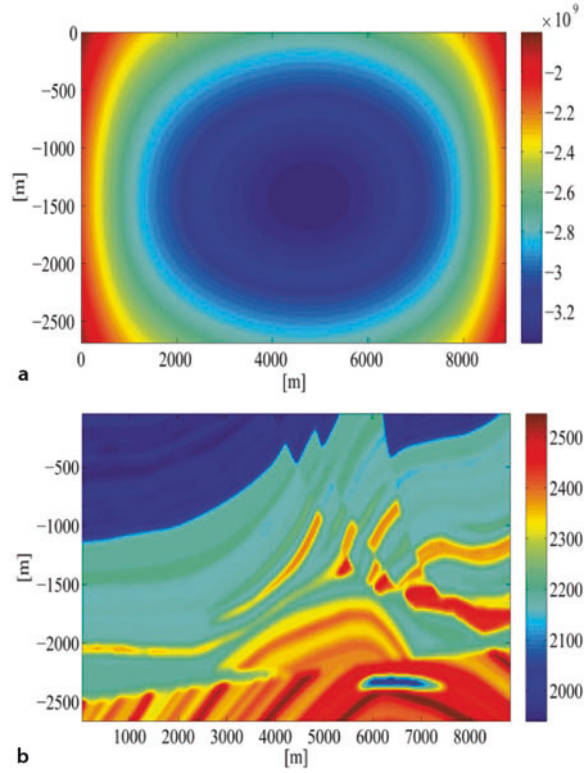


Abb. 1.8 Marmousi-Gravitationspotential (**a**) und Dichteverteilung (**b**). (Nach Blick et al. 2017)

einsetzbar, auch wenn ein Unterschied von mehreren tausend Metern sich als beträchtlich hinsichtlich der Beobachtungs- und Auswertungsqualität erweist. Generell spielt in der bisherigen Explorationspraxis Reflexionsseismik bei zunehmender Tiefe eine ausgeprägte Rolle. Wie bereits betont kamen die weniger aufwendigen und kostengünstigen Methoden der Gravimetrie und Geomagnetik bisher in der Tiefen Geothermie in Deutschland nur sporadisch zum Einsatz, meist nur zur Unterstützung seismischer Auswertung. Hochgenauere Gravimetermessungen lassen jedoch in Verbindung mit neuartigen potentialtheoretischen Ansätzen Gravimetrie zukünftig als eine angemessene Alternative auch in der Tiefen Geothermie erscheinen. Die Vorteilhaftigkeit der Exploration in der Oberflächennahen Geothermie liegt darin begründet, dass neben Gravimetrie und Geomagnetik auch eine wesentlich höhere Anzahl anderer Verfahren wie etwas Geoelektrik, Radar, Radiometrie erfolgversprechend einsetzbar sind (vgl. die Ausführungen in Kap. 4 dieses Handbuchs).

Die grundlegenden Prozesse, die sowohl in hydrothermalen als auch petrothermalen Reservoiren von Interesse sind, sind Wärme-, Fluid-, Stoff- und Tracertransport (siehe 3. Spalte in Abb. 1.6). Im Gegensatz zu den ersten beiden Vorgängen stellt sich bei den letzten beiden die Frage, wieso sie wichtig sind. Während der Zirkulation des Wärmeträgermediums können Stoffe aus dem Untergrund im Fluid gelöst werden oder auch aus

dem Fluid ausfallen. Dies kann zu einer Reduzierung der Permeabilität des Mediums führen und beeinflusst somit den Fluidfluss – insbesondere in geklüfteten Medien. Mithilfe der Injektion eines Tracers (Markierstoff) in ein Reservoir, den Daten aus Messungen an der Extraktionsbohrung und dem Abgleich der Messdaten mit den Ergebnissen aus Strömungssimulationen werden Fließwege und -geschwindigkeiten untersucht. Im Falle eines petrothermalen Systems ist man aufgrund des vorhandenen Bruchnetzwerks zusätzlich zu den bisher genannten mit folgenden Anforderungen konfrontiert: Explizite Darstellung der Brüche, Änderung des Bruchwinkels bzw. der Bruchausrichtung durch Spannung und Scherung, thermoelastische Effekte, Bestimmung der Beziehung zwischen Bruchausrichtung und Bruchleitfähigkeit, Fluidfluss innerhalb der Brüche, Kopplung von Reservoirmodellen mit Bohrlochmodellen. Diese Aufzählung stellt eindeutig die wechselseitige Beziehung der Simulation der Transportprozesse (3. Spalte in Abb. 1.6) und des Spannungsfeldes (siehe 4. Spalte in Abb. 1.6) heraus.

In den letzten Jahren haben kleinere Erdstöße im Umfeld von Geothermieanlagen immer wieder für Diskussionen gesorgt – z. B. in Basel (Dezember 2006 und Januar 2007) und in Landau (August 2009). Dies zeigt, dass neben der Simulation der Transportprozesse auch die Simulation des Spannungsfeldes während der Explorations-, Bau- und Betriebsphase von immenser Bedeutung ist (siehe 4. Spalte in Abb. 1.6). Die Wechselbeziehung zum Bereich der Transportprozesse ist dadurch gegeben, dass sich die spezifischen Parameter eines Reservoirs durch Injektion eines kalten Wärmeträgermediums verändern. Das Vorgehen in einem tiefen geothermischen Reservoir besteht darin, ein Wärmeträgermedium unter Druck in den Untergrund zu pumpen. Dies führt zu Spannungen im porösen oder geklüfteten Gestein, deren Wechselwirkungen mit dem Druck des Wärmeträgermediums modelliert werden müssen. Dieser Effekt wird Poroelastizität genannt. Es ist das grundlegende Phänomen im Bereich des Spannungsfeldes in einem geothermischen System. Aufgrund poroelastischer Prozesse verändern sich unter anderem die Permeabilität und die Porosität des Reservoirs. Das geschieht insbesondere im Falle von petrothermalen Systemen, da die bereits vorhandenen Brüche geschlossen werden oder wachsen können. Das Wachstum vollzieht sich entlang der Richtung der maximalen Hauptspannung. Dabei ist der Weg, den der Bruch nimmt, durch die Spannung an der Bruchspitze bestimmt. Außer den bisher genannten Einflüssen führen poroelastische Prozesse zu Veränderungen im Geschwindigkeitsregime seismischer Wellen, zu Mikroseismizität, zur Reaktivierung von Verwerfungen und Bruchlinien, zur Störung der Bohrlochstabilität und zu Veränderungen der Fließwege des Wärmeträgermediums. Neben der Poroelastizität besteht die zweite bedeutende Ursache für Gesteinsverschiebungen in thermoelastischen Prozessen. Sie treten wegen der Temperaturdifferenz zwischen dem kalten injizierten Wärmeträgermedium und dem warmen porösen oder geklüfteten Medium auf. Als Folge zieht sich das Gestein zusammen – so wirkt dieser Effekt der Ausdehnung durch poroelastische Prozesse entgegen. Zu beachten ist, dass die thermoelastischen Effekte auch nach Beenden der Injektion noch auftreten können. Da das Langzeitverhalten eines geothermischen Reservoirs von besonderem Interesse ist, kann der Einfluss der Thermoelastizität nicht außer Acht gelassen werden.

1.6 Modellierung von Reservoirmodellen

Zur Modellierung von geklüfteten Systemen (petrothermalen Reservoiren) kann man entweder Kontinuumsansätze oder diskrete Ansätze verwenden (Abb. 1.9). Die Kontinuumsansätze gliedern sich in die *Effective Continuum Method* (ECM), die *Dual-Continuum-* (DC) bzw. *Multiple-Interacting-Continua-* (MINC) Methoden und die *Stochastic-Continuum*-Methoden (SC). Bei der Verwendung von ECM wird das geklüftete Medium durch ein äquivalentes poröses Medium dargestellt, wobei die Bestimmung der benötigten effektiven Kontinuumsparameter schwierig ist. Eine Erweiterung dieses Konzepts stellen DC und MINC dar, wobei eine Einteilung des Reservoirs in zwei oder mehr Kontinua erfolgt. Neben der Bestimmung der Kontinuumsparameter ist die richtige Kopplung der einzelnen Teilgebiete von immenser Bedeutung. Im Gegensatz zu ECM werden bei Anwendung von SC die nötigen Parameter nicht als deterministische sondern als stochastische Variablen modelliert. Konzepte zur Bestimmung der Kontinuumsparameter für die genannten Verfahren stellen die diskreten Reservoirmodelle in Form von *Single-Fracture-Methoden* (SF), *Discrete-Fracture-Network*-Methoden (DFN) und *Fracture-Matrix*-Methoden (FM) dar. Somit sind sie nicht nur zur Simulation der auftretenden Prozesse einsetzbar. Falls der Fluss im petrothermalen Reservoir hauptsächlich in einigen wenigen dominanten Brüchen stattfindet, ist das Verhalten innerhalb dieser bestimmten Brüche äußerst wichtig. Zur Modellierung wird SF eingesetzt, das ursprünglich auf dem Konzept paralleler Platten basiert. Wegen der meist sehr rauen Bruchoberfläche reicht diese vereinfachte Betrachtung nicht aus. Unter den Verfahren zur Modellierung petrothermaler Systeme gehören die DFN zu den präzisesten – sie sind aber

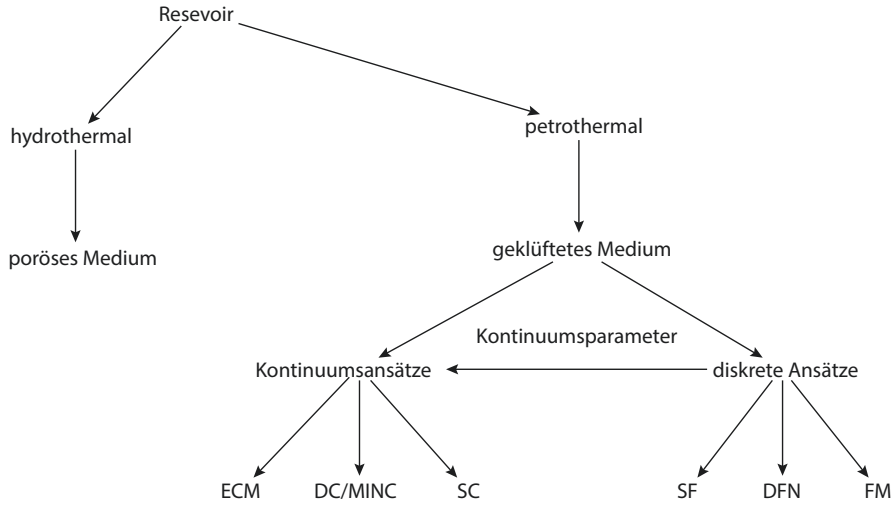


Abb. 1.9 Schema heutzutage verwendeter geothermischer Reservoirmodelle. (Nach Augustin et al. 2015)

sehr schwierig zu implementieren. Dabei stellt die Charakterisierung des Bruchnetzwerkes eine immense Herausforderung dar. Realistische – aber auch sehr komplexe – Methoden sind die FM. Sie ermöglichen es, die Interaktion zwischen den Brüchen und der umgebenden Gesteinsmatrix abzubilden, wenn die reale (vor Ort vorzufindende) Bruchmatrixkonfiguration beispielsweise durch Messungen aus Bohrungen oder durch Resultate der Exploration bekannt ist. Weitere Informationen und Literaturhinweise sind z. B. in Freeden und Nutz 2014, 2015 zu finden.

1.7 Nutzung der Erdwärme

Bei der Nutzung der Geothermie (vgl. z. B. Fritsche et al. 2010; Huenges 2010) unterscheidet man zwischen direkter Nutzung, also der Nutzung der Wärme selbst, und indirekter Nutzung, der Nutzung nach Umwandlung in Strom in einem Kraftwerk. Zur Optimierung der Wirkungsgrade sind auch Kraft-Wärme-Kopplungen (KWK) möglich.

Bei der *hydrothermalen Stromerzeugung* sind Wassertemperaturen von deutlich mehr als 80 °C notwendig. Hydrothermale Heiß- und Trockendampfvorkommen mit Temperaturen über 150 °C können direkt zum Antrieb einer Turbine genutzt werden. Stromgewinnung aus Tiefer Geothermie ist grundlastfähig und steuerbar. In Süddeutschland sind zahlreiche Projekte zur Stromerzeugung aus hydrothermalen Systemen im Gange bzw. im Entstehen. Diese tiefen Grundwasserleiter (Aquifere, Wasserreservoirs) sind hauptsächlich im süddeutschen Molassebecken, im Oberrheingraben, aber auch im Norddeutschen Becken (vgl. Abb. 1.6) zu finden.

Um *Nutzung aus petrothermaler Wärme* zu gewährleisten, müssen bestimmte geologische Formationen von einem Wärmeträger (Wasser) durchflossen werden, der dem Gestein die Energie entzieht und anschließend an die Oberfläche befördert. Das durch die heißen Gesteine erhitzte Wasser kann zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen sowie zur Erzeugung von Strom genutzt werden.

Bei der *Nutzung von oberflächennaher Erdwärme* wird dem Untergrund Wärme entzogen, die aus der natürlichen Wärmeproduktion des Erdinneren stammt. Dies geschieht über die Prozesse der Konvektion (Wärmetransport über das fließende Grundwasser) und Konduktion (Wärmetransport vom Wärmeren zum Kälteren in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins). Beim Kühlen wird Überschusswärme aus dem Haus über Decken- oder Fußbodenheizung ins Erdreich abgeführt und im Untergrund eingespeichert.

Bei den geothermischen Nutzungen unterscheiden wir *offene Systeme* (Brunnenanlagen) und *geschlossene Systeme* (Erdreichkollektoren und Erdwärmesonden).

Offene Systeme nutzen die thermische Energie des Grundwassers, das über einen Förderbrunnen gehoben und zur Wärmepumpe geleitet wird. Dort wird dem Wasser Wärme entzogen und anschließend wird das kühlere Wasser über einen Injektionsbrunnen wieder in den Untergrund eingeleitet. Eine *Wärmepumpe* (vgl. Ochsner 2005) kann natürlich nicht nur zum Heizen, sondern auch zur Warmwasserbereitung und sogar zur Kühlung

verwendet werden. Entsprechend ihrer Funktionsweise entzieht die Wärmepumpe der Umwelt – also z. B. dem Erdboden – die Wärme und gibt sie an das Heizsystem ab.

Bei den geschlossenen Systemen zirkuliert ein Fluid in horizontal oder vertikal verlegten Rohrleitungen und die Wärmepumpe entzieht diesem Transportmedium die Wärme. Mit *Erdwärmesonden* kann ohne wesentliche Zusatzinvestitionen auch besonders effizient gekühlt werden. Die Nutzung von Erdwärme zum Heizen und zur Brauchwasserbereitung ist eine in Europa seit Jahren etablierte Technologie. Dabei wird das natürliche Temperaturniveau des Untergrundes genutzt, um mithilfe einer Wärmepumpe auf das Niveau des Heizsystems angehoben zu werden. Zum Antrieb der Wärmepumpe wird allerdings elektrischer Strom benötigt, der gewöhnlich nur einen Bruchteil der erzeugten Wärmeenergie ausmacht. Erdwärmesonden gehören zu den geschlossenen Systemen und werden über Bohrungen senkrecht in den Untergrund gebracht. In den Sonden zirkuliert ein Wasser-Sole-Gemisch, das dem Boden Wärme entzieht. Die Tiefe der Bohrungen hängt entscheidend von den vorliegenden Gesteinseigenschaften und dem Grundwasserfluss ab.

1.8 Vorteile und Nachteile der Geothermie

Die Diskussion von Vor – und Nachteilen der Geothermie ist Gegenstand mannigfacher Studien.

Einer der wichtigsten *Vorteile* der Geothermie gegenüber allen anderen Erneuerbaren Energien ist, dass die Ressource ohne Speicherung ununterbrochen, d. h. unabhängig von der Tages- und Jahreszeit, von klimatischen und wetterbeeinflussten Bedingungen, immer zuverlässig zur Verfügung steht und nach Bedarf und nicht nach Angebot geliefert werden kann (vgl. Abb. 1.10).

Wie bereits erwähnt, steht nicht zu befürchten, dass diese Energiequelle versiegen wird. Die geothermische Energie ist CO_2-frei, es resultiert keine Verknappung für nachfolgende Generationen und sie ist platzsparend.

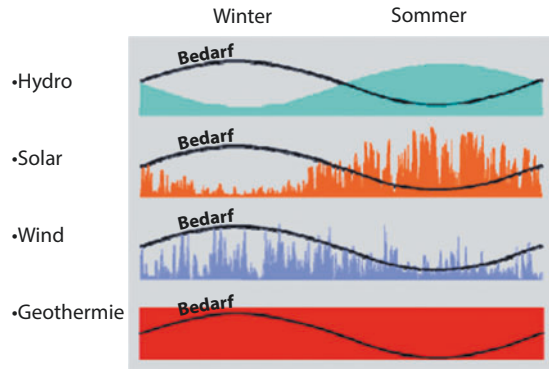


Abb. 1.10 Geothermie als Lieferant für konstantes Energieaufkommen

Die Erdwärme (Geothermie) weist im Gegensatz zu den meisten anderen regenativen Energien einen entscheidenden Vorteil auf: Sie ist grundlastfähig, d. h. Erdwärme steht rund um die Uhr, wetterunabhängig und im gesamten Erdkörper zur Verfügung.

Zusätzlich ist die Energie heimisch, lange Transportwege entfallen, sie ist keinem grenzüberschreitenden Handel unterworfen und kann losgelöst von politischen Krisen immer geliefert werden. Jedoch ist der Bau entsprechender Kraftwerke mit einem erheblichen finanziellen Aufwand und zugleich mit entsprechendem Flächenbedarf verbunden. Dafür sind bei der Erdwärme die technischen Probleme der Nutzbarmachung nur in geringerem Ausmaß vorhanden. Außerdem lohnt sich die Stromerzeugung in der Regel nur in solchen Regionen, in denen geothermische Anomalien, wie bereits oben angesprochen, vorkommen. Es ist vorteilhaft, wenn bereits in geringer Tiefe hohe Temperaturen herrschen, weil bei tieferen Lagen oftmals die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung eingeschränkt ist. Tiefe Geothermie bedeutet dabei eine gesicherte und stabile Grundversorgung an Strom und Wärme.

Der genannten Vielzahl an Vorteilen stehen auch *Nachteile* gegenüber. Gegenwärtig ist als kritisches Moment zumindest in der Tiefen Geothermie weltweit das Fündigkeitsrisiko zu nennen. Mit den gängigen geophysikalischen Explorationsmethoden kann die geologische Struktur im Erdinnern von der Oberfläche aus nur unzureichend bestimmt werden. Es müssen daher adäquatere Verfahren entwickelt werden und in Kombination Auswertung erfahren.

Hinsichtlich der hydraulischen Stimulation ist es verstärkt erforderlich, die Bruchprozesse zu analysieren und geeignete Berechnungsmethoden und Modelle zu entwickeln. Risikoanalysen helfen, ein umfassendes Bild möglicher Gefahren und Potentiale zu entwerfen. Numerische Simulationen sind ein unabdingbares Hilfsmittel derartiger Analysen.

Das Risiko, bei den kostenaufwendigen Bohrungen nicht fündig zu werden, schreckt noch immer viele Investoren und Banken ab und erweist sich als ein hohes Hindernis für die Finanzierung von Projekten der Tiefen Geothermie. Eine angemessene Risikoverteilung zwischen Finanzpartnern, Anbietern von Versicherungskonzepten und Technologieanbietern könnte hier Abhilfe schaffen.

Oberflächennahe Geothermieprojekte dienen insbesondere der lokalen Versorgung mit Wärme und Kälte. Einsatzmöglichkeiten sind die direkte Nutzung von Raumwärme, Warmwasser oder Kühlung. In der öffentlichen Wahrnehmung sind die Oberflächennahen Geothermieprojekte kaum präsent, obwohl ihnen bezogen auf die Energiewende eine nicht zu unterschätzende Rolle zukommt. Bei Wärmepumpensystemen ist der Energiebedarf für den Antrieb zu berücksichtigen. Wird die Wärmepumpe über rein regenerativ erzeugten Strom betrieben, ist auch Oberflächennahe Geothermie klimaneutral nutzbar. Für die Oberflächennahe Geothermie inkl. Wärmepumpen-Absatzzahlen gibt es einen Aufwärtstrend, u. z. für die nutzbare Erdwärme ebenso wie in Bezug auf die Marktzahlen. Allerdings sind dafür Marktanreizprogramme nötig, die sich besonders in Zeiten eines geringen Ölpreises als tragfähig erweisen.

1.9 Fazit

Unsere Ausführungen führen zu folgenden Kernaussagen (vgl. auch Wefer 2010) über die heutige Geothermie:

- Die Geowissenschaften haben sich in den vergangenen Dekaden ähnlich stark gewandelt wie die Biowissenschaften. Moderne Geowissenschaften sind ihrem Wesen nach Naturwissenschaften. Die Grenzen zwischen den einzelnen Teildisziplinen der Geowissenschaften, insbesondere zur Geothermie, verlieren immer mehr an Bedeutung. Die Mathematisierung aller Wissenschaften nimmt stetig zu. Mathematik wird zur Schlüsseltechnologie, auch im Bereich der Fündigkeitsrisikoreduzierung in der Geothermie.
- Als wichtig und notwendig erachtet werden die nachhaltige Weiterentwicklung und Förderung erkenntnisorientierter Forschung der Geothermie unter den heutigen veränderten Wissenschaftsprinzipien
- Als wichtig und notwendig erachtet werden gezielt eingesetzte Anreizprogramme unter Beachtung der wesentlichen Marktindikatoren und funktionalen Marktstrukturen.
- Geothermie ist mehr noch als Solar- oder Windenergie der stabilste und kalkulierbarste Erneuerbare Energieträger. Erdwärme ist eine ständig verfügbare, heimische, krisensichere und umweltfreundliche Energiequelle, deren wirtschaftliche Nutzbarkeit jedoch von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten abhängt.
- Die großen Zukunftsaussichten der Geothermie werden auch innerhalb der Geowissenschaften bisher nicht ausreichend kommuniziert. In Wirtschaft, Politik und Öffentlichkeit wird die besondere Bedeutung der Geothermie für die Gesellschaft zu wenig wahrgenommen.
- Was die soziopolitische Akzeptanz insbesondere in Deutschland angeht, so ist es für die zukünftige Entwicklung der Geothermie dringend geboten, in erforderlicher Sachlichkeit und angemessenem Zusammenspiel von externem wie auch internem Interessenmanagement Hemmnisse und Behinderungen eines Geothermieprojektes abzubauen und eine Situation vergleichbar wie in einigen Ländern des europäischen Auslands, etwa in Frankreich zu schaffen.

1.10 Ausblick

Zwar sind die deutschen Kohlelagerstätten keineswegs erschöpft, aber von Cotta‘s Schlussfolgerung aus dem Jahre 1858 ist nach mehr als 159 Jahren aktueller denn je: Die angestrebte Energiewende kann nur mit einem robusten Anteil an Geothermie am zukünftigen Energiemix gelingen.

Insbesondere die dauerhafte Verfügbarkeit verschafft der Energiegewinnung durch Erdwärme einen vorderen Platz in der Branche der regenerativen Energien. Dafür spricht

zudem die Möglichkeit optimaler Energieausnutzung bei der Geothermie. Das wird durch die Kraft-Wärme-Kopplung erreicht, bei der die Abwärme der Stromerzeugung zusätzlich zur Beheizung von privaten Haushalten oder anderen Gebäuden verwendet wird.

Grundsätzlich kann die oberflächennahe Geothermie fast überall eingesetzt werden. Tiefe Geothermie für die großformatige Wärmenutzung in Fernwärmesystemen ist ebenfalls an vielen Orten in Deutschland nutzbar. Die Stromerzeugung wird zurzeit in Deutschland nur an hydrothermalen Standorten umgesetzt. Durch die weitere Entwicklung und Erforschung der EGS-Technologie wird zukünftig auch an petrothermalen Standorten in Deutschland die Gewinnung von Strom und Wärme möglich.

Energie aus Oberflächennaher Geothermie ist grundsätzlich geeignet, einen wesentlichen Beitrag zur angestrebten Energiewende zu leisten. Es gibt ein großes Potential für den weiteren Ausbau. Geothermiebranche und Politik sind allerdings auch in der Oberflächen Geothermie gefordert, in der Öffentlichkeit ein nachhaltiges Bewusstsein für innovative Technologien und den Vorteil und Nutzen oberflächennaher Erdwärme zu schaffen.

Literatur

Ahrens, T. J.: Global Earth Physics – A Handbook of Physical Constants. Am. Geophys. Union, Washington (1995)

Armstead, H. C. H.: Geothermal Energy. E. & F. N. Spon, London (1983)

Armstead, H. C. H., Tester, J.W.: Heat Mining. E. & F. N. Spon, London (1987)

Augustin, M., Blick, C., Eberle, S., Freeden, W., Gerhards, C., Ilyasov, M., Kahnt, R., Klug, M., Möhringer, S., Neu, T., Nutz, H., Michel née Ostermann, I., Punzi, A.: Modeling deep geothermal reservoirs: Recent advances and future perspectives. In: Freeden, W., Sonar, T., Nashed, M. Z. (Hrsg.) Handbook of Geomathematics, 2. Aufl., S. 1547–1629. Springer, Heidelberg (2015)

Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.): Handbuch Tiefe Geothermie. Springer, Heidelberg (2014a)

Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T.: Energiewirtschaft 2014 (Fakten und Chancen der Tiefen Geothermie). Springer Spektrum, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden (2014b)

Blick, C., Freeden, W., Nutz, H.: Feature extraction of geological signatures by multiscale gravimetry. Int J. Geomath. **8**, 57-83 (2017)

Clauser, C.: Geothermal energy. In: Heinloth K. (Hrsg.) Landolt-Börnstein, Physikalische Tabellen, Group VIII: Advanced Materials and Technologies. Bd 3. Energy Technologies, Subvol. C. Renewable Energies. Springer, Heidelberg (2006)

Freeden, W.: Geomathematics. Its role, its aim, and its potential. In: Freeden, W., Nashed, M. Z., Sonar, T. (Hrsg.) Handbook of Geomathematics, Bd. 1, S. 3–78. Springer, New York (2015)

Freeden, W., Nutz, H. Mathematische Methoden. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, S. 125–221. Springer, Berlin (2014)

Freeden, W., Nutz, H.: Mathematik als Schlüsseltechnologie zum Verständnis des Systems „Tiefe Geothermie“. Jahresbericht der Deutschen Mathematikervereinigung (DMV), **117**, 45–84 (2015)

Freeden, W., Nashed, M. Z., Sonar, T. (Hrsg.): Handbook of Geomathematics, Bd. 1–3, 2. Aufl. Springer, New York (2015)

Fritsche, J.-G., Kracht, M., Knevels, J., Pursche, T.: Nutzung tiefer Geothermie in Hessen, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden (2010)

Huenges, E. (Hrsg.): Geothermal Energy Systems: Exploration, Development, and Utilization, 486. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Berlin (2010)

Ilyasov, M.: A tree algorithm for Helmholtz potential wavelets on non-smooth surfaces: Theoretical background and application to seismic data postprocessing. Ph.D. thesis, TU Kaiserslautern, Geomathematics Group (2011)

Knapek, E.: Die unerschöpfliche Energiequelle unter unseren Füßen, Geothermische Energie, **84**, 2–3 (2016)

Ochsner, K.: Wärmepumpen in der Heizungstechnik. Praxishandbuch für Installateure und Planer, 3. neubearbeite Auflage, S. 211. C.F. Müller Verlag, Heidelberg (2005)

Pollack, H. N., Hurter, S. J., Johnson J. R.: Heat flow from earth's interior: Analysis of the global data set. Rev Geophys. **31**, 267–280 (1993)

Sanyal, S. K., Butler, S. J., Swenson, D., Hardeman, B.: Review of the state-of-the-art of numerical simulation of enhanced geothermal systems. In: Proceedings, World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan (2000)

Stober, I.: Thermisches Regime der Erde. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, Springer Spektrum, Berlin (2014)

Stober, I., Bucher, K.: Geothermie, 2. Aufl. Springer Spektrum, Berlin (2014)

Versteeg, R: The Marmousi Experience: Velocity model determination on a synthetic complex dataset. Lead. Edge. **13**, 927–936 (1994)

von Cotta, C. B.: Deutschlands Boden, sein geologischer Bau und dessen Einwirken auf das Leben des Menschen, Bd. 1–2, Brockhaus, Leipzig (1858)

Wefer, G.: Dynamische Erde. Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften, Strategieschrift, Geokommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek (2010)

Bedeutung der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien

2

Björn-Martin Kurzrock und Tillman Gauer

Inhaltsverzeichnis

2.1 Immobilienbestand in Deutschland 24
2.1.1 Gebäudearten und -kategorien 25
2.1.2 Gebäudetypologien 27
2.1.3 Energieeffizienz von Gebäuden 27
2.2 Energetische Anforderungen, Vorgaben und Anreize 31
2.2.1 Anforderungen und Vorgaben auf Bundes- und Länderebene 31
2.2.2 Förderprogramme auf Bundesebene 31
2.2.3 Ergänzende Instrumente von Bundesländern und Kommunen 32
2.3 Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren 34
2.3.1 Wärmebedarf 34
2.3.2 Wärmerzeugung 35
2.3.3 Wärmeverteilung/Wärmeübertragung 37
2.3.4 Wärmespeicher 38
2.3.5 Vom Gebäude zum Quartier 39
2.3.6 Zwischenfazit: Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren . 51
2.4 Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien 52
2.4.1 Stärken 52
2.4.2 Schwächen 54
2.4.3 Chancen 55
2.4.4 Risiken 58
2.4.5 Zwischenfazit: Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien . . . 60
2.5 Zusammenfassung und Ausblick 62
Literatur 63

Björn-Martin Kurzrock (✉) · Tillman Gauer
Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Immobilienökonomie, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern, Deutschland
e-mail: bjoern.kurzrock@bauing.uni-kl.de; tillman.gauer@bauing.uni-kl.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_2

Zusammenfassung

Oberflächennahe Geothermie bietet interessante Potenziale zur Wärmeversorgung von Immobilien mit Erneuerbarer Energie und kann einen wichtigen Beitrag zur Energiewende in Deutschland leisten. Die Potenziale und technischen Möglichkeiten, insbesondere beim Einsatz in Wohngebäuden und Wohnquartieren, werden in diesem Beitrag beleuchtet. Zunächst wird der Immobilienbestand in Deutschland hinsichtlich Gebäudearten, -kategorien, Gebäudetypologien und energetischen Merkmalen dargestellt. Danach folgt die Beschreibung energetischer Anforderungen, Vorgaben und Anreize sowie der Maßnahmenbereiche zur Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren. Anhand eines Fallbeispiels werden mehrere Energieversorgungskonzepte für ein konkretes Wohnquartier mit Vor- und Nachteilen dargestellt. Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken beim Einsatz Oberflächennaher Geothermie für Immobilien werden ausführlich dargestellt und entsprechende Strategien abgeleitet.

Schlüsselwörter

Oberflächennahe Geothermie · Immobilien · Wohngebäude · Wohnquartiere · Wärmeversorgung

2.1 Immobilienbestand in Deutschland

Über Jahrhunderte ist in Deutschland ein Immobilienbestand mit bemerkenswert großer Vielfalt in Architektur, Konstruktion und Materialien entstanden. In Deutschland existieren ca. 19,9 Mio. Gebäude (BDI 2014).

Gebäudebezogener Endenergieverbrauch

Der gebäudebezogene Endenergieverbrauch für Heizen und Kühlen beträgt in Deutschland ca. 1195 TWh pro Jahr (2015), dies entspricht rd. 50 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland (BMWi 2016a). 92,8 % hiervon entfallen auf die Wärmeversorgung, davon wiederum rd. 2/3 auf die 18,2 Mio. Wohngebäude. Der Anteil der Wohngebäude am gesamten gebäudebezogenen Endenergieverbrauch liegt bei ca. 65 %. Der Endenergieverbrauch im Gebäudebestand beträgt im Mittel 169 kWh/m^{2}a (2013). Neubauten, die nach 2009 errichtet wurden, kommen durchschnittlich mit einem Endenergieverbrauch von $<$50 kWh/m^{2}a aus (BMWi 2014). Für Bürogebäude gilt im Bestand ein Referenzwert zur Wärmeversorgung von 110 bzw. 135 kWh/m^{2}a (BMWi & BMUB 2015; weitere Vergleichswerte in BMVBS 2009).

Energiewende

Die Optimierung des gebäudebezogenen Energieverbrauchs ist ein wichtiger Baustein der Energiewende in Deutschland. Wesentlich hierbei ist die energetische Modernisierung von Bestandsgebäuden. In Deutschland wurden zwischen 2010 und 2015 jährlich zwischen 140.000 und 220.000 Wohneinheiten (WE) neu errichtet, bei einem Bestand von ca. 41 Mio. WE (Statistisches Bundesamt 2016, Tab. 2.1).

Tab. 2.1 Wohnungsbestand in Deutschland. (Nach Statistisches Bundesamt 2016)

	Einheit	2011*	2012*	2013*	2014	2015
WE (Wohn- und Nichtwohngebäude)	1000	40.630	40.806	40.995	41.221	41.446
Wohnfläche insgesamt	Mio. m^2	3700	3721	3744	3769	3795
Strukturdaten zum Wohnungsbestand						
WE je 1000 Einwohner	Anzahl	506	507	508	508	504
Wohnfläche je WE	m^2	91,1	91,2	91,3	91,4	91,6
Wohnfläche je Einwohner	m^2	46,1	46,2	46,3	46,5	46,2

* Fortschreibung basierend auf den endgültigen Ergebnissen der Gebäude- und Wohnungszählung 2011, einschließlich Wohnheime

2.1.1 Gebäudearten und -kategorien

Gebäude werden gemäß Kap. 1 der *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden* (Energieeinsparverordnung, EnEV) in Deutschland in Wohngebäude und Nichtwohngebäude unterschieden. Die EnEV gilt, bis auf bestimmte Ausnahmen, für alle Gebäude, soweit sie unter Einsatz von Energie beheizt oder gekühlt werden.

Gebäudebestand

Der Gebäudebestand in Deutschland umfasst 18,2 Mio. Wohngebäude (91,5 %) und 1,7 Mio. Nichtwohngebäude (8,5 %) (BDI 2014). Die öffentliche Hand ist hierzulande Eigentümerin von ca. 12 % aller Liegenschaften. Ein großer Anteil hiervon entfällt auf Nichtwohngebäude mit hohem absoluten Energieverbrauch und beträchtlichen Einsparpotenzialen. Daher gilt es, die in der EU-Energieeffizienzrichtlinie geforderte Sanierungsquote von 3 % pro Jahr gerade auf öffentliche Liegenschaften anzuwenden. Bund, Länder und Kommunen haben dies in Regierungserklärungen und Klimaschutzkonzepten einhellig zum Ziel erklärt. In einem Leitfaden des BMUB und dem *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen* (BNB) sind Kriterien für Nachhaltiges Bauen definiert (BMUB 2016).

Wohngebäude

Wohngebäude sind solche Immobilien, „die nach ihrer Zweckbestimmung überwiegend dem Wohnen dienen, einschließlich Wohn-, Alten- und Pflegeheimen sowie ähnlichen Einrichtungen." (EnEV, Kap. 1). Mehrfamilienhäuser repräsentieren mit ca. 3 Mio. Gebäuden zwar nur 18 % des deutschen Gebäudebestands, allerdings 41 % der Wohnfläche und 54 % der WE. Mit einem Anteil von über 92 % dominieren auch bei Mehrfamilienhäusern kleinere Gebäude mit drei bis vier Vollgeschossen und maximal 12 WE (IWU 2015, S. 19).

Die meisten der rd. 41 Mio. WE in Deutschland sind im Eigentum von Privatpersonen (32,3 Mio. WE, 80 %). Zweitgrößter Bestandshalter sind öffentliche und nicht-öffentliche

Unternehmen (5,8 Mio. WE, 14 %) bzw. Genossenschaften (2,2 Mio. WE, 5 %) und sonstige Organisationen (0,3 Mio. WE, 1 %).

Tab. 2.1 fasst den **Wohnungsbestand** in Deutschland basierend auf Fortschreibungen der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 zusammen. Wohnungsanzahl und Wohnfläche sind, absolut und bezogen auf die Einwohnerzahl, in Deutschland seit einigen Jahren kontinuierlich angestiegen.

Die **Wärmeversorgung** erfolgt derzeit in Deutschland bei rd. 50 % aller WE durch Gasheizungen. Der Anteil an Wärmepumpen liegt bisher bei unter 3 %. Über 80 % der WE werden mit Gas, Heizöl oder Fernwärme versorgt. (2014, Abb. 2.1).

Nichtwohngebäude

Zu Nichtwohngebäuden zählen Anstaltsgebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude, landwirtschaftliche und nichtlandwirtschaftliche Betriebsgebäude sowie sonstige Nichtwohngebäude wie Universitäts- und Hochschulgebäude, Gebäude von Sportanlagen, Theater, Kirchen und Kulturhallen. Wird mindestens die Hälfte der Gesamtnutzfläche für Wohnzwecke genutzt, so gilt ein Gebäude als Wohngebäude. Bzgl. der rd. 1,7 Mio. Nichtwohngebäude in Deutschland gibt es immer noch deutliche Informationslücken hinsichtlich

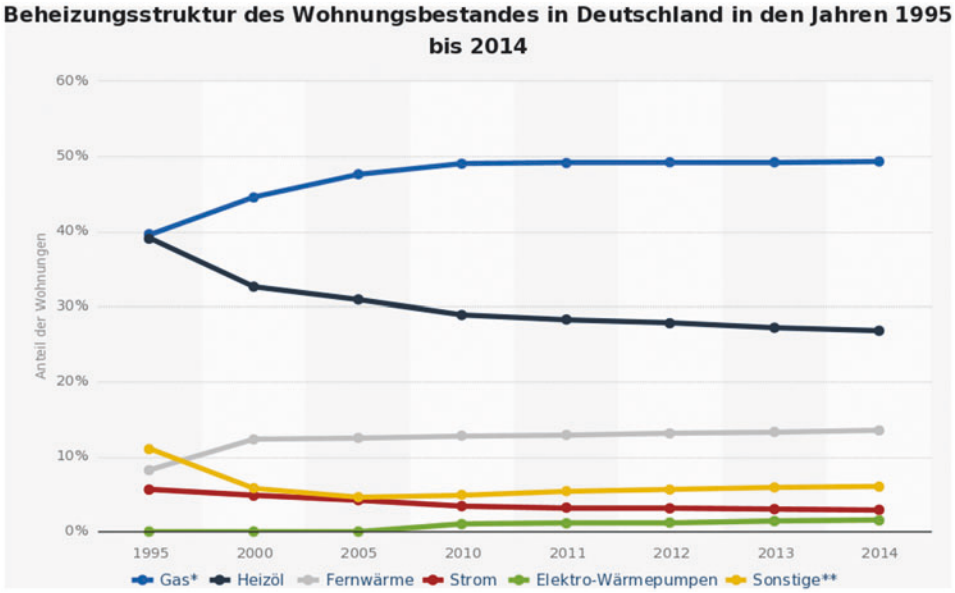


Abb. 2.1 Wärmeversorgung des Wohnungsbestands in Deutschland;* inkl. Bioerdgas und Flüssiggas;** Festbrennstoffe (Holz, Holzpellets, sonstige Biomasse, Koks, Kohle, sonstige Heizenergie). (Nach BDEW 2016)

* Einschließlich Bioerdgas und Flüssiggas. ** Hierzu zählen Festbrennstoffe (Holz, Holzpellets, sonstige Biomasse, Koks/Kohle und sonstige Heizenergie). Über 100 % hinausgehende bzw. fehlende Prozentwerte zu 100 % sind vermutlich rundungsbedingt.

der Verteilung von Typen, Nutzfläche und qualitativer Merkmale wie der energetischen Qualität im Gebäudebestand (BMVBS 2013, S. 14). Erste Schätzungen finden sich in BMVBS (2011, 2013).

Flächenverbrauch
Wesentlicher Faktor in der Energiewende ist der Flächenverbrauch in Gebäuden, insbesondere wenn Energieverbräuche pro Einwohner oder Arbeitsplatz ausgewiesen werden sollen. In den letzten Jahrzehnten ist der Pro-Kopf-Bedarf an Wohnfläche in Deutschland beständig auf über 45 m^2 angestiegen (Tab. 2.1), u. a. durch die Zunahme an Singlehaushalten. In Nichtwohngebäuden hat der Flächenbedarf pro Büroarbeitsplatz durch neue Arbeitsplatzkonzepte eher abgenommen und liegt heute bei ca. 20 m^2.

2.1.2 Gebäudetypologien

Abgesehen von der Gebäudeart lassen sich Gebäude in Gebäudekategorien unterteilen, die im Bereich der Nichtwohngebäude, auch aufgrund vielfältiger Nutzungsprofile, jedoch keiner allgemein anerkannten Systematik folgen (BMVBS 2013, S. 20).

Der Begriff Gebäudetypologie steht nach Definition des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) für eine systematische Beschreibung der Kriterien zur Klassifizierung von Gebäuden. Die Haustypenmatrix des IWU (2015) teilt den deutschen Wohngebäudebestand in zwölf Baualtersklassen und fünf Größenklassen ein (Tab. 2.2). Anhand dieser Einteilung soll eine Grundlage zur Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch Wärmeschutzmaßnahmen für den bundesdeutschen Gebäudebestand geschaffen werden.

Die Hauptannahme bei der Bildung von Baualtersklassen ist, dass Gebäude gleichen Baujahrs Ähnlichkeit hinsichtlich Konstruktion, Materialien und Energieverbrauch aufweisen. Die Baualtersklassen orientieren sich an historischen Einschnitten, Zeitpunkten statistischer Erhebungen, wesentlichen baukonstruktiven Innovationen und Änderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften (z. B. WSchV, EnEV).

Am Beispiel von Einfamilienhäusern (EFH) sind in Tab. 2.3 typische Bauweisen, Erscheinungsbilder und energierelevante Merkmale für neun Baualtersklassen dargestellt.

Die Einordnung in Baualtersklassen ist in Deutschland nicht genormt. So erfolgt z. B. nach BVMBS (2013) eine Einteilung beheizter Nichtwohngebäude in 11 Gebäudekategorien und vier Baualtersklassen.

2.1.3 Energieeffizienz von Gebäuden

Die Energieeffizienz eines Gebäudes ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Ein wesentlicher Faktor ist die Gebäudegeometrie mit dem Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis). Das Baualter prägt das Verhältnis von Fenster- und Außenwandflächen und neben anderen Einflussfaktoren wie dem statischen Konstruktionsprinzip und

Tab. 2.2 Gebäudetypologie nach IWU. (IWU 2015, S. 9)

Baualtersklasse				EFH	RH	MFH	GMH	HH
				Basis-Typen				
A		... 1859		EFH_A		MFH_A		
B		1860 ... 1918		EFH_B	RH_B	MFH_B	GMH_B	
C		1919 ... 1948		EFH_C	RH_C	MFH_C	GMH_C	
D		1949 ... 1957		EFH_D	RH_D	MFH_D	GMH_D	
E		1958 ... 1968		EFH_E	RH_E	MFH_E	GMH_E	HH_E
F		1969 ... 1978		EFH_F	RH_F	MFH_F	GMH_F	HH_F
G		1979 ... 1983		EFH_G	RH_G	MFH_G		
H		1984 ... 1994		EFH_H	RH_H	MFH_H		
I		1995 ... 2001		EFH_I	RH_I	MFH_I		
J		2002 ... 2009		EFH_J	RH_J	MFH_J		
K		2010 ... 2015		EFH_K	RH_K	MFH_K		
L		2016 ...		EFH_L	RH_L	MFH_L		
Sonderfälle	F/F	1969 ... 1978	Fertig-haus	EFH_F/F				
	NBL_D	1946 ... 1960	Neue Bundesländer industrieller Wohnungsbau			NBL_MFH_D		
	NBL_E	1961 ... 1969				NBL_MFH_E		
	NBL_F	1970 ... 1980					NBL_GMH_F	NBL_HH_F
	NBL_G	1981 ... 1985					NBL_GMH_G	NBL_HH_G
	NBL_H	1986 ... 1990					NBL_GMH_H	

IWU

Tab. 2.3 Baualtersklassen (exemplarisch) nach IWU. (IWU 2015, S. 13)

EFH_B		1860 … 1918	Typisch 1- oder 2-geschossig, mit Satteldach; Dachgeschoss oftmals ausgebaut; Holzbalkendecken; häufig Mauerwerk aus Vollziegeln oder regionalen Natursteinen, teilweise zweischalig; bisweilen erhaltenswerte bzw. denkmalgeschützte Fassade; Kellerdecke als Kappengewölbe oder Kappendecke, im ländlichen Raum auch als Holzbalkendecke
EFH_D		1949 … 1957	Typisch 1- oder 2-geschossig, mit Satteldach, Dachgeschoss oftmals ausgebaut; Sparrenzwischenraum bisweilen ausgemauert, Holzbalken- oder Massivdecken; ein- oder zweischaliges Mauerwerk aus Vollziegeln, Trümmer-Hohlblocksteinen o.ä., in Norddeutschland Klinkerschale; Kellerdecke massiv (Stahlbeton o.ä.)
EFH_F		1969 … 1978	Typisch 1- bis 2-geschossig mit Sattel- oder Flachdach; Betondecken; Mauerwerk aus verputzten Gitterziegeln, Kalksandlochsteinen o. ä., bisweilen Tafelbauweise mit Leichtbau- oder Beton-Sandwich-Elementen („Fertighaus“); in Norddeutschland meist Klinker-Vorsatzschale
EFH_J		2002 … 2009	Typisch 1- bis 2-geschossig mit Satteldach; Betondecken; Mauerwerk monolithisch (porosierte Ziegel, Porenbeton, o. ä. mit Leichtmörtel) oder massiv (z. B. Kalksandstein) mit Wärmedämmverbundsystem; in Norddeutschland meist Klinker-Vorsatzschale; bisweilen Holz-Leichtbau

regionalen Präferenzen die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ist ein Maß für den Wärmedurchgang durch einen festen Körper aufgrund eines Temperaturunterschieds zwischen zwei angrenzenden Fluiden, wie z. B. Wasser oder Luft. Bei einer ebenen Wand gibt er den Wärmestrom (Wärme pro Zeit) pro Fläche und Temperaturunterschied in W/(m^2.K) an. Der U-Wert ist abhängig von Wärmeübergangskoeffizienten sowie Wärmeleitfähigkeit und Geometrie des festen Körpers. Gebäudebezogene Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz betreffen im Wesentlichen zwei Bereiche:

- Ertüchtigung der thermischen Gebäudehülle (TGH),
- Ertüchtigung der technischen Gebäudeausrüstung (TGA).

Die thermische Gebäudehülle (TGH) umfasst Bauteile und Flächen, die beheizte Bereiche von unbeheizten trennen (Abb. 2.2). Zur TGH gehören begrenzende Bauteile zwischen beheizten Räumen und Außenluft (Außenwände, Fenster, Türen, Dachflächen) sowie begrenzende Bauteile zwischen beheizten und unbeheizten Räumen (oberste Geschossdecke, Kellerdecke, Treppenhauswände, Türen usw.). Die Optimierung der

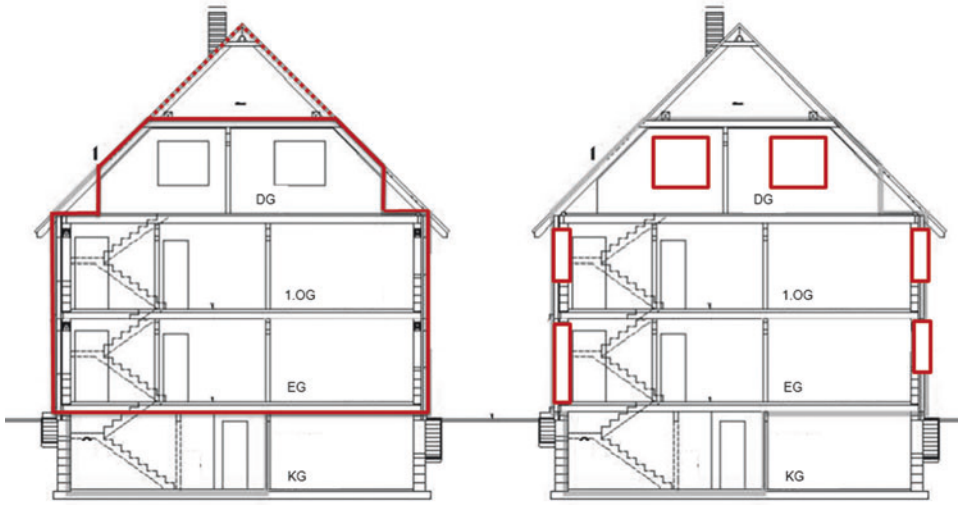


Abb. 2.2 Thermische Gebäudehülle. (© TU Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen)

technischen Gebäudeausrüstung (TGA) umfasst im Bestand vor allem Wärmeversorgungsanlagen. Lüftungsanlagen sind vor allem bei hochgedämmten Gebäuden bedeutsam. Grundsätzlich kommt im Bereich der TGA nur ein Austausch in Betracht, entweder einzelner Anlagenteile oder ganzer Anlagen.

Tab. 2.4 zeigt für mehrere Bauteile die Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten seit 1976 (vor Einführung WSchV) bis 1995. Die größten thermischen Schwachstellen an Gebäuden sind i. d. R. die Fenster. Allerdings können durch Fensterflächen umgekehrt auch hohe solare Gewinne durch Wärmeeintrag erzielt werden. Heutige Fenster weisen außerdem inzwischen deutlich niedrigere U-Werte auf als Außenwände älterer Gebäude.

Von Bedeutung für das A/V-Verhältnis ist auch die Nachbarbebauung mit ggf. angrenzenden Gebäuden. Einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz von Gebäuden nimmt außerdem die Art und Qualität der Wärmeversorgung (Abschn. 2.3).

Tab. 2.4 Typische U-Werte pro Bauteil nach Baualtersklassen. (Quelle: BMVBS 2013, S. 34–35)

	U-Wert [W/m^{2}K]			
Baualtersklasse	Außenwand	Fenster	Oberer Abschluss	Unterer Abschluss
Bis 1976	1,5	2,9	1	1,2
1977 bis 1983	1,2	2,9	0,5	0,85
1984 bis 1994	0,85	1,9	0,3	0,4
Ab 1995	0,35	1,3	0,3	0,3

2.2 Energetische Anforderungen, Vorgaben und Anreize

Energetische Anforderungen und Vorgaben an Neubauten und Bestandsgebäude sind seit der Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002 in Deutschland beständig gestiegen (Abschn. 2.1.3). Gleichzeitig haben Bund, Länder und Kommunen im Zuge der Energiewende umfangreiche Förderprogramme mit finanziellen Anreizen für energetische Sanierungen und Modernisierungen von Gebäuden und Anlagen zur Wärmeversorgung geschaffen.

2.2.1 Anforderungen und Vorgaben auf Bundes- und Länderebene

Energieeinsparverordnung (EnEV)
Energetische Mindest- und Standardanforderungen sind in Deutschland durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) vorgegeben, die 2002 die Wärmeschutzverordnung (WSchV) von 1978 abgelöst hat. Die EnEV gilt grundsätzlich für alle beheizten und gekühlten Gebäude und Gebäudeteile von Neubauten sowie bei Ausbau, Modernisierung, Umbau oder Erweiterung von Bestandsgebäuden. Mindestanforderungen betreffen vor allem Heizungs-, Kühl- und Raumlufttechnik sowie Warmwasserversorgung. Die EnEV 2014 sieht weitreichende Informationspflichten über energetische Kennwerte (Endenergie) in Energieausweisen mit Effizienzklassen von A+ bis H vor. Durch die EnEV 2016 werden die derzeitigen energetischen Anforderungen an Neubauten und Bestandsgebäude ein weiteres Mal erhöht.

Anforderungen der Bundesländer
Einzelne Bundesländer machen von der Möglichkeit Gebrauch, striktere Regelungen zu erlassen, die über die Anforderungen der EnEV hinausgehen. Baden-Württemberg hat beispielsweise das EWärmeG erlassen. Dieses lässt im Vergleich zur EnEV auch Alternativmaßnahmen zu. So kann der benötigte Anteil an Erneuerbaren Energien auf mehrere Arten erreicht (Solarthermie, Photovoltaik, Geothermie…) oder durch eine verbesserte Wärmedämmung kompensiert werden.

2.2.2 Förderprogramme auf Bundesebene

Maßnahmen für die energetische Optimierung von Gebäuden werden in Deutschland auf vielfältige Weise gefördert. Im Folgenden werden mit dem Marktanreizprogramm (MAP) und Förderprogrammen der KfW-Förderbank die beiden wesentlichen Fördermöglichkeiten im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden vorgestellt. Daneben existieren Steueranreize, auf die in diesem Zusammenhang nicht näher eingegangen wird.

Marktanreizprogramm (MAP)

- Seit 2009 sind Bauherren verpflichtet, bei Neubauten mit über 50 m^2 Nutzfläche mindestens 50 % der Wärme aus Erneuerbaren Energien zu beziehen (EEWärmeG).

- Förderung von Anlagen zur Nutzung Erneuerbarer Energien im Wärmemarkt sowie zur Energiegewinnung aus Geothermie, Solarthermie und Biomasse für Privatpersonen, Freiberufler, Unternehmen (bezogen auf Geothermie: Erdsonden/Kollektoren, Wärmepumpen, abhängig vom COP; Abschn. 2.3.2).
- Förderung beim Neubau von Heizwerken, Tiefengeothermieanlagen oder Nahwärmenetzen zur Verteilung erneuerbar erzeugter Wärme, z. B. Quartierlösungen von Kommunen.
- Investitionszuschüsse können je nach Größe der Anlagen im Einzelfall bis zu 7450 Euro betragen.

Förderprogramme der KfW-Förderbank (BMWi 2017a,b, KfW 2016)

- Förderung durch zinsgünstige Darlehen und Tilgungszuschüsse für Privatpersonen, Freiberufler, Unternehmen, Kommunen.
- Kleine und mittlere Unternehmen erhalten in dem auf Unternehmen zugeschnittenen und von der KfW betreuten Teil des MAP einen KMU-Bonus von zusätzlichen 10 % des Förderbetrags.
- Förderung von kleinen Einzelmaßnahmen bis hin zu großen Anlagen wie Biomasse-Heizkraftwerken oder Wärmenetzen.
- Investitionszuschüsse können je nach Größe der Anlagen im Einzelfall bis zu 30.000 Euro/Wohneinheit betragen.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) betreibt unter www.erneuerbare-energien.de (BMWi 2017c) eine Informationsseite über Förderprogramme des Bundes. Informationen geben außerdem kommunale Energieagenturen, die in Deutschland flächendeckend kostenlose Beratung anbieten.

2.2.3 Ergänzende Instrumente von Bundesländern und Kommunen

Energiekonzepte

Zur Anpassung an umweltpolitische Zielvorgaben hat sich die Aufstellung von Energiekonzepten als Instrument der kommunalen Entwicklungsplanung etabliert. Durch Energiekonzepte werden eine bestmögliche Mischung von Energiebedarfssenkung und rationeller Energieversorgung und eine Verbesserung des lokalen Klimas angestrebt. Hierzu sollen möglichst örtliche Energieangebotspotenziale und Erneuerbare Energien, wie z. B. Oberflächennahe Geothermie, genutzt werden. Auf Grundlage räumlicher Bestandsaufnahmen, lokaler Energiepotenziale sowie Energiebedarfsprognosen werden unterschiedliche Konzeptvarianten für Kommunen entwickelt, bewertet und abschließend Umsetzungsstrategien festgesetzt.

Kommunale Energiekonzepte zählen zu den informellen (räumlichen) Planungsinstrumenten und stellen eine Form der Selbstverpflichtung von Kommunen dar. Werden

Energiekonzepte durch den Stadt- bzw. Gemeinderat beschlossen, entfalten sie die Wirkung einer sonstigen städtebaulichen Verordnung nach §1 Absatz 6, Nr. 11 BauGB. Die Ergebnisse müssen folglich als Abwägungsbelang im Rahmen der Bauleitplanung berücksichtigt werden. Als informelles Planungsinstrument ist für die erfolgreiche Realisierung von Energiekonzepten insbesondere die Akzeptanz von Bürgern, ansässigen Unternehmen und Energieversorgungsunternehmen (EVU) erforderlich. Dies impliziert eine frühzeitige Beteiligung aller Stakeholder. Weiterhin kann die Kommune über die Gestaltung von Konzessionsverträgen, öffentlicher Energieberatung oder finanziellen Förderprogrammen Anreize für die Umsetzung von Energiekonzepten setzen. Eine Abbildung der gesamten Förderlandschaft (Landesförder- oder Städtebauprogramme) wäre je nach Bundesland unterschiedlich und im Rahmen dieses Beitrags zu umfangreich.

Anschluss- und Benutzungszwang für KWK oder EE-Wärmenetze
§ 16 EEWärmeG ermächtigt die Kommunen in Kombination mit der geltenden Gemeindeordnung (z. B. § 26 Gemeindeordnung Rheinland-Pfalz), aus Gründen des Klima- und Ressourcenschutzes einen Anschluss- und Benutzungszwang für KWK- oder Erneuerbare-Energien-Wärmenetze vorzuschreiben (vgl. Wustlich 2008, S. 119). Allerdings besteht diese Möglichkeit nur für Neubauten. Weiterhin ist ein räumliches Wirkungsgebiet von der Kommune festzusetzen.

Städtebauliche Verordnungen
§9 Abs. 1Nr. 23 b BauGB erlaubt es Gemeinden, aus städtebaulichen Gründen Mindestvorgaben zur Nutzung von Erneuerbaren Energien festzusetzen, bzw. nach §9 Abs. 1Nr. 23 a BauGB die Nutzung bestimmter Stoffe (im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) auszuschließen. Faktisch kann so die Benutzung bestimmter Formen der Wärmeerzeugung (z. B. mittels Wärmepumpen) erzwungen werden.

Bestandsgebäude
Während für Neubauten u. a. durch die EnEV, das EEWärmeG oder Festsetzungen in der Bauleitplanung energetische Standards zur Gebäudeoptimierung vorangetrieben werden, bleibt die energetische Optimierung von Bestandsgebäuden aus rechtlicher Sicht eine Schwachstelle. Dies ist insbesondere auf den (rechtlichen) Bestandsschutz zurückzuführen. Im Rahmen der Anpassung von Bestandsgebäuden an geltende energetische Standards bleiben folglich individuelle Anreize das zentrale Steuerungsinstrument (Abschn. 2.2.2).

Alle Bundesländer und z. T. auch Kommunen fördern ebenfalls Einzelmaßnahmen, z. B. über Landesförderprogramme, Instrumente der Städtebauförderung oder kommunale EVU. Auf Landesebene wird die Förderung vor allem in Form zinsgünstiger Darlehen ausgeschüttet. Diese sind regelmäßig an Einkommensgrenzen von Haushalten gebunden.

Eine detaillierte Übersicht zu Förderprogrammen findet sich in Kap. 8. Darin wird auch die Finanzierung von Anlagen für Oberflächennahe Geothermie näher beleuchtet.

2.3 Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren

Mittels Geothermie, bei Oberflächennaher Geothermie in Verbindung mit einer Wärmepumpe, lässt sich je nach Nutzung bei fast jedem Gebäude der Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf decken. Allerdings beeinflussen, wie auch bei anderen Formen der Wärmeversorgung, unterschiedliche Faktoren die ökologische und ökonomische Bewertung von Geothermieprojekten. Hierzu werden in diesem Kapitel sowohl die relevanten Parameter zur Auslegung von Geothermieprojekten als auch alternative Konzepte und grundlegende Planungsansätze zur Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren vorgestellt.

2.3.1 Wärmebedarf

Wärme und Trinkwarmwasser
Der Wärmebedarf eines Gebäudes setzt sich aus dem Bedarf für Heizwärme und dem für Trinkwarmwasser zusammen. Im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser wird dieser typischerweise über einen einzigen Energieträger sichergestellt. Während der Trinkwarmwasserbedarf hauptsächlich mit der Anzahl der Personen zusammenhängt, korreliert der Heizwärmebedarf vor allem mit den bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes. Die Bewohner bzw. Nutzer haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Heizwärmebedarf (Felsmann & Schmidt 2013). Dieser Einfluss steigt allerdings deutlich mit zunehmendem energetischem Standard des Gebäudes (Abschn. 2.1.3). Dies liegt darin begründet, dass Transmissionswärmeverluste sinken und so der Anteil von konstanten Lüftungswärmeverlusten steigt.

Gebäudetypologien
Bestandsgebäude werden üblicherweise nach Gebäudegröße und Baualter gruppiert (Abschn. 2.1.2). Dadurch können große Gebäudebestände hinsichtlich ihrer energetischen Qualität mit geringem Aufwand bewertet werden: Einem Bestandsgebäude kann auf Grundlage weniger Informationen (Baualter, Nutzfläche) ein (statistischer) Wärmeverbrauch zugeordnet werden. Die Gebäudetypologie kann nur den Ursprungszustand des Gebäudes berücksichtigen bzw. getätigte Sanierungen abschätzen. Der tatsächliche Heizwärmebedarf richtet sich nach Zeitpunkt, Umfang und konkreten Maßnahmen zur energetischen Sanierung bzw. Modernisierung.

Heizwärmebedarf/Heizlast
Der Heizwärmebedarf stellt, zusammen mit der maximalen Heizlast, die ausschlaggebende Größe bei der Wahl eines Heizsystems dar. Die maximale Heizlast ist die thermische Leistung, welche durch das Heizungssystem bei Auslegungsbedingungen (nach Norm, insbesondere DIN 4108-3) bereitgestellt werden können muss. Bei älteren Auslegungen findet sich oft eine deutliche Überdimensionierung der Heizungsanlage im Vergleich zur technisch benötigten maximalen Heizlast. Diese resultiert aus der abgelösten Norm (DIN EN 12831) und einem Sicherheitszuschlag, der Behaglichkeit auch bei besonders

ungünstigen Witterungsbedingungen sicherstellen soll. Ein Sicherheitszuschlag wird heute nur noch in geringem Umfang gebraucht, da die Systeme mit einer höheren Genauigkeit bilanziert werden können.

2.3.2 Wärmerzeugung

Energieträger

Um den Heizwärmebedarf bereitzustellen, werden unterschiedliche Wärmeerzeuger eingesetzt. Diese können u. a. nach Art des Energieträgers gruppiert werden und reichen von fossilen Energieträgern (Erdgas, Erdöl, Kohle…) über Strom (elektrische Direktheizung oder elektrische Wärmepumpe) und Fernwärme (fossil oder erneuerbar) bis zu reinen Erneuerbaren Energien (Umweltwärme inkl. Wärmepumpe, Biomasse…) (Tab. 2.5). Die Verteilung der einzelnen Energieträger im Gebäudebestand ist im Einzelfall abhängig von Verfügbarkeit, Preis (je kWh), sozialer Akzeptanz und Förderung (Abschn. 2.2).

Die Energieträger lassen sich weiter nach ihrem Umwelteinfluss und dem Platzbedarf differenziert bewerten (Tab. 2.6).

Niedertemperatur- und Brennwertsysteme

Die Wärmeerzeugung kann außerdem nach Art des Wärmeerzeugers kategorisiert werden. Hier haben sich Brennwertsysteme als heutiger Standard durchgesetzt. Brennwertsysteme

Tab. 2.5 Typische verfügbare Energieträger (Wärme)

Fossil	Erneuerbar
Erdgas/Flüssiggas	Holz (feste Biomasse)
Erdöl/Heizöl	Biogas (flüssig oder gasförmig)
	Umgebungswärme (Solarthermie, Luft/Wasser-Wärmepumpen, Tiefe Geothermie …)
	Fernwärme*
	Biomasse Direktnutzung (Erzeugung vor Ort)

*Fernwärme wird als Alternative zu EE gewertet, da diese oftmals durch KWK bereitgestellt wird und dadurch ebenfalls Ressourcen schont

Tab. 2.6 Kennwerte zur Bewertung der Umweltverträglichkeit der Energieträger

	Erdgas	Heizöl	Biomasse	Fernwärme	Umweltwärme
Primärenergiefaktor*	1,1	1,1	0,2/0,5**	0,7	0
CO_2-Faktor [g/kWh]**	247	319	23	248	0
Erhöhter Platzbedarf (Vergleich IST-Zustand)	Nein	Ja	Ja, außer Bio-Erdgas	Nein	Bedingt

*Gem. GEMIS-Modell; IINAS (2015)

**Der Primärenergiefaktor >0 resultiert aus Emissionen durch Transport und Verarbeitung. Der Brennstoff an sich hat einen Primärenergiefaktor von 0, da der Rohstoff nachwächst

weisen gegenüber Niedertemperatursystemen einen deutlich höheren Wirkungsgrad aus. Ihr Anteil an der Wärmeerzeugung in Wohngebäuden beträgt heute in Deutschland über 90 % (BDH/ZIV 2015).

Wärmepumpensysteme (WPS)

Wärmepumpensysteme (WPS) zur Nutzung von Umweltwärme (erd- oder luftgebunden) stellen im Neubaubereich den heutigen Stand der Technik dar, wo sie aufgrund der geringen benötigten (Vorlauf-)Temperaturen (bei Flächenheizungen: ca. 30–40 °C; zum Vergleich: 55–75 °C bei konventionellen Heizkörpern) moderner Heizsysteme besonders effizient sind. Ihr Anteil bei neu errichteten Wohngebäuden lag in Deutschland 2015 bei ca. 21 % (BDEW 2016). Die extrahierte Umweltwärme wird durch Wärmepumpen auf die zur Beheizung notwendigen (Vorlauf-)Temperaturen erhöht. Erdgebundene Wärmeaufnahme erfolgt über Erdpfähle (Sonden), Kollektoren oder Mischformen wie Körbe oder Grabenkollektoren. Kollektoren werden oberflächennah in das Erdreich eingebracht (horizontal). Erdsonden können vertikal bis zu 100 m (bei Tiefer Geothermie auch mehr) in den Boden reichen und dadurch größere Temperaturdifferenzen ausnutzen. Luftgebundene Wärmepumpen entnehmen Wärme durch ein Gebläse aus der Umgebungsluft.

WPS weisen bei geringen Temperaturhüben (benötigte Vorlauftemperatur abzgl. Temperatur des Quellmediums) einen guten Wirkungsgrad auf. Der Wirkungsgrad des Systems, gemessen über die Jahresarbeitszahl (JAZ), ist insbesondere abhängig von der Leistungszahl (üblich: *coefficient of performance* (COP)) der Wärmepumpe. Eine höhere JAZ führt zu einem geringeren Strombedarf und somit zu geringeren spezifischen Heizkosten (€/m^{2}a). Steigt die benötigte Vorlauftemperatur, z. B. aufgrund von hohem Wärmebedarf oder für Trinkwarmwasser, sinkt die JAZ des Systems. Dies führt ggf. zu höheren Bereitstellungskosten für diese Medien. Folglich sind WPS stärker von Außentemperaturen und Dämmung abhängig als andere Energieversorgungsvarianten (Abschn. 2.3.3).

Kombination von Energieträgern

Insbesondere bei einem größeren Wärmebedarf können Energieträger auch kombiniert eingesetzt werden. So können jeweilige Vorteile genutzt und Nachteile ausgeglichen werden. Ein verbreitetes Beispiel ist die Kombination von Erdgas mit Solarthermie. Solarthermie verursacht weder Kosten für Energieträger noch (direkte) Emissionen. Der wesentliche Nachteil der Solarthermie, nicht immer ausreichend viel und bei ausreichender Temperatur Energie bereitstellen zu können, kann durch erdgasbasierte Wärmeerzeuger (z. B. Erdgas-Brennwertanlage) ausgeglichen werden.

Bei kleinem Wärmebedarf schlagen aus ökonomischer Sicht vor allem die Installationskosten für die Wärmeerzeugung zu Buche. Diese amortisieren sich nur über eine ausreichende Menge an Betriebsstunden. Je mehr Energieträger bzw. Anlagentypen in einem System genutzt werden, desto kürzer ist deren jeweilige Betriebsdauer.

Die Auslegung des Heizsystems bzw. des Energieträgers richtet sich also neben rechtlichen (z. B. EnEV) und technischen (Heizwärmebedarf und Verfügbarkeit) auch maßgeblich nach ökonomischen Anforderungen.

2.3.3 Wärmeverteilung/Wärmeübertragung

Wärmeverteilung, Vorlauf und Rücklauf
An die Wärmeerzeugung schließt sich die Wärmeverteilung und die Wärmeübertragung an das beheizte Volumen an. Die Wärmeverteilung erfolgt i. d. R. über ein Warmwassersystem (Ausnahme: Luftheizungen). Dieses transportiert die Wärme als fühlbare Wärme, also durch Erhöhung der Temperatur. Der Volumenstrom zum Wärmeüberträger wird als Vorlauf bezeichnet. Die Wärme wird im Gebäude mittels Heizkörper oder Flächenheizung als Wärmeüberträger abgegeben. Das heruntergekühlte Wasser fließt als Rücklauf wieder zurück zum Wärmeerzeuger.

Wärmeübertragung
Die Wärmeübertragung erfolgt vereinfacht gemäß folgender Grundgleichung:

Grundgleichung der Wärmeübertragung (vereinfachte Form, eindimensional) (GGdWÜ)

$$P = \dot{Q} = \frac{1}{R} \cdot A \cdot (T_W - T_K) \qquad \text{(GGdWÜ)}$$

mit:

$P = \dot{Q}$: Abgegebene (Heiz-)Leistung
R: Thermischer Widerstand (hier Wärmeübergangskoeffizient $1/\alpha$)
A: Wärmeübertragende Fläche
T: Oberflächentemperatur (warm, kalt)

Energetische Optimierung von Heizsystemen
Für die energetische Optimierung von Heizsystemen ergeben sich aus der GGdWÜ mehrere Parameter:

- Die Vorlauftemperatur beeinflusst die Wärmeübertragung (vgl. GGdWÜ). Höhere Temperaturen führen zum einen zu höheren Verlusten (v. a. bei Fern- und Nahwärmesystemen), reduzieren aber die benötigte (Heiz-)Fläche, um die Leistung an den Raum zu übertragen. Des Weiteren erzeugen höhere Temperaturen einen höheren konvektiven Anteil an der Wärmeübertragung, der im Gegensatz zur Wärmestrahlung als unangenehm empfunden wird. Höhere Strahlungsenergie bzw. Strahlungsanteile führen zu einer geringeren benötigten Raumtemperatur, da sich die für die Behaglichkeit relevante „gefühlte Temperatur“ aus Raumtemperatur und absorbierter Strahlung zusammensetzt. Nach diesem Prinzip werden z. B. Lagerhallen beheizt, in denen bei Raumlufttemperaturen von 15 °C Behaglichkeit durch Strahlungswärme (sog. Dunkelstrahler) erzeugt wird.
- Die geringere Wärmeübertragung durch niedrigere Vorlauftemperaturen kann durch eine größere wärmeübertragende bzw. strömungstechnisch günstiger gestaltete Fläche ausgeglichen werden (vgl. GGdWÜ).

- Sinkt der Heizwärmebedarf bzw. die maximale Heizlast eines Gebäudes, kann auch der Wärmeüberträger entsprechend geringer dimensioniert werden. Dies kann, bei gegebener Geometrie des Wärmeüberträgers, entweder über eine Reduktion der Vorlauftemperatur oder durch Verkleinerung der wärmeübertragenden Fläche erfolgen. Ersteres ist aus Gründen der Effizienz und Behaglichkeit zu bevorzugen.
- Die Vorlauftemperatur hat auch Einfluss auf den Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers, vor allem bei Brennwertanlagen und Erneuerbaren Energien. Bei Brennwertgeräten hängt der Wirkungsgrad der Brennwertfunktion von der Rücklauftemperatur ab. Je geringer diese ist, desto mehr Wärme kann aus dem Abgas entzogen werden. Erneuerbare Energien liegen i. d. R. bei geringeren Temperaturen vor als Wärme aus konventionellen Energieträgern. Somit profitieren diese besonders von geringen Vorlauftemperaturen. Dies bedeutet im Falle von (Erd-)Wärmepumpen, dass diese die Umgebungswärme auf ein geringeres Temperaturniveau (an)heben müssen und somit weniger elektrischen Strom benötigen, um die benötigte Wärmemenge bereitzustellen.

Zusammengefasst ergeben sich diese Relationen:

- Geringerer Heizwärmebedarf und geringere Heizlast sowie größere Wärmeübertragungsflächen (im Optimalfall Flächenheizungen wie Fußboden-, Wand- oder Deckenheizungen) ermöglichen geringere Vorlauftemperaturen.
- Die geringeren Vorlauftemperaturen führen zu besseren Wirkungsgraden der Brenner bzw. einem höheren Anteil an Erneuerbaren Energien des Heizsystems und somit zu einer höheren Ausnutzung der bereitgestellten Endenergie (sowohl bei Umgebungswärme als auch bei fossilen Energieträgern).

Behaglichkeit und sonstige Faktoren
Beim Einsatz von Flächenheizungen steigt die Behaglichkeit (DIN EN ISO 7730) der Nutzer, und der Flächenverbrauch ist gegenüber Heizkörpern geringer. Allerdings sind größere Änderungen der Raumlufttemperatur (z. B. in ausgekühlten Gebäuden) mit Flächenheizungen nicht so schnell möglich wie mit Heizkörpern, was besondere Anforderungen an die Heizungssteuerung stellen kann. Hinzu kommen ggf. hohe Investitionskosten für Umrüstungen im Bestand (Abschn. 2.3.5).

2.3.4 Wärmespeicher

Speicher werden allgemein zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage eingesetzt. In Heizsystemen wird hierdurch die Differenz zwischen bereitgestellter Wärme(leistung) und der benötigten Heizlast ausgeglichen. So kann der Heizwärmeerzeuger kleiner dimensioniert werden, was neben einem Kostenvorteil i. d. R. auch einen höheren Wirkungsgrad mit sich bringt. Dieser gründet sich darin, dass der Wärmeerzeuger öfter in seinem Auslegungspunkt arbeitet und weniger im Teillastbereich.

Wärmespeicher können u. a. nach dem physikalischen Effekt, der für die Wärmespeicherung verantwortlich ist, oder dem genutzten Speichermedium kategorisiert werden. Bei

der Speicherung von Wärme wird fast ausschließlich Wasser genutzt, das durch Temperaturänderung Wärme speichert. Im Bereich von Einfamilienhäusern kommen, je nach Energiekonzept, Speicher mit bis zu 2000 l Wasser zum Einsatz (sog. Pufferspeicher).

In Kombination mit einer Wärmepumpe (und Geothermie) ist auch eine Nutzung dieser Speicher zur Regelung des elektrischen Netzes denkbar. Hierzu müsste bekannt sein, ob das zu entlastende System mehr oder weniger Energie abgeben/übertragen sollte (Netzstabilität). Die vom Heizsystem dann aufgenommene Energie kann den Heizwärmebedarf der nächsten Zeitschritte decken und so einen Strombezug der Wärmepumpe für maximal einige Tage unterbinden.

2.3.5 Vom Gebäude zum Quartier

Dezentrale vs. zentrale Energieversorgung

Nicht nur bei größeren Gebäuden (MFH, Büro/Gewerbe/Handel etc.) sondern prinzipiell auch bei Ein- und Zweifamilienhäusern können blockweise oder quartierszentrale Konzepte zur Wärmeerzeugung vorteilhaft gegenüber gebäudebezogenen Einzellösungen sein. Voraussetzung hierfür ist ein Nahwärmenetz, das ggf. von EVU bezuschusst bzw. betrieben werden kann. Zentrale Lösungen ermöglichen Skaleneffekte bei Investition, Instandhaltung (insb. Prüfung, Wartung, Instandsetzung, DIN 31051) und Betrieb gegenüber dezentralen Systemen. Investitionen amortisieren sich ggf. schneller durch mehr Betriebsstunden (Abschn. 2.3.2), zudem führen zentrale Lösungen i. d. R. zu niedrigeren Kosten für Planung und Installation gegenüber zahlreichen kleinteiligen Einzellösungen. Ein kontinuierlicher Betrieb des Wärmeerzeugers mit weniger Starts (Brenner oder Wärmepumpe) führt bei gleichem Heizwärmebedarf zu geringeren Energieverbräuchen. Der Betrieb kann durch EVU bzw. spezialisierte Dienstleister effizient durchgeführt werden. Je nach Ausgestaltung können dadurch operative Risiken für Eigentümer bzw. Bestandshalter minimiert werden.

2.3.5.1 Fallbeispiel: Grundlagen

Im Folgenden werden Energieversorgungskonzepte aus dem Quartierskonzept Bahnheim dargestellt, das 2014/2015 von den Fachgebieten Immobilienökonomie, Baukonstruktion und Fertigteilbau sowie Hauskybernetik der TU Kaiserslautern erstellt wurde. Das Bahnheim ist ein Quartier in Kaiserslautern mit 369 Wohnungen in 77 Gebäuden (22.236 m^2 WF) aus den 1920er Jahren. In den 1950er Jahren wurden zerstörte Gebäude wiederaufgebaut. Das Quartier befindet sich im Eigentum der Baugenossenschaft Bahnheim e. G. (Bestandshalter). Durch den Status als Denkmalschutzzone dürfen Außenfassaden im Quartier nicht verändert werden. Energetische Modernisierungsmaßnahmen im Quartierskonzept konzentrieren sich daher vor allem auf die Energieversorgung.

Auf gebäudebezogene Einmalkosten in dem spezifischen Gebäudebestand der Bahnheim e.G. wird bei der wirtschaftlichen Bewertung der Energieversorgungskonzepte in diesem Beitrag nicht eingegangen.

Tab. 2.7 Mögliche Kriterien und Restriktionen zur Eingrenzung der möglichen Energieträger

Energieträger		Restriktionen	
(Oberflächennahe) Geothermie	Flächen-kollektoren	Hohe laufende Kosten bei geringem Sanierungsstand	Großflächige Erdarbeiten (ca. 45.000 m^2 unbebaute Fläche)
	Erdsonden		
Luft-Wasser-Wärmepumpe			
Tiefe Geothermie bzw. Wasser-Wasser-Wärmepumpe		Hohe Investitionskosten & Auffindungsrisiko	
Feste/gasförmige Biomasse		Dauerhafter Lagerort (unterirdisch möglich), regelmäßige Anlieferung	

Energieversorgungskonzepte (EV)
Durch Kombination einzelner oder mehrerer Technologien wurden im Quartierskonzept sieben Energieversorgungskonzepte (EV) abgeleitet. Dabei werden insbesondere blockweise Beheizungsformen und quartierszentrale Konzepte betrachtet. Die Versorgung mit elektrischem Strom wird als Zusatznutzen einzelner Konzepte mit betrachtet.

Eingrenzung der Energieträger
Tab. 2.7 zeigt die einzelnen Energieträger und Restriktionen für den Bestandshalter. Ein möglichst hoher Anteil Erneuerbarer Energien ist generell anzustreben. Vor allem Erneuerbare Energien benötigen allerdings i. d. R. relativ viel Platz bzw. Eingriffe in die direkte Umgebung des Quartiers.

Gebäudebezogene Maßnahmen
Grundsätzlich kann eine effiziente bzw. umweltfreundliche Energieversorgung bauliche Maßnahmen (v. a. Dämmungen) nie ersetzen. Nur so können die Endenergieverbräuche und Nebenkosten der Gebäude nachhaltig reduziert werden. Anlagen zur Bereitstellung (und eventuellen Bevorratung) von EE können dadurch möglichst klein und kostengünstig dimensioniert werden. Vor allem diese Reduktion der Nebenkosten kann an Bewohner der Gebäude weitergegeben werden und sorgt zusätzlich für ein attraktives Wohnangebot.

Energiepreise, Steuern, Abgaben
Je höher der Anteil solcher EE, die vor Ort erzeugt werden, desto sicherer kann der künftige Preis vorausgesagt werden, da der Anteil an schwer kalkulier- bzw. prognostizierbaren Kosten sinkt. In der Zukunft erhobene oder sich ändernde Steuern und andere Abgaben können kaum vorhergesagt werden.

2.3.5.2 Fallbeispiel: Erste Konkretisierung der Energieträger und Maßnahmen

Einzelmaßnahmen lassen sich zu Energieversorgungskonzepten (EV) kombinieren, die Vorteile kombinieren und Nachteile möglichst ausgleichen. Um EV einander

gegenüberstellen zu können, werden der Primärenergiebedarf (nach EnEV14) und CO_2-Emissionen (nach GEMIS) für jedes EV angegeben. Als Referenz wird die Fortsetzung der bestehenden Strategie – mit kontinuierlicher Erneuerung der bestehenden Gasetagenheizungen (EV0) – betrachtet. Darauf folgen mögliche Alternativen mit sinkender Zahl an Feuerstellen. In diesen Alternativen versorgen weniger Heizungen die gesamte Siedlung. Hierfür ist ein entsprechendes Leitungsnetz erforderlich (**Nahwärmenetz**).

Die Umwelteinflüsse beziehen sich immer auf den nichtsanierten Bestand mit einem Verbrauch von 3,7 Mio. kWh/a Erdgas (2013).

Die Bewertung der EV geschieht über die nicht verursachten Emissionen (CO_2-Äq.) und die benötigte Primärenergie. Neben den Daten aus GEMIS (hier vor allem Erdgas: 247 g CO_2-Äq./kWh) wurden die Primärenergiefaktoren nach EnEV14 genutzt.

EV0: Kontinuierliche Erneuerung der bestehenden Gasetagenheizungen (GEH)
Variante EV0 (Tab. 2.8, Abb. 2.3) bildet den IST-Zustand ab, bei dem die bestehenden Gasetagenheizungen nach Bedarf erneuert werden.

Bauliche Maßnahmen: Austausch Gasetagenheizungen.

Tab. 2.8 Maßnahmenblatt EV0

Technische Spezifikation des System		Eine Gasetagenheizung pro Wohneinheit	
Grund der Verbesserung		Steigender mittlerer Wirkungsgrad durch Austausch des Kessels und somit Nutzung von Brennwerttechnik	
Umwelteinfluss			
4,1	Mio. kWh Primärenergie/a	950	t CO_2-eq./a
Vorteile:		**Nachteile:**	
		• Viele Zündungen (→ viele Emissionen, v. a. durch unverbrannten Brennstoff)	

Abb. 2.3 EV0 Kontinuierliche Erneuerung der bestehenden Gasetagenheizungen. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

2.3.5.3 Blockweise Beheizung

Bei blockweiser Beheizung wird die Wärmeerzeugung für mehrere Gebäude zusammengefasst. Dies kann über Blockzentralheizungen (z. B. Oberflächennahe Geothermie bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe) erfolgen. Eine weitergehende Aggregation wird danach mit quartierszentralen Konzepten betrachtet.

EV1: Blockzentralheizungen

Durch blockweise Beheizung, also einem Heizkessel „pro vier Außenwände", reduziert sich in Variante EV1 die Anzahl der Anlagen (Abb. 2.4, Tab. 2.9). Ein Teil der Emissionen wird durch unvollständig verbrannten Brennstoff bei Beginn der Verbrennung verursacht, was als Reduktion des Wirkungsgrads interpretiert werden kann. Eine zentrale Beheizung reduziert außerdem insgesamt den Wartungsaufwand im Quartier.

Blockzentralheizungen gehören vor allem in neuen Mehrfamilienhäusern zum heutigen Stand der Technik. Durch ein Verteilsystem wird die Wärme in die einzelnen Wohnungen verteilt. Für die Nutzer entsteht durch den Entfall der Anlage in der Wohnung zusätzlicher

Abb. 2.4 EV1 Blockzentralheizungen. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

Tab. 2.9 Maßnahmenblatt EV1

Technische Spezifikation des Systems		Ein Heizkessel pro (Gebäude-)Block	
Grund der Verbesserung		Steigender mittlerer Wirkungsgrad durch Austausch, weniger Starts des Heizungssystems	
Umwelteinfluss			
4	Mio. kWh Primärenergie/a	927	t CO_2-eq./a
Vorteile:		**Nachteile:**	
• Weniger Zündungen und weniger Kosten • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein		• Steht im unbeheizten Keller (Leitungsverluste)	

Platz. Zudem sinkt durch einen kontinuierlicheren Prozess die Anzahl der Brennerstarts, was zu leicht sinkenden Emissionen (ca. 5 %) und Verbräuchen führt.

Bauliche Maßnahmen (Gebäude): Rückbau der Gasleitungen (inkl. Zähler) im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, „Heizungsraum“ im Keller, evtl. Wärmemengenzähler pro WE.

EV2a+b: Oberflächennahe Geothermie bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe

Wärmepumpen (Abb. 2.5, Tab. 2.10) zur Nutzung von Umweltwärme (erd- oder luftgebunden) stellen im Neubaubereich den heutigen Stand der Technik dar. Die zur Beheizung

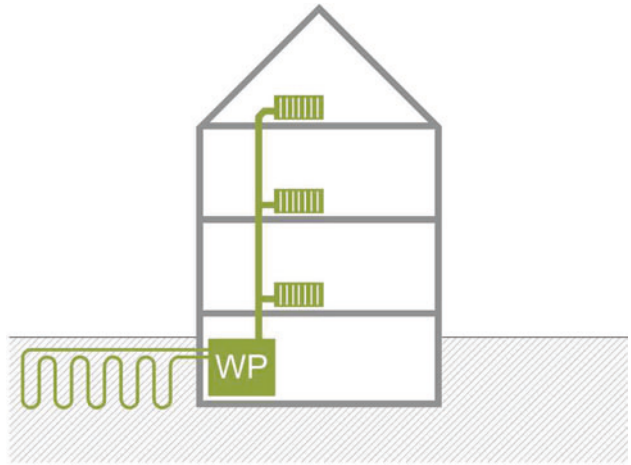


Abb. 2.5 EV2a+b Oberflächennahe Geothermie bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

Tab. 2.10 Maßnahmenblatt EV2

Technische Spezifikation des Systems		Oberflächennahe Geothermie	
Grund der Verbesserung		Umweltwärme	
Umwelteinfluss			
2,1	Mio. kWh Primärenergie/a	666*	t CO_2-eq./a
Vorteile:		**Nachteile:**	
• Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein		• Betriebskosten/Stromverbrauch abhängig von Umgebungstemperatur und Dämmniveau • Hoher (Flächen-)Aufwand bei Installation von Flächenkollektoren** • Konventionelle Heizkörper als Wärmeüberträger ungünstig*** • Für Niedrig-Energie-Haus (Neubau) optimiert	

*Bei 569 g/kWh_{el} und JAZ von 3,5. (BMU2 2015)

**Erdreichabtragung für spiralförmige Verlegung von Rohren ca. 1,5 m unter Erdoberfläche

***Konventionelle Heizkörper bieten im Gegensatz zu Flächenheizung (z. B. Fußbodenheizung) eine relativ geringe Oberfläche, sodass benötigte Vorlauftemperatur und Heizkosten steigen

notwendigen (Vorlauf-)Temperaturen, die durch Wärmepumpen aus Umweltwärme erzeugt werden, hängen von unterschiedlichen Faktoren ab (Abschn. 2.3.2). Sie sind am niedrigsten bei Einsatz von Flächenheizungen statt konventioneller Heizkörper.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, „Heizungsraum“ im Keller, (evtl. Wärmemengenzähler pro WE), Installation von Wärmepumpe und Kollektoren/Erdsonden.

Anmerkung: Elektrische Wärmepumpen, wenn sie wie i. d. R. über das öffentliche Netz versorgt werden, profitieren von den sinkenden Emissionswerten des Stroms aus dem öffentlichen Netz. Mit steigendem Anteil an EE, wie in mehreren Zielvorgaben auf Landes-Bundes- und EU-Ebene festgelegt, sinken die (spezifischen) Emissionen von Strom aus dem öffentlichen Netz weiter.

2.3.5.4 Quartierszentrale Konzepte

Quartierszentrale Konzepte sollten grundsätzlich **nicht vom Gebäudeeigentümer bzw. Bestandshalter** (z. B. Wohnungsunternehmen) selbst betrieben werden, sondern durch EVU bzw. spezialisierte Dienstleister (z. B. **Contractor**). So können nicht nur operative Risiken reduziert bzw. übertragen werden, sondern auch der Mehraufwand für die (technische) Betreuung solcher Anlagen und ggf. resultierende gewerbliche Tätigkeit.

EV3a: Erdgas BHKW + Nahwärmenetz

Blockheizkraftwerke (BHKW) produzieren Wärme und Strom (Kraft-Wärme-Kopplung). Mit steigender Größe nimmt der Wirkungsgrad zu, sodass produzierte Wärme sinnvoll über Nahwärmenetze verteilt wird (Abb. 2.6, Tab. 2.11). Dies bietet zudem die Möglichkeit einer schrittweisen Erneuerung bestehender Anlagen. Die Wärme wird mittels Übergabestationen an Wohnungen übergeben. Aus Nutzersicht ist dies äquivalent zu „klassischer“ Fernwärme. An ein Nahwärmenetz können auch weitere Abnehmer angeschlossen werden. Der Anlagenbetreiber rechnet direkt mit den Bewohnern ab, die anstatt einer Gasrechnung eine Rechnung über die bezogene Wärme erhalten.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Heizzentrale im Quartier (garagengroß), Wärmenetz zwischen Gebäuden und Heizzentrale, Wärmemengenzähler pro WE.

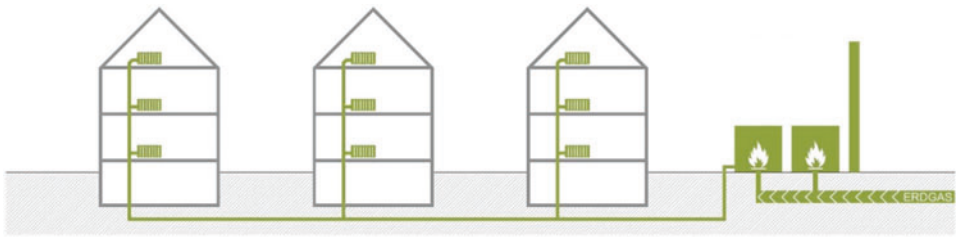


Abb. 2.6 EV3a Erdgas BHKW + Nahwärmenetz. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

Tab. 2.11 Maßnahmenblatt EV3a

Technische Spezifikation des Systems		Zentrales Blockheizkraftwerk mit Spitzenlastkessel	
Grund der Verbesserung		Gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme	
Umwelteinfluss			
4	Mio. kWh Primärenergie/a	632*	t CO_2-eq./a
Vorteile:		**Nachteile:**	
• Kann bilanziell auch mit (gasförmiger) Biomasse („Bio-Erdgas“) befeuert werden • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Ein zentraler Kamin		• Wärmeverlust durch Verteilung, ggf. reduzierbar durch Verlegung durch Gebäude	

*794 t CO_2-eq./a durch Verbrennung von Erdgas, sowie 162,3 t CO_2-eq./a Gutschrift für gleichzeitige Substitution von elektrischem Strom aus dem Netz

Anmerkung: Ein Nahwärmenetz mit BHKW ist aus technischer Sicht quasi identisch mit ggf. vorhandener Fernwärme. Deshalb sollte aus technischer Sicht diese Maßnahme nur umgesetzt werden, wenn sich große Einsparungen **finanziell** und/oder bei den **Emissionen** ergeben.

EV3b: Biomasse BHKW + Nahwärmenetz

EV3b (Abb. 2.7, Tab. 2.12) entspricht konzeptionell EV3a, nur dass durch den Einsatz von Biomasse die CO_2-Emissionen (bilanziell) gesenkt werden.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Heizzentrale im Quartier (garagengroß), Wärmenetz zwischen Gebäuden und Heizzentrale, Wärmemengenzähler pro WE.

Anmerkung: Es gelten die gleichen Anmerkungen wie für EV3a.

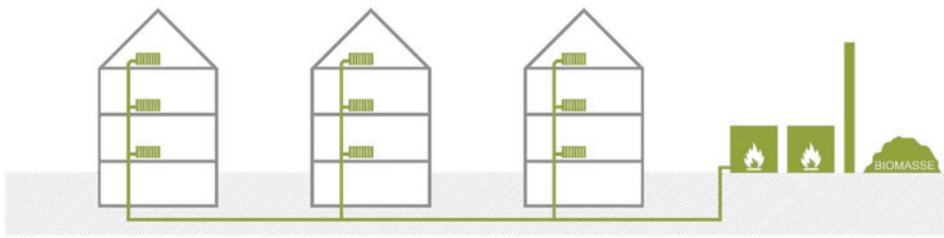


Abb. 2.7 EV3b Biomasse BHKW + Nahwärmenetz. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

Tab. 2.12 Maßnahmenblatt EV3b

Technische Spezifikation des Systems		Zentrales Blockheizkraftwerk mit Spitzenlastkessel	
Grund der Verbesserung		Gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme	
Umwelteinfluss			
0*	Mio. kWh Primärenergie/a	<0**	t CO_2-eq./a
Vorteile:		**Nachteile:**	
• Kann bilanziell auch nur teilweise Biomasse befeuert werden • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Ein zentraler Kamin		• Wärmeverlust durch Verteilung, reduzierbar durch Verlegung durch Gebäude • Vorratsraum bei fester Biomasse nötig	

*Bei Nutzung von 100 % Biogas
**Siehe EV3a, Kappung bei 0 t CO_2-eq./a.

Abb. 2.8 EV4 Kaltes Nahwärmenetz + Geothermie + Solarthermie + BHKW + PV + FW. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

EV4: Kaltes Nahwärmenetz + Geothermie + Solarthermie + BHKW + Photovoltaik + Fernwärme

Ein kaltes Nahwärmenetz (Abb. 2.8, Tab. 2.13) erlaubt die Einspeisung verschiedener Energiequellen, wie z. B. Geothermie, Rücklauf-Fernwärme, Abwärme aus Industrie oder Solarthermie. Die Wärme wird dann bei vergleichsweise geringen Temperaturen in einem Nahwärmenetz gespeichert. Mittels Wärmepumpe wird diese in Gebäuden aus dem Netz entnommen und auf das benötigte Energieniveau „gepumpt". PV-Module liefern (bilanziell) den für die Wärmepumpen benötigten Strom. Für den Fall, dass nicht genug Wärme im Nahwärmenetz zur Verfügung steht, ist dieses mit dem Fernwärmenetz verbunden. Es gilt ansonsten das Gleiche wie für Nahwärmenetze in EV3a.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Heizzentrale im Quartier (garagengroß) inkl. Erdarbeiten für Geothermie, Heizungsraum (Wärmepumpe pro Gebäude), Solarthermie etc. (je nach Variante), Wärmenetz zwischen Gebäuden und Heizzentrale, Wärmemengenzähler pro WE.

Tab. 2.13 Maßnahmenblatt EV4

Technische Spezifikation des Systems		Dezentrales (Niedertemperatur-)Nahwärmenetz, Anhebung mittels WP je Gebäude; Fernwärme als Redundanz der Einspeisung bzw. Spitzenlast	
Grund der Verbesserung		Nutzung von Umweltwärme	
Umwelteinfluss*			
~ 0	Mio. kWh Primärenergie/a	0	t CO_2-eq./a
Vorteile:		**Nachteile:**	
• BHKW kann bilanziell auch mit (gasförmiger) Biomasse befeuert werden • Wärmespeicherung (saisonal) möglich • Nutzung mehrerer Erneuerbarer Energien, wie Abwasser etc. • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Ein zentraler Kamin		• Konventionelle Heizkörper als Wärmeüberträger ungünstig** • Flächenbedarf für Geothermie-Flächen- und Solarkollektoren	

*Wenn die Produktion von elektrischem Strom aus PV und Biomasse-BHKW mindestens den Bedarf der Wärmepumpen deckt und keine Einspeisung aus Fernwärme nötig ist.
**Konventionelle Heizkörper bieten im Gegensatz zu Flächenheizung (z. B. Fußbodenheizung) eine relativ geringe Oberfläche, sodass benötigte Vorlauftemperatur und Heizkosten steigen.

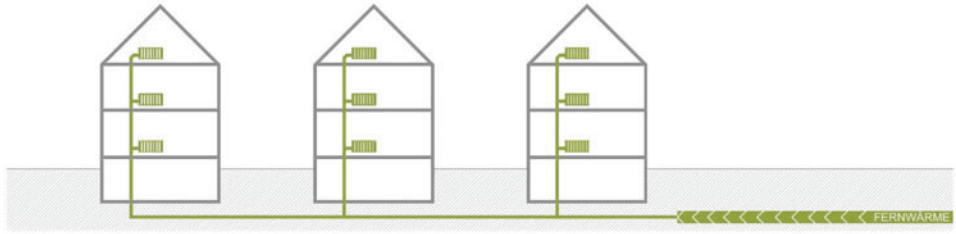


Abb. 2.9 EV5 Fernwärme. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

EV5: Fernwärme

Die „klassische“ Fernwärme (Abb. 2.9, Tab. 2.14) funktioniert ähnlich wie die oben beschriebenen Varianten. Die Wärme wird zentral erzeugt (z. B. durch Heizkraftwerk, Tiefe Geothermie) und zum Verbraucher transportiert. Die benötigte Installation in der Wohnung ist deutlich kleiner als eine Gasetagenheizung und schafft so zusätzlichen Platz in Wohnungen. Die Abrechnung der genutzten Wärme erfolgt direkt mit dem Versorger.

Konstruktiv und wirtschaftlich ist eine prinzipiell mögliche Verlegung der FW-Leitungen durch Keller nicht sinnvoll. Den zu erwartenden Wärmegewinnen im Keller stehen hohe Kosten (v. a. für Verankerung) und vor allem der große Platzbedarf der Leitungen (2 Leitungen á ~300 mm Durchmesser; DN100 + 2·100 mm Dämmung) entgegen.

Tab. 2.14 Maßnahmenblatt EV6

Technische Spezifikation des Systems		Ein Anschluss pro Block	
Grund der Verbesserung		Gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme	
Umwelteinfluss*			
2,59	Mio. kWh Primärenergie/a	1091,5**	t CO_2-eq./a
Vorteile:		**Nachteile:**	
• Abwicklung komplett durch EVU • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Kein Kamin		• Abhängig vom EVU, sowohl preislich als auch in Bezug auf Umwelteinfluss	

*Primärenergiefaktor lt. EVU seit 2015: 0,7
**Mittelwert für D (295g/kWh); gem. GEMIS-Modell; IINAS (2015)

Abhängig von Preisen sollte ein Optimum aus möglichst wenigen Hausanschlüssen und möglichst kurzen Rohrleitungen in Gebäuden zu finden sein, da vor allem Anlagenteile im Gebäude störanfällig sind.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Wärmenetz zwischen Gebäuden und Fernwärmetrasse, Wärmemengenzähler pro WE.

Anmerkung: Durch Nutzung von Abwärme, z. B. aus Industrie oder Müllverwertung, sowie die Einbindung von EE, z. B. Tiefer Geothermie, sinken CO_2-Emissionen und Primärenergiebedarf von Fernwärme.

2.3.5.5 Eingrenzung der energetischen Effekte aus Energieversorgungskonzepten

Tab. 2.15 vergleicht die möglichen Einsparungen (Primärenergie, Emissionen) durch die einzelnen Varianten der Energieversorgung. Gebäudebezogene Sanierungsmaßnahmen sind dabei nicht berücksichtigt. Zusätzlich ist eine Variante 5b mit Fernwärme aus Tiefer Geothermie dargestellt.

Tab. 2.15 Ökologische Bewertung EV0 bis EV5

Variante		Einsparung p.a.	
		Primärenergie [Mio. kWh]	Emissionen [t CO_2-eq.]
1	Gebäudeheizzentrale	0,1	23
2	Oberflächennahe Geothermie bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe	2,0	284
3a	BHKW	0,1	327
3b	Biomasse-BHKW	4,1	950
4	Kalte Nahwärme	4,1	950
5a	Fernwärme	1,5	–141, 5
5b	Fernwärme aus Tiefer Geothermie	4,1	950

EV0 könnte über die kontinuierliche Erneuerung bestehender Anlagen aufgrund technischen Fortschritts Energieeinsparungen erzielen, die aber nicht ins Gewicht fallen (Brennwerttechnik ist in Deutschland bei Gasetagenheizungen seit Mitte der 90er Jahre üblich). EV2, EV3b und EV4 und EV5b erzielen aufgrund des Einsatzes von Erneuerbarer Energie die größtmöglichen Einsparungen an Primärenergie und CO_2-äquivalenten Emissionen (DIN 18599). EV1 (Gebäudeheizzentrale) und EV3a (BHKW mit fossilen Brennstoffen) bringen nur geringfügige Primärenergieeinsparungen in Höhe von ca. 2,5 %.

Tab. 2.16 zeigt die erwarteten Investitionskosten der EV sowie die erwarteten Lebenszykluskosten (LZK) aus Eigentümer- und Nutzersicht. Die in Tab. 2.16 dargestellten LZK basieren auf einem Zeitraum von 20 Jahren und beziehen Erstinvestitionen sowie den Barwert der Betriebskosten, der laufenden Instandhaltungskosten und der Ersatzinvestitionen ein. Fördermittel von KfW und BAFA (Abschn. 2.2.2; Stand: Juni 2015) sind berücksichtigt. Je nach Gebäudemerkmalen fallen beträchtliche Kosten für die Installation von Flächenheizungen und den Rückbau obsoleter Heizkörper an, die die Wirtschaftlichkeit der EV erheblich beeinflussen können. Dies muss in jedem Einzelfall bewertet werden. Da diese Kosten spezifisch für das Bahnheim-Quartier sind, sind sie in Tab. 2.16 nicht ausgewiesen. Die Darstellung basiert auf der Annahme, dass gebäudeseitige Voraussetzungen wie Flächenheizungen gegeben sind und nur die Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung für die EV1 bis 5 hergestellt werden muss.

In EV0 wird von der Erneuerung aller Gasetagenheizungen am Anfang des Betrachtungszeitraums ausgegangen. Die Verbrauchskosten aus Nutzersicht sind bei EV0, abgesehen von EV4 und EV5, mit Abstand am höchsten. EV1 ist aus Eigentümersicht, abgesehen von EV3b und EV5, die kostengünstigste Variante. Allerdings liegen die Lebenszykluskosten für die Nutzer ca. 13 % (35 %) über denen der KWK-Variante EV3a (EV3b). Die Errichtung des Nahwärmenetzes und der Hausanschlüsse schlagen mit etwa 630.000 EUR zu Buche und werden in EV3a, EV3b und EV4 vom Bestandshalter getragen.

Tab. 2.16 Ökonomische Bewertung EV0 bis EV6 (Stand: Juni 2015)

EV	LD [a]	Invest (brutto) [1000 €]	LZK Eigentümer [1000 €]	LZK Nutzer [1000 €]	
				P, I, W	Verbrauch
0	20	1201	1201	330	3109
1	20	1109	1109	120	2406
2	15	2173	2992	28	2126
3a	20	1481	1481	149	2198
3b	20	1481	750	149	1780
4	20	2173	2344	88	3402
5	100	318	318	0	3796
Basis: 369 WE, 22.236 m^2 WF			LZK: Lebenszykluskosten = Investitionskosten und Nutzungskosten (Betrieb, Instandhaltung, Ersatz), 20 Jahre, Barwert (gew. Kapitalkosten, i = 4,0 %) LD: Lebensdauer P: Prüfung, I: Inspektion, W: Wartung		

Die LZK von EV2 sind aufgrund der kürzeren Lebensdauer der Wärmepumpen, die im Betrachtungszeitraum von 20 Jahren bereits einmal erneuert werden müssen, am höchsten: Der Barwert der Erneuerungsinvestition beträgt 819.000 Euro (2,992 Mio. Euro – 2,173 Mio. Euro). Auch die Erstinvestitionen von EV2, vor allem aufgrund der Erdsonden, sind mit Abstand am höchsten. Aus Nutzersicht sind die LZK bei dieser Variante deutlich günstiger als in EV0 und EV5. EV3b erzielt Einsparungen bei den Betriebskosten aufgrund der derzeit höheren Einspeisevergütung für Strom aus biomassebetriebenen BHKWs und ist dadurch aus Nutzersicht die günstige Variante. Die technisch aufwendigste Lösung EV 4 erweist sich als unwirtschaftlich. Die LZK für Nutzer und Eigentümer liegen aufgrund der hohen Investitions- und Nutzungskosten, insbesondere der hohen Anzahl an Einzelanlagen und des selbst betriebenen Nahwärmenetzes, inklusive erzielter Einspeisevergütungen nach heutigem Stand ca. 11 % über der zweitteuersten Variante (EV5). EV5 (Fernwärme) finanziert sich weitgehend aus den Verbrauchskosten. Daher resultieren für die Nutzer bei dieser Variante die höchsten Lebenszykluskosten. Die Kosten für die Errichtung des Nahwärmenetzes und der Hausanschlüsse in EV5 werden üblicherweise vom EVU übernommen.

2.3.5.6 Wärmespeicher

In EV0 bis EV5 wurden keine Wärmespeicher berücksichtigt. Diese könnten sowohl dezentral zur schnelleren Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs eingesetzt werden oder zentral. Zentrale Wärmespeicher können, wie in Abschn. 2.3.4 beschrieben, das vorgeschaltete System optimieren. Beim Einsatz eines BHKW könnte Strom nach Bedarf erzeugt und die dabei anfallende Wärme eingespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verbraucht werden. Analoges gilt für eine Wärmepumpe, bei der netzdienlich Wärme erzeugt wird und diese nach Bedarf aus dem Speicher abgerufen werden kann.

Vor allem Speicher in Zusammenhang mit größeren BHKW-Anlagen stellen eine interessante Möglichkeit zur Steuerung des elektrischen Netzes dar, da mit geringem Aufwand viel Regelleistung bereitgestellt werden kann. Ähnliches gilt für Wärmepumpen (und somit Geothermie) wenn ein standardisiertes Signal zur Steuerung der Wärmepumpen zur Verfügung steht.

Wasserspeicher oder auch Puffer(-speicher) kosten, je nach Größe und Anzahl der Anschlüsse, zwischen 200 und 600 Euro pro WE.

2.3.5.7 Bewertung energetische Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit (Einzelgebäude/Blöcke)

Für das Quartier wurden unterschiedliche EV dargestellt. Diese unterscheiden sich vor allem nach Umfang und Aufteilung der benötigten Investitionen, Grad der Autarkie und Umweltbewertung (CO_2). Da alle Konzepte EV0 bis EV5 prinzipiell umsetzbar sind, sollten diese im Einzelfall bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit geprüft

werden. Daneben sind weitere Faktoren zu prüfen, wie z. B. Investitionsbereitschaft oder Kooperationen, etwa mit der Stadt oder Kommune, EVU oder Bauträgern und Bestandshaltern oder Gewerbetreibenden von benachbarten Liegenschaften.

Wärmespeicher stellen eine einfache Möglichkeit dar, um Bedarfs- und Angebotsspitzen in Heizsystemen zu nivellieren. Je nach Ziel können bereits kleine Speicher die benötigte Leistung der Wärmeerzeuger verringern und somit Investitionskosten reduzieren. Zudem bieten sie die Möglichkeit, Einfluss auf vorgeschaltete Netze (Stromnetz) zu nehmen und diese zu stabilisieren.

Die Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich von der Höhe der Erstinvestitionen und der Lebensdauer der Bauteile ab. Die Verbrauchskosten, die von den Nutzern getragen werden, variieren je nach EV ebenfalls deutlich. Die Beibehaltung des Status quo (EV0) ist, sofern die gebäudeseitigen Voraussetzungen für die anderen EV gegeben sind, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten weder für den Bestandshalter noch für die Nutzer vorteilhaft.

2.3.6 Zwischenfazit: Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren

Während bei einzelnen Gebäuden die Anzahl der verfügbaren Heizsysteme, nicht zuletzt aufgrund der Investitionskosten, vergleichsweise gering ist, profitieren Gebäudegruppen von den unterschiedlichen verfügbaren Heizsystemen. Durch das Zusammenfassen mehrerer kleinerer Bedarfe zu einem kombinierten Bedarf lassen sich gleich mehrere Erneuerbare Energien einbinden. Die gleichzeitige Kombination mehrerer Energieträger ist allerdings mit größerer Anzahl an Einzelanlagen (mit dann jeweils relativ geringer Anzahl an Betriebsstunden) zunehmend unwirtschaftlich.

Im Gegenzug können durch eine sinnvolle Kombination von System deren Vor- und Nachteile gegenseitig ausgeglichen werden. Ein räumlicher Zusammenhang der Verbraucher ist vor allem aufgrund transportbedingter Energieverluste unabdingbar.

Können die Bedarfe nicht zusammengefasst werden, ist eine virtuelle Zusammenfassung möglich. Dies ist über die Vernetzung zwischen den (elektrischen) Wärmepumpen und dem Stromnetz möglich (insbesondere mit Wärmepumpe-Speicher-Systemen). Die koordinierte bzw. an die Angebots-Bedarfs-Situation im Stromnetz angepasste Fahrweise der Wärmepumpen bzw. Wärmepumpe-Speicher-Systeme erlauben eine gezielte Entlastung des elektrischen Netzes. Die Wärmepumpen stellen dann (negative) Regelleistung für das Netz bereit.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass Wärmepumpen aufgrund der (rechnerisch) kürzeren Lebensdauer von üblicherweise 15 Jahren gegenüber anderen EV benachteiligt sind. Faktisch könnte die Lebensdauer durchaus länger sein. Allerdings liegen hierüber – im Gegensatz zu anderen Systemen – noch keine empirischen Daten vor, da WPS in Deutschland erst vor ca. zehn Jahren im Markt eingeführt wurden (vgl. Abb. 2.1).

2.4 Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien

Die Potenziale von Wärmepumpen zur Nutzung Oberflächennaher Geothermie in Gebäuden werden im Folgenden anhand von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken betrachtet. Diese sind zum Teil spezifisch für Oberflächennahe Geothermie, andere für Geothermie oder Heizsysteme im Allgemeinen. Ergänzt wird die Aufzählung durch allgemeine Risiken, die sich aus der technischen Entwicklung oder der Finanzierung und laufenden Kosten ergeben. Die Gruppierung der Stärken (**S**trengths), Schwächen (**W**eaknesses), Chancen (**O**pportunities) und Risiken (**R**isks) liefert eine SWOT-Analyse. Dabei erfolgt eine Unterteilung in technische, finanzielle und sonstige SWOTs. Im Zwischenfazit werden Strategien zur Nutzung von Potenzialen der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien abgeleitet.

2.4.1 Stärken

Quasi-ubiquitäre Verfügbarkeit
Umweltwärme (Geothermie, Solarthermie) ist quasi ubiquitär verfügbar, sofern entsprechende Freiflächen zur Verfügung stehen. Die Verfügbarkeit von Geothermie wird hauptsächlich eingeschränkt durch Überbauung, die Beschaffenheit des Untergrunds sowie ggf. GewässerschutzKap. 6. Da Wärmepumpen, vor allem mit Flächenabsorbern, nicht überbaut bzw. überpflanzt werden dürfen – außer mit Flachwurzlern wie z. B. Rasen –, werden Grünflächen erhalten oder zusätzlich geschaffen.

Erneuerbare Energie und regionale Wertschöpfung
Mit steigender JAZ steigt auch der EE-Anteil am Heizwärmebedarf und reduziert den Anteil fossiler Energien. Wärmepumpen tragen somit zum Erreichen langfristiger (Klimaschutz-)Ziele auf nationaler und internationaler Ebene bei. Zudem implizieren sie eine höhere regionale Wertschöpfung, da die für die Beheizung anfallenden (Gesamt-)Kosten zum größten Teil als Personalkosten anfallen und nicht als Brennstoffkosten. Bei Brennstoffkosten liegt ein Großteil der Wertschöpfung außerhalb der Landesgrenze, bei Kosten für Personal und Anlagen meist bei regionalen Unternehmen.

Wärmepumpen stellen, neben der Nutzung von Biomasse, nach heutigem Stand der Technik eine der wichtigsten Varianten zur Wärmeerzeugung mit Erneuerbaren Energien dar (Abschn. 2.3.2). Ein wichtiger Vorteil von Wärmepumpen ist, dass für den Transport des Energieträgers (elektrischer Strom) keine zusätzliche Energie aufgewendet werden muss.

Zudem profitieren (elektrische, über das öffentliche Netz versorgte) Wärmepumpen unmittelbar von einem steigenden Anteil an Erneuerbaren Energien im öffentlichen Stromnetz, welcher auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene als langfristiges Ziel verankert ist. Mit steigendem Anteil Erneuerbarer Energien sinken auch die spezifischen Emissionen und letztendlich die Emissionen zur Bereitstellung von Heizwärme mittels Wärmepumpen.

Konstanter Wirkungsgrad
Oberflächennahe Geothermie stellt Wärme unabhängig von Wetter und Jahreszeit mit konstanter thermischer Leistung (und annähernd konstantem Wirkungsgrad und somit elektrischer Leistung) zur Verfügung. Dies stellt einen deutlichen Vorteil gegenüber Systemen dar, die die benötigte Umgebungswärme aus der Luft beziehen, z. B. Luft-Wasser-Wärmepumpen, die dann Maximalleistungen abrufen, wenn die Umgebungstemperatur niedrig und somit der Wirkungsgrad der Anlage gering ist.

Niedrige Betriebskosten (Erdsonden)
Zur Bereitstellung der Quellwärme in der Wärmepumpe können Kollektoren und Erdsonden bzw. Mischformen daraus eingesetzt werden. Einmal installiert, verursachen diese kaum Betriebskosten (Abschn. 2.3.5). Die verfügbare Wärme wird, abgesehen vom geringen Pumpenstrom, kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Die Stromkosten zum Betrieb von Wärmepumpen sind (bezogen auf 1 kWh Wärme) aktuell ca. 4-mal höher als die Wärmekosten beim Betrieb einer Brennwerttherme. Dies bedeutet, dass ab einer JAZ von 4 eine Wärmepumpe günstiger ist als eine Erdgasheizung (bezogen auf den Arbeitspreis; Abschn. 2.3.2). Die JAZ ist stark abhängig von den in Abschn. 2.3.3 dargestellten Faktoren.

Nur ein Netzanschluss
Ein weiterer (für den Endnutzer indirekter) Vorteil von Wärmepumpen ist, dass nur ein Netzanschluss und folglich auch nur ein Netz benötigt wird, in diesem Fall das elektrische. Da dieses zur Grundversorgung gehört, entfallen effektiv die Anschlusskosten für Endnutzer. Auf Netzbetreiberebene entfallen z. B. bei Erdgas die Installations- und Instandhaltungskosten für das Erdgasnetz, wenn keine weiteren (Letzt-)Verbraucher im betreffenden Gebiet angeschlossen sind. Solche (Letzt-)Verbraucher sind vor allem im Bereich der Industrie und des (metall)verarbeitenden Gewerbes zu finden, die nur in Ausnahmefällen mit Wohngebieten gemischt sind.

Kein Platzbedarf im Gebäude
Im Gegensatz zu den oben erwähnten erdgasbetriebenen Heizsystemen benötigen erdölbefeuerte Systeme neben dem Platz zum Aufstellen des Brenners auch Platz für die Brennstofflagerung. Gleiches gilt für Systeme, die mit Biomasse, Flüssiggas oder anderen vor Ort zu lagernden Energieträgern befeuert werden. Im Gegensatz dazu benötigen Wärmepumpen keine solchen Flächen in und an Gebäuden. Dadurch entsteht mehr nutzbare Fläche im Keller (Erdöl, Biomasse) bzw. auf dem Grundstück (Flüssiggas). Gegenüber Flüssiggas entfallen auch Restriktionen aufgrund von Sicherheitsabständen. Alternativ können Neubauten kleiner dimensioniert werden, bei gleicher Nutzfläche und geringerem A/V-Verhältnis und somit niedrigeren Transmissionswärmeverlusten.

2.4.2 Schwächen

Platzbedarf (Kollektoren)
Wohl die größte Hürde bei der Nutzung von Oberflächennaher Geothermie für Immobilien mittels Kollektoren stellt der Platzbedarf dar. Dieser ist stark vom Gebäude abhängig, kann aber mit dem ca. 1,5- bis 2-fachen der Wohnfläche geschätzt werden. Diese Fläche kann zwar (weiterhin) als Grünfläche (Rasen) genutzt werden, darf aber nicht versiegelt oder mit tiefwurzelndem Bewuchs bepflanzt werden.

Wirkungsgrad (COP)
Kollektoren haben einen eher geringen Wirkungsgrad, da sie i. d. R. per Bagger in das Erdreich eingebracht werden und nur 1–2 m tief liegen. Hierdurch senkt sich vor allem im Winter, dem Zeitpunkt des höchsten Wärmebedarfs, das Temperaturangebot und damit der Wirkungsgrad bzw. COP (DCTI, 2012). Kollektoren sind vor allem bei Neubauten effektiv, wenn sie bei ohnehin erforderlichen Erdarbeiten tiefer in das Erdreich eingebracht werden können. Eine weitere Option sind Erdpfähle (Sonden), die relativ einfach bis zu 100 m tief reichen können. Allerdings sind diese mit höheren Investitionskosten verbunden – und zwar sehr haltbar, doch nachträglich bei Bedarf schwerer instand zu setzen.

Anforderungen an Bewohner (Bauphase)
Insbesondere Erdsonden stellen während der Bauphase hohe Anforderungen an die Bewohner. Die Herstellung des Bohrlochs bedarf i. d. R. nur einer Anmeldung beim zuständigen Amt, verursacht aber einen erheblichen (vorübergehenden) Eingriff in die direkte Umgebung (Herstellung Bohrplatz) und die Behaglichkeit der Bewohner. Dieser Eingriff kann u. U. mehrere Wochen andauern. Nähere Informationen hierzu enthalten die Beiträge in den Bereichen Technik, Durchführung und Organisation.

Investitionskosten (Erdsonden, Flächenheizungen)
Erdsonden erfordern die höchsten Investitionskosten unter den Erschließungsvarianten für Wärmequellen. Die Kosten für ein Einfamilienhaus mit 150 m^2 liegen für Wärmepumpe und Erdsonden bei ca. 30.000 Euro. Die Kosten für eine Kollektor-Wärmepumpe liegen bei 22.500 Euro. Dem gegenüber stehen Investitionskosten für eine Erdgasbrennwertheizung von ca. 8250 Euro für dasselbe Objekt (BMVBS 2012; Abb. 2.10). Die Lebensdauer der Wärmepumpe ist mit 15 Jahren kürzer als die der Erdgasbrennwertheizung (20 Jahre). Die Lebensdauern von Erdsonde bzw. Kollektoren, die zwischen 50 % und 30 % der Investitionskosten bei Nutzung Oberflächennaher Geothermie ausmachen, liegen bei rd. 60 Jahren (BKI 2015). Um vor allem die hohen Erstinvestitionen abzufedern, stehen für WPS Fördermittel des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und der Kreditbank für Wiederaufbau (KfW) zur Verfügung (Abschn. 2.2.3).

Die Übertragung der Wärme mittels Flächenheizung, i. d. R. Fußbodenheizungen, erlaubt niedrigere (Vorlauf-)Temperaturen und somit günstigere COP und Gestehungskosten

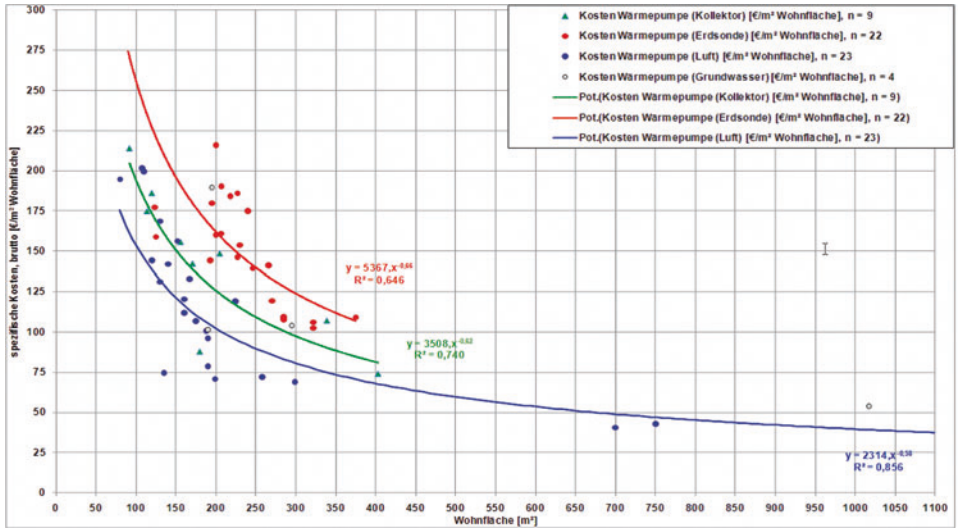


Abb. 2.10 Spezifische Kosten (Erstinvestition) von Wärmepumpensystemen pro m^2 WF. (© BMVBS 2012, S. 45)

für die Wärme (Abschn. 2.3.2). Allerdings sind Flächenheizungen – vor allem im Bestand – nur mit deutlich höheren Investitionen realisierbar als eine Wärmeübertragung mit konventionellen Heizkörpern. Energieversorgungsunternehmen könnten sich an den Investitionskosten (v. a. bei Bestandsgebäuden) beteiligen, um z. B. langfristige Abnahmeverträge für Strom anzubahnen. Eine prototypische Ausführung an einem typischen Bestandsgebäude kann helfen, Unsicherheiten in der Kalkulation einzugrenzen.

2.4.3 Chancen

Autarkie

Durch Wärmepumpen sind prinzipiell autarke Gebäude möglich, welche die gesamte benötigte Endenergie oder einen Großteil davon vor Ort bereitstellen können. Hierfür stehen neben Wärmepumpen und Erdsonden auch PV-Anlagen zur Bereitstellung elektrischer Energie zur Verfügung (alternativ vor Ort erzeugte Biomasse in KWK-Anlagen o. Ä.). Um Unterschiede zwischen Erzeugung und Verbrauch ausgleichen zu können, werden Speicher benötigt (Abschn. 2.3.4). Diese können entweder elektrische Energie direkt oder in Form von Wärme speichern. Hierzu bieten sich Akkumulatoren (elektrisch) und Wasserspeicher (thermisch) an. Auch das Gebäude selbst kann durch eine intelligente Regelung einen Teil der (Produktions-)Überschüsse auffangen und in Zeiten mit höherem Bedarf (z. B. nachts) transferieren. Prinzipiell können Gebäude, je nach Grad der Autarkie, so unabhängig von fossilen Energieträgern wie Gas und Erdöl bzw. generell von Energielieferungen durch EVU sein.

Kombinierte Systeme

Kann bzw. soll keine vollkommene Autarkie erreicht werden, können Wärmepumpen auch in (komplexere Heiz-)Systeme integriert und dadurch Synergien genutzt werden (Abschn. 2.3.5, EV3). Hier wäre z. B. eine Kombination mit einem Fernwärmenetz denkbar, allerdings nicht im (wärmeren) Vorlauf, sondern mit dem (kälteren) Rücklauf als Wärmequelle (Abschn. 2.3.5, EV4). Diese Lösung bietet für den Endnutzer den Vorteil vergleichsweiser hoher Quelltemperaturen (je nach stromaufwärts angeschlossenen Wärmeverbrauchern) und einer einfacheren Erschließung der Quellwärme. Für den Energieversorger bzw. Netzbetreiber beutet dies weitere Abnehmer bzw. Netzabgaben und geringere Rücklauftemperaturen, die sich mit einem höheren Wirkungsgrad des (zentralen) Wärmeerzeugers (z. B. Heizkraftwerk) niederschlagen.

Ein weiteres Potenzial stellen die i. d. R. elektrisch betriebenen Wärmepumpen zur Nutzung von elektrischem Strom aus PV-Anlagen dar. Die dadurch bereitgestellte Wärme kann entweder direkt genutzt oder in Puffern (Abschn. 2.3.4) gespeichert werden. Auch wäre hier eine Kopplung mit PV-Anlagen denkbar, bei denen die EEG-Förderung bereits ausgelaufen ist (21+ Betriebsjahr, §§ 22 EEG) (BMWi 2017d).

Entlastung des Stromnetzes (Regelenergie)

Über den Nutzen für (direkte) Anwender kann bei elektrischen Wärmepumpen auch das Stromnetz von Wärmepumpen profitieren. Der Wärmebedarf in Gebäuden unterliegt deutlich größeren Toleranzgrenzen (Behaglichkeit) als das elektrische Netz. Dies erlaubt grundsätzlich, die Wärmepumpe netzgeführt zu betreiben. So werden zum einen die Behaglichkeitsgrenzen des Gebäudes (höchste Priorität) eingehalten. Zum anderen richtet sich der Betrieb der Wärmepumpe nach dem Angebot im elektrischen Netz, sodass dieses entlastet wird. Durch den Einsatz von Pufferspeichern bestehen weitere Potenziale zur zeitlichen Verschiebung der elektrischen Last der Wärmepumpe unter Einhaltung der Behaglichkeit.

Der „SG-ready-Standard“ bei elektrischen Wärmepumpen unterstützt solche Betriebszustände und wird seit 2012 vom Bundesverband Wärmepumpen (BWP) vergeben. Diese netzdienlich aufgenommene Energie stellt dann Regelenergie für das elektrische Netz dar. Allerdings ist nur ein Teil der Leistung als Regelenergie handelbar, da diese garantiert zu jedem Zeitpunkt abgenommen werden muss – auch im Sommer. Ein entsprechender neuer Typ an Regelenergie wäre denkbar, um dieses Problem zu lösen. Die oft sehr kleingliedrige Struktur aus vielen einzelnen Wärmepumpen stellt ein weiteres Hindernis zur Nutzung als Regelenergie dar. Neue IT-Anwendungen im Bereich Smart Metering können hier zu einer Lösung beitragen.

Kühlung

Neben der Beheizung von Gebäuden können Wärmpumpen Räume im Bedarfsfall auch kühlen. Dies ist vor allem relevant bei Gebäuden mit großen, nach Süden ausgerichteten Räumen, bei denen ein großer Wärmeeintrag während der Kühlperiode auftritt.

Bei passiver Kühlung wird das Trägermedium im Heizkreislauf (i. d. R. Wasser) durch das Heizsystem gepumpt. Dieses ist kühler als der Raum und nimmt über die Heizflächen Wärme auf. Diese wird über den Rücklauf zur Wärmepumpe transportiert und über die Erdsonde bzw. den -kollektor an den Boden abgegeben. Hierzu ist ein entsprechender Wärmetauscher im Sole-Kreislauf erforderlich. Mittels passiver Kühlung kann die Raumtemperatur um 2–3 °C abgesenkt werden, da dann bereits die nötigen Vorlauftemperaturen erreicht werden. Die minimale Vorlauftemperatur beträgt 18 °C, bei Flächenheizungen ca. 15–20 °C. Die entsprechende Kühlleistung ist auf ca. 25–50 W/m^2 begrenzt. Bei der Ausführung ist auf entsprechende Beständigkeit der Materialien sowie die Taupunkttemperatur zu achten.

Kann der Bedarf an Kühlleistung mittels passiver Kühlung nicht mehr gedeckt werden, kann die Wärmepumpe hydraulisch invertiert werden. Dies bedeutet, dass der Wärmestrom vom Gebäude in die Erde fließt. Hierzu sind Sole-Wasser-Wärmepumpen nötig. Solche definierten Kühlleistungen sind aufgrund der höheren Investitions- und Betriebskosten bisher fast ausschließlich in Nicht-Wohngebäuden zu finden, wie z. B. Büro- oder Produktionsgebäuden.

Klimaschutz

Aus Sicht des Klimaschutzes stellen elektrische Wärmepumpen dann eine günstige Alternative dar, wenn die (CO_2-)Emissionen und der Primärenergiebedarf geringer sind als bei konventionellen Heizsystemen (z. B. Erdgasheizungen). Die primärenergetische Bewertung hängt von mehreren Faktoren ab:

- Primärenergetischer Bedarf der Wärmepumpe: PEF_{Strom}/JAZ
- Primärenergetischer Bedarf einer Erdgas-Heizung: PEF_{Erdgas}/η

Eine Studie des Fraunhofer ISE geht im Bestand von einer JAZ von 3,3 aus (Fraunhofer 2011). Bei aktuellen Modellen werden JAZ von 4,5 erreicht (vgl. BAFA-Förderrichtlinie), somit kann von einer weiteren (geringen) Steigerung der JAZ ausgegangen werden.

- Primärenergiefaktor Strom (PEF_{Strom}): Der PEF_{Strom} für Strom wird jährlich vom Umweltbundesamt erhoben und sinkt aufgrund des steigenden Anteils an Erneuerbaren Energien. Dies wurde auch in der EnEV16-Novellierung (Abschn. 2.2.1) berücksichtigt.
- Wirkungsgrad Erdgasheizung (η): Der Wirkungsgrad von Erdgasheizungen kann über das Jahr gemittelt mit 95 % angenommen werden (DIN 18599-6 Anhang A).
- Primärenergiefaktor Erdgas (PEF_{Erdgas}): Der PEF_{Erdgas} für Erdgas, der die Energieaufwendungen für Förderung, Transport und Herstellung berücksichtigt, liegt bei 1,1 (DIN 18599-1).

Setzt man die obigen Gleichungen gleich, die entsprechenden Werte ein und stellt nach PEF_{Strom} um, ergibt sich Folgendes:

$$PEF_{Strom} = (PEF_{Erdgas} \cdot JAZ)/\eta$$

$$PEF_{Strom} = \frac{1{,}1 \cdot 3{,}3}{0{,}95} = 3{,}8$$

Dies bedeutet, dass ab einem PEF_{Strom} von 3,8 der Primärenergiebedarf einer Wärmepumpe bzw. von Geothermie geringer ist als bei Erdgasheizungen. Mit der EnEV16-Novellierung wurde der Primärenergiefaktor ab 01.01.2016 auf 1,8 abgesenkt. Folglich stellt eine geothermale Wärmepumpe eine primärenergetisch günstigere Lösung zur Beheizung von Wohngebäuden dar als Erdgasheizungen.

Analoges gilt für den Fall, dass durch den Einsatz von Geothermie bzw. einer Wärmepumpe Emissionen reduziert werden sollen. Bei elektrischen Wärmepumpen, die über das öffentliche Stromnetz versorgt werden, müssen die hierfür geltenden Emissionsfaktoren genutzt werden. Diese schließen neben CO_2 auch andere Luftschadstoffe wie z. B. SO_2 ein. Diese Emissionen sind bei Strom aus Erneuerbaren Energien deutlich geringer (oder null). Deshalb profitiert eine netzgebundene, elektrische Wärmepumpe von einem Netzangebot mit einem hohen Anteil Erneuerbarer Energien (UBA 2008). Somit führen die sinkenden Emissionen im deutschen Strommix auch direkt zu emissionsärmeren Betrieben von Wärmepumpen (UBA 2015)

2.4.4 Risiken

Nutzerverhalten
Wie bei jedem technischen Wandel ist die Nutzerzufriedenheit im Einzelfall schwer zu prognostizieren. Wärme und Behaglichkeit sind grundlegende Bedürfnisse des Menschen. Nutzer haben unterschiedliche Anforderungen an Behaglichkeit, die subjektiv wahrgenommen wird. Das Zusammenspiel von Gebäude, Wärmeerzeugung und Nutzern ist durchaus komplex. Im Neubau, mit aufeinander abgestimmten Baustoffen und Systemen, ist dies leichter kontrollierbar als bei Bestandsgebäuden.

Kooperationsbereitschaft
Voraussetzung für das Gelingen von Wandel ist die Kooperationsbereitschaft aller Beteiligten, v. a. bei kleingliedriger Eigentümerstruktur. Kommunikation zwischen Eigentümer, Nutzer, Kommune und Versorger ist hierfür wesentlich. Unterschiedliche Auffassungen treten in der Praxis insbesondere hinsichtlich Flächen, Erschließung und Wärmeübertragung auf.

Gewässerschutz
Anlagen in wasserwirtschaftlich sensiblen Gebieten bzw. Verhältnissen sind grundsätzlich nur in Ausnahmefällen und unter zusätzlichen Auflagen und Nebenbestimmungen

genehmigungsfähig. Zu diesen Gebieten zählen vor allem Wasser- oder Heilquellenschutzgebiete, Flächen mit Untergrundkontaminationen und Einzugsgebiete von Grundwassernutzungen, für die Trinkwasserqualität erforderlich ist. Das Thema Umwelt- und Gewässerschutz wird näher in Kap. 5 und 6.

Bohrrisiko und Genehmigung

Bei einer Bohrung treten neben den üblichen technischen Risiken, wie z. B. technologischem Wandel, Innovationssprüngen, und daraus resultierend Amortisationszeiten, auch spezifische Risiken auf. Diese betreffen sowohl die Bohrung selbst, als auch die Umgebung. Diese Risiken werden genauer in Kap. 7 dargestellt.

Aus Sicht eines Bauherrn sind vor allem die erforderlichen Genehmigungen relevant. Wie andere Bauprojekte auch müssen Erdbohrungen für Wärmepumpen bei Kreisverwaltungsbehörden angezeigt werden. Diese sind nach folgenden Gesetzen auf Bundesebene anzeigepflichtig:

- Wasserrecht (WHG)
- BBergG (bei mehr als 100 m Bohrtiefe)

Hinzu kommen ergänzende Gesetze auf Landesebene. Eine detaillierte Betrachtung der rechtlichen Aspekte bei Oberflächennaher Geothermie findet sich in Kap. 8 und 9.

Verpresssuspension

Neben dem Bohrrisiko stellt die Verpressung ein weiteres Risiko dar. Hier ist eine ausreichende Aushärtungsdauer der Suspension nötig (i. d. R. 1 Monat), um Risse in der Suspension zu verhindern. Zudem muss in der ersten Heizperiode darauf geachtet werden, dass die Erdsonde nicht überlastet wird, da ein Teil der aufgenommenen Energie für die Trocknung der Suspension aufgewandt wird. Sollte ein früherer Betrieb der Erdsonde (Start vor Beginn der Heizperiode) nicht zur vollständigen Trocknung und somit zum Ausschöpfen der maximalen thermischen Leistung ausreichen, ist eine zusätzliche Wärmequelle (z. B. elektrische Heizlüfter) für das Gebäude vorzusehen. Folgen der Überlastung können u. a. Frostschäden am Verpresskörper sein, also einer Zerstörung des festen Ringraumverpresskörpers. Durch zu geringe Temperaturen in diesem können Schäden, ähnlich den Frostschäden bei Betonteilen über Tage, verursacht werden. Diese geringen Temperaturen treten vor allem durch zu geringe Temperaturen des Wärmeträgers in der Erdsonde auf (BWP 2012).

Strompreis

Die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen ist in hohem Umfang abhängig vom Strompreis. Allerdings besteht in gewissem Umfang die Möglichkeit für Autarkie, insbesondere in Verbindung mit PV (Abschn. 2.4.3). Hier können durch eine intelligente Steuerung (vgl. „SG ready“, Abschn. 2.4.3) und eine passende Dimensionierung der Speicher der Eigenverbrauch und/oder die Betriebskosten optimiert werden.

2.4.5 Zwischenfazit: Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien

Die SWOT-Analyse in Tab. 2.17 fasst die Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien zusammen. Darin sind auch einige Strategien zum Nutzen der Stärken und Chancen (SO-Strategien), zur Minderung von Schwächen und Nutzen der Chancen (WO-Strategien), zum Nutzen der Stärken und Abwenden von Risiken (ST-Strategien) und zum Mindern der Schwächen und Meidung von Risiken (WT-Strategien) dargestellt. Die Darstellung ist als Anregung zu sehen. Im Einzelfall können weitere SWOT und entsprechende Strategien resultieren. Bestimmte Strategien können mehreren Feldern zugeordnet werden. Zur Wahrung der Übersicht sind sie jeweils nur einmal an der jeweils prägnantesten Stelle dargestellt.

Die LZK von WPS sind aufgrund der kürzeren Lebensdauer der Wärmepumpen, die empirisch noch nicht sicher erhoben sind, tendenziell höher als bei anderen Systemen der Wärmeerzeugung (Abschn. 2.3.5). Gegenwärtige Annahmen zu Lebensdauern basieren auf Anlagen im Bestand, die nicht dem neusten Stand der Technik entsprechen.

Um den Anteil von WPS (bei neu errichteten Wohngebäuden ca. 20 % in Deutschland 2014; vgl. Abschn. 2.3.2) im Neubau und Bestand zu vergrößern, sind vor allem funktionierende Finanzierungs- und Risikotransfersysteme und weiterentwickelte Stromtarife entscheidend. Ein entsprechender neuer Typ an Regelenergie wäre denkbar, um die Wirtschaftlichkeit von WPS zu erhöhen. Wertschöpfungspartnerschaften zwischen Systemherstellern und EVU können hierbei ebenfalls unterstützend wirken. Bestehende Förderprogramme sollten, ebenso wie Vorteile, Synergien und Wirtschaftlichkeit der Systeme, den Nutzern und Betreibern von Immobilien einfacher kommuniziert werden. Die meisten Bundesländer stellen Leitfäden zur Erstellung Oberflächennaher Geothermieanlagen bereit. Diese helfen wenig erfahrenen Bauherren, optimale und gesetzlich vorgegebene Abläufe einzuhalten.

EVU könnten sich ggf. an den Investitionskosten (v. a. bei Bestandsgebäuden) beteiligen, um z. B. langfristige Abnahmeverträge für Strom anzubahnen. Eine prototypische Ausführung an einem typischen Bestandsgebäude, auch in Kooperation mit EVU, kann ggf. dazu beitragen, Unsicherheiten in der Kalkulation und im Nutzerverhalten (Behaglichkeit) einzugrenzen.

Forschung und Wissenschaft könnten besonders zu effizienten Mischformen aus Erdsonden und Kollektoren sowie dem Einsatz intelligenter Speichern in WPS beitragen. Neue IT-Anwendungen im Bereich Smart Metering können helfen, die oft sehr kleingliedrige Struktur aus vielen einzelnen Wärmepumpen zu überwinden, die ein Hindernis zur Nutzung als Regelenergie in Energienetzen darstellen.

Oberflächennahe Geothermie kann einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten. Die heute im Bereich von größeren Immobilien und Quartieren weiter verbreitete KWK ist nur bedingt erneuerbar, mit Emissionen verbunden und Brennstoffe sind nicht ubiquitär vorhanden. Zum 01.01.2016 wurde ein neues KWK-Gesetz erlassen, das KWK mit weiteren Fördermitteln stärkt. Geothermie ist (wie Solarthermie) erneuerbar, ggf. bis auf die

Tab. 2.17 SWOT-Analyse Oberflächennahe Geothermie für Immobilien. (Eigene Darstellung)

	Intern		
		Stärken (S) • Quasi-ubiquitäre Verfügbarkeit • Erneuerbare Energie und regionale Wertschöpfung • Konstanter Wirkungsgrad • Niedrige Betriebskosten (Erdsonden) • Nur ein Netzanschluss • Kein Platzbedarf im Gebäude	**Schwächen (W)** • Platzbedarf (Kollektoren) • Wirkungsgrad (COP) • Anforderungen an Bewohner (Bauphase) • Investitionskosten (Erdsonden, Flächenheizungen)
Extern	**Chancen (O)** • Autarkie • Kombinierte Systeme • Entlastung des Stromnetzes (Regelenergie) • Kühlung • Klimaschutz	**SO-Strategien** • Einsparungen/Synergien und weitere Chancen quantifizieren und bewerben • Stromnetz gezielt entlasten, Einsatz intelligenter Speicher • Ausführende Firmen stärker vernetzen, Wertschöpfungspartnerschaften realisieren	**WO-Strategien** • Kommunikation von Vorteilen und Beeinträchtigungen • Finanzielle Anreize ausweiten/kommunizieren/bündeln (Förderatlas) • Tools für (einfache) Wirtschaftlichkeitsrechnungen (Lebenszykluskosten und -erlöse) und Darstellung von Klimaschutzeffekten bereitstellen
	Risiken (T) • Nutzerverhalten • Kooperationsbereitschaft • Gewässerschutz • Bohrrisiko • Verpresssuspension • Strompreis	**ST-Strategien** • Nutzer gezielt informieren • Experten nach neuesten Erkenntnissen aus- und weiterbilden • Erkenntnisse aus Forschung und Wissenschaft nutzen • Strombeschaffung/-erzeugung optimieren • Neue Stromtarife mit EVU/Contractoren entwickeln	**WT-Strategien** • Kollektoren, Wärmepumpe, Heizsysteme optimieren • Kommunikation von Vorteilen und Beeinträchtigungen • Lösungen mit Versicherungsunternehmen und EVU entwickeln • Investitionen durch Crowdfunding (lokal/regional/über-regional) aktivieren • Nutzer gezielt informieren

Stromerzeugung zum Betrieb der Wärmepumpen emissionsfrei und prinzipiell ubiquitär. Gegenüber Solarthermie bietet Geothermie den wichtigen Vorteil, dass sie kontinuierlich verfügbar ist.

2.5 Zusammenfassung und Ausblick

WPS bieten beträchtliche Potenziale für den Einsatz in Gebäuden und Quartieren. Sie sind vor allem im EFH-Neubausegment in Deutschland mit einem Anteil von ca. 20 % eine verbreitete Form der Wärmeerzeugung. Die Wärmeerzeugung durch WPS ist erneuerbar, ggf. bis auf die Stromerzeugung zum Betrieb der Wärmepumpen emissionsfrei und prinzipiell ubiquitär. WPS stellen über intelligente Speicher eine interessante Schnittstelle von Gebäude und Stromnetz dar. Aus ökologischer Sicht sind stromnetzgebundene WPS günstig, da diese automatisch von technischen und prozessualen Verbesserungen in der Stromerzeugung, wie z. B. geringeren Primärenergie- oder Emissionsfaktoren, profitieren. Wertschöpfungspartnerschaften zwischen WPS-Herstellern und EVU können Einsparungen, Synergien und weitere Chancen ergeben. Innovative Lösungen können besonders zu effizienten Mischformen aus Erdsonden und Kollektoren, dem Einsatz intelligenter Speicher und neuen IT-Anwendungen im Bereich Smart Metering führen. Allerdings sollten nicht zu viele Technologien gleichzeitig kombiniert werden, um stets jede einzelne Anlage genügend auszulasten. Durch neue Finanzierungs- und Versicherungsprodukte könnten operative Risiken weiter gemindert oder übertragen werden.

Fördermittel zum Einsatz Oberflächennaher Geothermie mittels WPS sind in Deutschland prinzipiell durch Bund, Länder und Kommunen vorhanden. Dadurch werden die gegenüber konventionellen Wärmeerzeugungsanlagen höheren Anfangsinvestitionen gemindert. Aufgrund der (rechnerisch) kürzeren Lebensdauer von üblicherweise 15 Jahren sind WPS gegenüber anderen EV im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit benachteiligt. Faktisch könnte die Lebensdauer durchaus länger sein. Allerdings liegen hierüber – im Gegensatz zu anderen Systemen – noch keine empirischen Daten vor, da sich WPS in Deutschland erst seit zehn Jahren mehr und mehr im Einsatz befinden. Die Wirtschaftlichkeit mit Lebenszykluskosten und -erlösen ist für Nutzer, insbesondere Privathaushalte, immer noch schwer einzuschätzen. Im Bestand ist häufig die fehlende Flächenheizung ein Umsetzungshindernis. Beim Einsatz konventioneller Heizkörper wird aufgrund der höheren benötigten Vorlauftemperaturen ggf. entsprechend mehr Pumpenstrom gebraucht.

Ein Tool für (einfache) Wirtschaftlichkeitsrechnungen und zur Darstellung von Klimaschutzeffekten könnte hier Abhilfe schaffen. Auch ein Förderatlas, der lokale, regionale und überregionale Fördermöglichkeiten einschließt, könnte grundsätzlich Impulse für eine größere Verbreitung von WPS in Gebäuden und Quartieren und den stärkeren Einsatz als Regelenergie im Stromnetz bringen.

Literatur

BDEW (Hrsg.): Fakten und Argumente – Entwicklung der Energieversorgung 2015. Berlin (2016)
BDH/ZIV (Hrsg.): Bestand zentraler Wärmeerzeuger für Heizungen in Deutschland nach Kategorie im Jahr 2014; bezogen über statista.de, (2015) Zugegriffen: 04. Febr. 2016
BDI (Hrsg.): Energieeffizienz bei Nichtwohngebäuden: Nichtwohngebäude als wichtige Säule zur Erreichung der Energieeffizienzziele bei Gebäuden. Berlin (2014)
BKI (Hrsg.): BKI Objektdaten Technische Gebäudeausrüstung – Kosten abgerechneter Bauwerke. Stuttgart (2015, 2012)
BMUB (Hrsg.): Leitfaden Nachhaltiges Bauen, 2. Aufl. Berlin (2016)
BMVBS (Hrsg.): Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden – Vergleichswerte für Energieausweise. Berlin (2009)
BMVBS (Hrsg.): Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. BMVBS-Online-Publikation (2011)
BMVBS (Hrsg.): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden. Berlin (2012)
BMVBS (Hrsg.): Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO_2-Minderungspotenzialen. Berlin (2013)
BMWi & BMUB (Hrsg.): Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand. Berlin (2015)
BMWi (Hrsg.): Sanierungsbedarf im Gebäudebestand – Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Berlin (2014)
BMWi (Hrsg.): Aktuelle Informationen der AGEE-Stat; http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/arbeitsgruppe-erneuerbare-energien-statistik.html?cms_artId=239916 (2016a). Zugegriffen: 27. Jan. 2017
BMWi (Hrsg.): Marktanreizprogramm (MAP), http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Foerderung/Marktanreizprogramm/marktanreizprogramm.html;jsessionid=EB9D86A5D4DDEF0953BD851133851619 (2017a). Zugegriffen: 27. Jan. 2017
BMWi (Hrsg.) Förderung im Marktanreizprogramm 2015, KfW-Teil, Programm Erneuerbare Energien Premium, http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/foerderung-im-marktanreizprogramm-2015-kfw.html (2017b). Zugegriffen: 27. Jan. 2017
BMWi (Hrsg.): Informationsangebote, http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiemarkt-und-Verbraucherinformationen/weitere-informationsangebote,did=599070.html (2017c). Zugegriffen: 27. Jan. 2017
BMWi (Hrsg.): EEG 2014, http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-2014,did=680290.html (2017d). Zugegriffen:27. Jan. 2017
BWP (Hrsg.): Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern. Berlin (2012)
DCTI (Hrsg.): Clean Tech Studienreihe – Band 6: Geothermie. Bonn (2012)
Felsmann, C., Schmidt, J.: Auswirkungen der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität – Abschlussbericht, aufgerufen http://www.wohnungswirtschaft-heute.de/dokumente/prof-felsmann-nutzerverhalten-2013-AbschlussberichtVA.pdf (2013). Zugegriffen: 03. Febr. 2017
Fraunhofer ISE (Hrsg.): Feldmessung – Wärmepumpen im Bestand. Freiburg (2011)
IINAS (Hrsg.): GEMIS – Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, http://www.iinas.org/gemis-de.html (2015). Zugegriffen: 03. Febr. 2017
IWU (Hrsg.): Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, 2. Aufl. Darmstadt (2015)

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Gebäude und Wohnungen -Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969–2015; bezogen über destatis.de (2016). Zugegriffen: 03. Febr. 2017

UBA (Hrsg.): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommixes 1990–2013 und erste Schätzungen 2014 im Vergleich zum Stromverbrauch. Berlin (2015)

UBA (Hrsg.): Elektrische Wärmepumpen – eine erneuerbare Energie? Dessau (2008)

Wustlich, G.: „Erneuerbare Wärme“ im Klimaschutz. Zeitschrift für Umweltrecht. **9** (3), 113–121 (2008)

KfW (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Premium, https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Finanzierungsangebote/Erneuerbare-Energien-Premium-%28271-281%29/# (2016). Zugegriffen: 03. Febr. 2017

Geologische und geophysikalische Untersuchungen

3

Kord Ernstson

Inhaltsverzeichnis

3.1 Einführung . . . 67
3.2 Tiefe und Oberflächennahe Geothermie . . . 69
3.3 Geologie und Hydrogeologie in der Oberflächennahen Geothermie . . . 72
3.3.1 Kartenwerke . . . 73
3.3.2 Das digitale Geländemodell (DGM) . . . 81
3.3.3 Etwas Wärme-Physik: Heizung, Kühlung, Speicherung von Wärme und Kälte . . . 90
3.3.4 Offene Systeme . . . 92
3.3.5 Geschlossene Systeme . . . 94
3.3.6 GRT (Geothermal Response Test), geologische und hydrogeologische Rechenmodelle und geologische Risiken . . . 96
3.3.7 Die Fälle Staufen und Böblingen . . . 98
3.4 Wichtige Prinzipien der geophysikalischen Messverfahren . . . 100
3.4.1 Charakteristische Unterschiede bei den Verfahren . . . 100
3.4.2 Erkundungstiefen . . . 105
3.4.3 Auflösungsvermögen . . . 106
3.4.4 Signal-Rausch-Verhältnis S/R . . . 108
3.4.5 Datenverarbeitung . . . 110
3.4.6 Von der Messung zur (hydro)geologischen Aussage: Mehrdeutigkeit geophysikalischer Messungen . . . 118
3.5 Petrophysikalische Parameter . . . 119
3.5.1 Geoelektrik . . . 120
3.5.2 Seismik . . . 122
3.5.3 Bodenradar (Georadar, GPR, *ground penetrating radar*) . . . 123
3.5.4 Gravimetrie . . . 123

Kord Ernstson (✉)
Universität Würzburg Büro für Geophysik, Fakultät für Philosophie I, Am Judengarten 23, 97204 Höchberg, Deutschland
e-mail: kernstson@ernstson.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_3

3.5.5 Geomagnetik . . . 125
3.5.6 Radiometrie . . . 126
3.5.7 Geothermische Parameter . . . 127
3.6 Die Messverfahren . . . 128
3.6.1 Geoelektrik . . . 130
3.6.2 Seismik . . . 149
3.6.3 Bodenradar . . . 164
3.6.4 Gravimetrie . . . 166
3.6.5 Geomagnetik . . . 170
3.6.6 Radiometrie . . . 173
3.6.7 Geothermie . . . 175
3.6.8 Neuentwicklungen . . . 179
3.6.9 Bohrlochgeophysik . . . 180
3.7 Geophysik und der Aquifer . . . 180
3.7.1 Porosität . . . 181
3.7.2 Permeabilität/Transmissivität . . . 181
3.7.3 Kluftporosität und Permeabilität/Transmissivität im Festgestein . . . 184
3.7.4 Grundwasserspiegel . . . 186
3.7.5 Grundwasserfließrichtung und Fließgeschwindigkeit . . . 189
3.7.6 Generelle Grundwasserbewegungen – indirekter Zugang . . . 190
3.8 Geophysik und geologisch-geotechnische Risiken bei der Oberflächennahen Geothermie 191
3.8.1 Tektonik . . . 191
3.8.2 Karst, Verkarstung . . . 194
3.8.3 Salinar: Anhydrit und Gips . . . 196
3.8.4 Hangrutsche . . . 198
3.8.5 Hohlraumortung . . . 199
3.8.6 Altlasten . . . 202
3.9 Geophysik als Dienstleistung . . . 206
3.9.1 Ingenieurgeophysik . . . 206
3.9.2 Unzulänglichkeiten – ein geophysikalisches Beispiel . . . 207
3.9.3 Fehlerquellen und Fehler . . . 209
3.9.4 Ausschreibungen, Berichte und Gutachten . . . 211
3.9.5 Geophysik und Bohrungen . . . 211
3.9.6 Zum Thema Wünschelrute, Erdstrahlen und Verwandtes . . . 213
3.10 Schlussbemerkungen . . . 215
Literatur . . . 216

Zusammenfassung

Leitlinie dieser Ausführungen ist die Auffassung, dass die Oberflächennahe Geothermie und ihre Nutzung ganz primär im geologischen Rahmen des Untergrundes mit seinen lithofaziellen und strukturellen Eigenheiten sowie seinen hydrogeologischen und hydraulischen Parametern angesiedelt ist, was als ein gewisses und notwendiges Gegengewicht zur bisher stark dominierenden Sichtweise des Bauingenieurwesens zu verstehen ist. Diesen geologischen Untergrund mit seinem bekanntermaßen vielfach sehr komplexen Aufbau und mit nicht selten unvorhergesehenen Überraschungen zu erkunden und zu beschreiben und die Ergebnisse den planenden und ausführenden Beteiligten an die Hand zu geben, ist die Aufgabe, der sich die Ausführungen

annehmen werden. Dabei wird die enge Verknüpfung von Geologie und Geophysik besonders herausgestellt und gleichzeitig für ein besseres Verständnis für das jeweils andere Fachgebiet, aber auch für eine zunehmende Öffnung des Ingenieurwesens insbesondere für die überzeugenden Möglichkeiten der Geophysik geworben. Deshalb wird auch auf die Darstellung der theoretischen Grundlagen und Details der Auswertung für z. B. Hydraulik oder geophysikalische Messverfahren nahezu völlig verzichtet und stattdessen einiges über geologische, hydrogeologische und geothermische Karten, übers geologische Kartieren sowie die Möglichkeiten des bisher ziemlich ignorierten digitalen Geländemodells geschrieben. Ein wichtiges Anliegen ist es zu zeigen, dass Geophysik auch ohne Formeln und Gleichungen auskommen kann, aber trotzdem mit der Darstellung von Messvorgängen, Auswertung und geologischer Interpretation ihre ungeheuer vielfältigen Möglichkeiten offenbart. Geologie und Geophysik und ihr zwingend notwendiges Zusammenwirken werden insbesondere bemüht, wenn es um die Erkundung von Aquiferen mit den hydraulisch wichtigen Parametern und die für die Oberflächennahe Geothermie wichtige Bewegung des Grundwassers sowie um das „Vorhersehen“ möglicher geologischer Risiken geht. Geologie und Geophysik in diesem Rahmen der Oberflächennahen Geothermie ist stets auch als Dienstleistung zu sehen, worauf eingegangen wird und wobei auch kritische Betrachtungen nicht ausgespart bleiben.

Schlüsselwörter

Geologie · Hydrogeologie · Hydraulik · digitales Geländemodell · geothermale Systeme · geophysikalische Messverfahren · petrophysikalische Parameter · Geophysik und Aquifer · Geophysik und geologische Risiken · Geophysik und Bohrungen · Dienstleistung

3.1 Einführung

Dem Handbuch Tiefe Geothermie (Bauer et al. 2014) folgt nunmehr das Handbuch Oberflächennahe Geothermie, und wie zwischen der Tiefen und der Oberflächennahen Geothermie einige tausend Meter Erkundungstiefe zu überbrücken sind, liegen beinahe auch Welten zwischen dem, was Geologie und Geophysik zu den beiden Komplexen beitragen oder zumindest beitragen sollten, und für den Autor war es nicht damit getan, im Text für die Tiefe Geothermie (Ernstson 2014) das Wort „tief“ einfach durch „oberflächennah“ zu ersetzen.

Den Herausgebern und dem Verlag ist nicht wenig zu danken, dass sie dem Vorschlag des Autors wiederum gefolgt sind, Geologie und Geophysik in einem gemeinsamen Kapitel miteinander zu verbinden, was bei der Oberflächennahen Geothermie fast noch zwingender erscheint, wenn nach wie vor festzuhalten ist, dass zwischen Geologie und

Geophysik eher das Trennende denn das Verbindende besteht. Das wird auch offenkundig im Hinblick auf den Umstand, dass Geologie bei der Oberflächennahen Geothermie fast immer Ingenieurgeologie und Geotechnik bedeutet und letztlich das Ingenieurwesen stark im Vordergrund steht, das den Untergrund bei der geothermalen Erschließung vor allem als Baugrund und nicht als einen geologischen Körper sieht. Das kann kaum besser ausgedrückt werden als durch eine unlängst erschienene Empfehlung zu Planung, Bau, Betrieb und Überwachung bei der Oberflächennahen Geothermie: Von 290 Seiten nimmt der Abschnitt „*Grundlagen der Geologie, Hydrogeologie und Geotechnik*“ gerade einmal 7,5 Seiten ein, von denen wiederum 4 Seiten mit Tabellen zur Wärmekapazität von gefrorenen und nicht gefrorenen Böden bedruckt sind. Darüber hinaus tritt auf den 290 Seiten des Buches das Wort „Geophysik“ oder „geophysikalisch“ nicht ein einziges Mal auf. Das soll im vorliegenden Beitrag nicht dadurch kompensiert werden, dass beim Lesen Berge von geologischem und geophysikalischem Fachwissen aufgetürmt werden. Der Beitrag wird weder ein Lehrbuch der Geologie noch eins der Geophysik sein. Einfache Formeln lassen sich an einer Hand abzählen, und selbst die einzelnen, dennoch vielen geophysikalischen Messverfahren werden knapp vorgestellt und die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten eher in ihrer Bedeutung für Geologie und Hydraulik denn als Anleitung zum Selbermachen herausgestellt. Das wird auch dadurch betont, dass bei der Geophysik nicht die einzelnen Verfahren gleich am Anfang stehen, sondern generell in einer Art Klassifizierung Prinzipien, Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Probleme beim Messen, Auswerten und geologischen Interpretieren vermittelt werden. Darauf vorbereitend und mit ähnlicher Absicht verstehen sich die Ausführungen zu den geologischen Untersuchungen als Vermittlung von bestimmten Themenkomplexen: nutzbare und nützliche Kartenwerke, geologische Kartierung sowie ausführlicher das bisher so wenig genutzte digitale Geländemodel (DGM). Wenig wird zur Technik der geothermischen Nutzung an sich geschrieben, was anderen Buchkapiteln vorbehalten ist. Ziel ist letztlich, in aller Deutlichkeit zu vermitteln, dass der geothermische Untergrund primär eben nicht nur Baugrund, sondern ein geologischer Komplex ist, für den das Verbindende von Geologie und Geophysik so wichtig, aber bisher auch so vernachlässigt worden ist. Nicht ausgespart werden Versäumnisse und Fehlleistungen aufseiten der Geophysik, wenn es immer wieder darum geht, dass Geophysik in diesem Komplex der Oberflächennahen Geothermie auch und vor allem als Dienstleistung zu verstehen ist. In diesem Rahmen soll beim Lesen ein vertieftes Verständnis für die Geophysik entwickelt werden, wobei das meiste nicht als graue Theorie erscheinen soll, sondern angestrebt wird, mit vielen Prinzipien und Anwendungsmöglichkeiten die Materie relativ einfach verständlich zu machen. Deshalb wird auch darauf verzichtet, sich übermäßig auf die unübersehbare Flut von Untersuchungen und Publikationen auf der ganzen Welt zu den verschiedensten Zusammenhängen der Geothermie mit Geophysik, Geologie, Hydrogeologie und Hydraulik zu beziehen, um ein dickes Literaturverzeichnis zu füllen, das hier schwerpunktmäßig vor allem neuere Erkenntnisse und Ansätze zitiert.

3.2 Tiefe und Oberflächennahe Geothermie

In Deutschland wird gemeinhin ein Unterschied zwischen der Oberflächennahen und der Tiefen Geothermie gemacht, wobei etwas willkürlich und vielleicht nicht sehr glücklich eine Grenze der Nutzung der Erdwärme bei 400 m Tiefe gezogen wird. Bei einer Oberflächentemperatur von 10 °C und bei einem Temperaturgradienten von 3 °C/100 m kommt das ganz grob einer Temperatur von 20 °C in dieser Tiefe gleich. Die „Tiefe Geothermie" (Bauer et al. 2014) überschreitet diese Tiefe und diese Temperatur bei Weitem und ist eher im Bereich einige 1000 m Tiefe und Temperaturen der Größenordnung 100 °C und höher angesiedelt. Etwas schwammig wird gelegentlich auch eine „mitteltiefe Geothermie" definiert, die bei 400 m Tiefe einsetzt und ab grob 1000 m Tiefe fließend in die „Tiefe Geothermie" übergeht. Die vorbereitenden und begleitenden Untersuchungen und Messungen der Geologie und Geophysik, wie sie im *Handbuch Tiefe Geothermie* beschrieben werden (Ernstson 2014), implizieren gleichfalls einen fließenden Übergang der Methoden, der sich allerdings an keiner Metergrenze orientiert. Generell ist eine Tiefe von mehreren hundert Metern für viele Verfahren der Geophysik bereits „Tiefe Geophysik", bei der die Rolle der Reflexionsseismik eine zunehmend wichtige Rolle spielt und deshalb auch auf das besondere Kapitel Reflexionsseismik im *Handbuch Tiefe Geothermie* verwiesen wird.

Der Unterschied ist dennoch enorm, wenn an Untersuchungstiefen von einigen 1000 Metern bei der Tiefen Geothermie und wenigen Metern und Dekametern der meist praktizierten Oberflächennahen Geothermie gedacht wird. Das betrifft sowohl die Geologie als auch die Geophysik. Korrespondierend unterscheiden sich die Untersuchungs*flächen* eminent, die in der Frühphase der Tiefen hydrothermalen oder petrothermalen Geothermie gut und gerne 50–100 km^2 ausmachen, am anderen Ende ein Gartengrundstück von 1000 m^2 für die Installation von Erdwärmekollektoren oder Erdwärmesonden betreffen können. Fließend ist auch der Erkenntnisgewinn der Geologie und Hydrogeologie, der mit zunehmender Tiefe im Allgemeinen und meist deutlich immer schlechter wird und zunehmend auf Extrapolationen in die Tiefe angewiesen ist.

Bei der Geophysik ist die Veränderung ihrer Erkundungsmethodik und der Messgeräte mit der Tiefe besser fassbar, da sie sich vielfach recht gut aus der Physik und mit Formeln ableiten lässt. Bei den Potentialverfahren der Gravimetrie und Geomagnetik stehen im Nenner der Formeln für die Wirkung von Störkörpern Exponenten zwischen 1 und 4 für die Tiefe Z, und entsprechend unterschiedlich rasch können die Messwerte für zunehmende Tiefen Z kleiner werden. Das Modellbeispiel in Abb. 3.1 für die Gravimetrie macht deutlich, dass ein 100 m tiefer tektonischer Graben selbst bei der großen Dichtedifferenz von 0,5 g/cm^3 ab 500 m Tiefe in der Schwerekurve fast verschwindet und nur noch Amplituden von grob 0,2 mGal (500 m) und 0,1 mGal (1000 m) erreicht. Spätere Ausführungen werden zeigen (Abschn. 3.6.4), dass die Gravimetrie auch im Rahmen der Oberflächennahen Geothermie eine nicht zu unterschätzende Bedeutung hat.

Bei den der Gravimetrie in vielerlei Hinsicht ähnlichen Magnetfeldmessungen kann die Amplitudenabnahme weitaus dramatischer erfolgen, wie das Modellbeispiel in Abb. 3.2

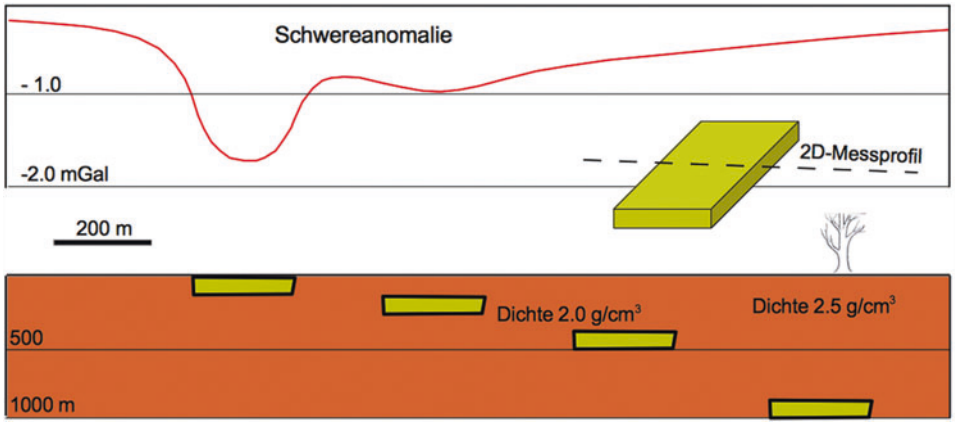


Abb. 3.1 Schwereverlauf über modellhafter geologischer Grabenstruktur in zunehmender Tiefe. In 500 m Tiefe ist der 100 m mächtige Körper praktisch nicht mehr nachweisbar

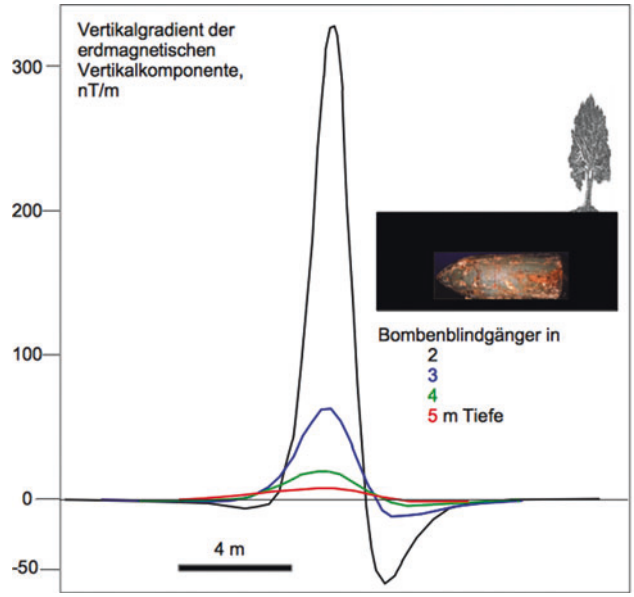


Abb. 3.2 Magnetfeldanomalien über einem Bombenblindgänger in zunehmender Tiefe. Bei der Gradientenmessung und einem dipolförmigen Körper bedeutet doppelte Tiefe grob näherungsweise einen Rückgang auf nur noch 1/16 der gemessenen Amplitude

zeigt und was ahnen lässt, dass in der Tiefen Geothermie die Geomagnetik nur sehr große Einheiten unterschiedlicher magnetischer Eigenschaften auflösen kann. In Abschn. 3.8.6 wird das Beispiel der Abb. 3.2 mit der Bedeutung in der Oberflächennahen Geothermie wieder aufgenommen.

Eine logarithmische und damit enorme Abnahme der Wirkung geologischer Körper auf die Messgrößen mit zunehmender Tiefe ist beim Komplex der geoelektrischen

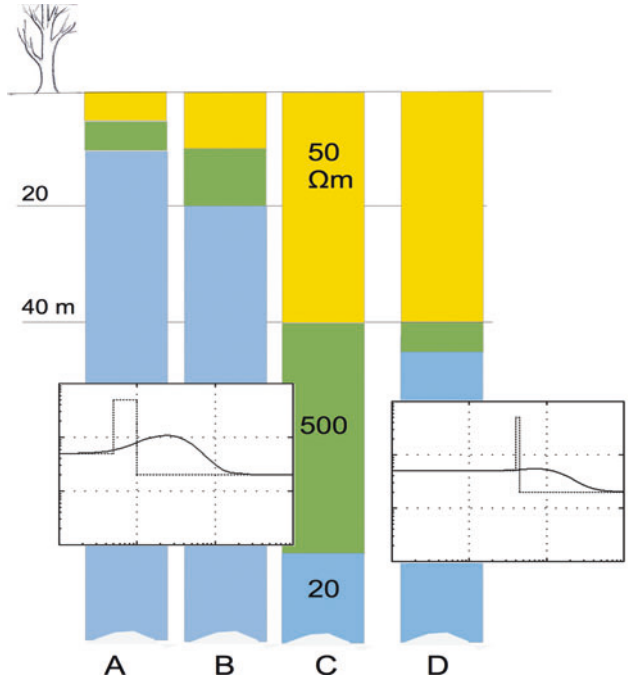


Abb. 3.3 Geoelektrische Widerstandstiefensondierung und das Prinzip der relativen Mächtigkeit: Die grüne 5 m mächtige Schicht mit dem hohen spezifischen Widerstand von 500 Ω · m unter 5 m Überdeckung (**A**) muss bei doppelter Überdeckung auf doppelte Mächtigkeit (**B**) und auf 40 m Mächtigkeit bei 40 m Überdeckung (**C**) anwachsen, damit das deutliche und gleichgroße Maximum in der Sondierungskurve erscheint. In 40 m Tiefe wird die 5 m mächtige grüne Schicht praktisch nicht mehr erkannt (**D**)

Tiefensondierungen gegeben, was Abb. 3.3 an einem einfachen Beispiel deutlich machen soll. Für die Oberflächennahe Geothermie ist das insofern von Bedeutung, als die Geoelektrik hier generell den Komplex der wichtigsten geophysikalischen Verfahren stellt, was später in Abschn. 3.6.1 genauer erläutert und zum noch besseren Verständnis dieser Abbildung führen wird.

Von vornherein und den physikalischen Zusammenhängen geschuldet, ist das Bodenradar allein mit der Oberflächennahen Geothermie verknüpft (Abb. 3.4) und in diesem Rahmen schwerpunktmäßig auf Projekte der Anlage von Erdwärmekollektoren und Erdwärmesonden beschränkt. Dies und die Vermittlung von neuen Bodenradar-Entwicklungen auch für größere Untersuchungstiefen bringt Abschn. 3.6.3.

Interessanterweise hat das Bodenradarv-Verfahren mit der eher sehr geringen geophysikalischen Untersuchungstiefe große Verwandtschaft mit dem Verfahren, das bei ebenfalls hohem relativen Auflösungsvermögen mit die größten Untersuchungstiefen bis zu mehreren tausend Metern erzielt und gerade bei der Tiefen Geothermie nicht wegzudenken ist: mit der Reflexionsseismik. Auch in der Oberflächennahen Geothermie hat

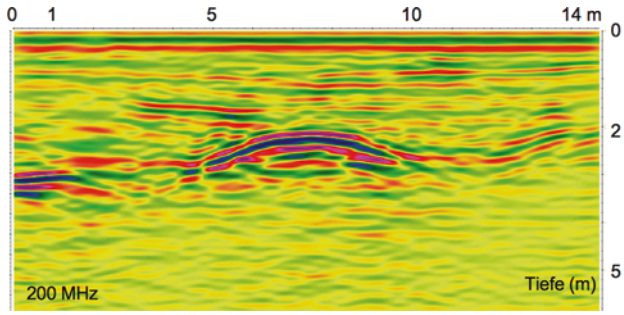


Abb. 3.4 In vielen Fällen hört beim Bodenradar die Eindringtiefe bei wenigen Metern auf. Aus Tiefen darunter erreichen dann nur noch diffuse Signale die Erdoberfläche. Neuentwicklungen erreichen mittlerweile erheblich größere Tiefen (Abschn. 3.6.3)

die Reflexionsseismik ihren Platz und kann auch oberflächennah sehr viel zur Strukturerkundung beitragen. Aber die Seismik (als Reflexions- und Refraktionsseimik, seismische Tomographie, Abschn. 3.6.2) hat in der Oberflächennahen Geothermie nicht den Stellenwert, den sie unbestritten für die Tiefe Geothermie und auch für die tieferen Bereiche einiger 100 m und für die sogenannte mitteltiefe Geothermie ab 400 m besitzt. Was später in Abschn. 3.6.1 detaillierter auseinandergesetzt und verstanden wird, beruht die Dominanz der verschiedenen Verfahren der Geoelektrik im oberflächennahen Bereich auf ihren so sehr wichtigen Eigenschaften, sehr viel stärker bei Lithologie und Gesteinsfazies differenzieren zu können. Sie lebt insbesondere bei allen Fragen der Hydrogeologie und Hydraulik vom Dualismus mit dem scheinbaren Paradoxon, dass die hydraulisch gut leitenden Gesteine (die Grundwasserleiter) die schlechten elektrischen Leiter und die hydraulisch schlecht leitenden Gesteine (die Grundwasserstauer oder -geringleiter) die guten bis sehr guten elektrischen Leiter sind, was in Abschn. 3.5.1 wieder aufgegriffen wird. Eine Seismik, die mit einer „Attributanalyse“ versucht – nicht immer unbedingt erfolgreich –, fazielle Aussagen auch in den großen Tiefen einiger tausend Meter zu treffen, hat auch an der Oberfläche eher den Vorzug, die strukturgeologischen Untersuchungen zu unterstützen.

3.3 Geologie und Hydrogeologie in der Oberflächennahen Geothermie

Im Unterschied zur Tiefen Geothermie, bei der mögliche Bohransatzpunkte über kilometerweite Erstreckung diskutiert werden können, sind alle Anlagen zur Nutzung der Oberflächennahen Geothermie mit einem ganz bestimmten, meist relativ eng begrenzten *Standort* verknüpft. Am Anfang der Planung solcher Anlagen steht daher grundsätzlich eine Standort-Betrachtung und eine Standort-Beurteilung, für die die einschlägig befassten Ämter und Behörden Richtlinien erlassen haben. Praktisch alle diesbezüglichen Überlegungen und Vorschriften sind letztlich an das Grundwasser gekoppelt, was Anlagen mit Erdwärmesonden oder Grundwasserwärmepumpen, Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung, weniger Erdwärmekollektoren betrifft, und pauschal lässt sich formulieren, dass

eine mögliche Verunreinigung oder auch nur eine Veränderung des Grundwassers (z. B. der Wärmehaushalt) im Blick zu behalten ist. Konkurrierende Nutzung im Bereich existierender Brunnen, Belange in Wasserschutzgebieten, insbesondere im Einzugsbereich von Heilquellen und Mineralwässer-Gewinnungsanlagen, sind ein wichtiger Gesichtspunkt, der in der Regel leicht und rasch zu erörtern ist. Grundwasserhöffige Gebiete mit Planungen zu zukünftigen Trinkwassererschließungen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle.

Bei Anlagen mit Grundwasserwärmepumpen sind im Allgemeinen weitaus komplexere Betrachtungen anzustellen, wenn es um die Förderung von Grundwasser und das Wiedereinbringen über Schluckbrunnen geht. Besondere geologisch-hydrogeologische Verhältnisse sind in Karstgebieten (Salinar- und Karbonatkarst), in Gebieten mit Altbergbau, ferner bei Kluftgrundwasserleitern mit sehr hohen Durchlässigkeiten oder bei Schichtfolgen mit hohen Sulfat-Anteilen (Anhydrit) zu beachten. Letzteres wird in Abschn. 3.3.7 einschlägig beleuchtet.

Grundsätzlich können alle Bohrarbeiten und Bauausführungen für geothermische Anlagen mit ungewöhnlichen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen konfrontiert werden, wozu über die zuvor genannten Faktoren hinaus auch angebohrte Arteser (Wasser und Gas) und aggressive Wässer, in manchen Gebieten auch rutschungsgefährdete Bereiche gehören können. Noch gut in Erinnerung ist der Fall einer missglückten Erdwärmebohrung für ein Ministerium in Wiesbaden im Jahr 2009, als in etwa 100 m Tiefe ein unter Druck stehender Grundwasserleiter angebohrt wurde, meterhohe Fontänen aus dem Boden schossen, zeitweise bis zu 100 l/s austraten und ein größeres Gelände in der Innenstadt überflutet wurde. Besteht Verdacht auf Altlasten im Untergrund, sind Bohrungen und Brunnen für Geothermieanlagen ohne vorherige detaillierte geologisch-geophysikalische Untersuchungen einleuchtenderweise nicht genehmigungsfähig. Karten zur wasserwirtschaftlichen und hydrogeologischen Standortbeurteilungen bei der Nutzung der Oberflächennahen Geothermie werden von einer Reihe von Bundesländern in verschiedensten Maßstäben von 1 : 25 000 bis 1 : 400 000 herausgegeben und über das Internet zugänglich gemacht. Letztlich basieren diese Karten auf dem Zugriff auf existierende Karten zur Geologie und Hydrogeologie mit deren stark unterschiedlicher Qualität und Verfügbarkeit. Darauf gehen die nächsten Abschnitte genauer ein.

3.3.1 Kartenwerke

Geologische Karten

Geologische Karten 1 : 25 000 vermitteln im Allgemeinen den größtmöglichen Maßstab für allgemein zugängliche Ausgaben. Eine flächendeckende Verfügbarkeit einer solchen Kartierung ist sehr unterschiedlich; manchmal existiert sie bei den Ämtern nur als – teilweise sehr alte – Entwurfszeichnung. Und es gibt immer wieder „weiße" Blätter, auf denen die beste geologische Information nur im Maßstab 1 : 200 000 erhältlich ist. Auch bei Karten im Maßstab 1 : 25 000 ist man vielfach noch auf geologische Aufnahmen aus dem 19. Jh. und vom Anfang des 20. Jh. angewiesen. Einige Bundesländer (z. B. Thüringen,

Sachsen-Anhalt) stellen – verdienstvoll – eine Zusammenschau digitalisierter geologischer Karten ins Internet. Vorbildlich ist Bayern, dessen Landesamt für Umwelt sämtliche existierenden geologischen Karten im Maßstab 1 : 25 000 in hoher Auflösung mit den jeweils zugehörigen kompletten Erläuterungen zum kostenlosen Herunterladen im Internet bereithält. In den meisten anderen Bundesländern sind die geologischen Karten nur auf Bestellung und gegen Bezahlung erhältlich.

Oberflächig kartierte ausstreichende Schichten und kartierte Verwerfungen extrapoliert die Geologie in die Tiefe und erstellt unter Einbeziehung zusätzlicher Tiefenaufschlüsse durch Bohrungen und gegebenenfalls mithilfe der Geophysik dreidimensionale Strukturmodelle mit Schichtlagerung, Stratigraphie und Tektonik. Die Güte und Verlässlichkeit der Karten und abgeleiteten Modelle ist extrem unterschiedlich, wofür zwei Gegebenheiten verantwortlich sind: die Natur, mit den der geologischen Kartierung zur Verfügung gestellten Aufschlüssen, sowie der kartierende Mensch selbst, der seine Arbeit sehr gut oder auch weniger gut gemacht hat. Sieht man von größeren Waldgebieten ab, in denen die geologische Kartierung nach Oberflächenbefunden naturgemäß erschwert ist, sind es pauschal vor allem das Flachland des norddeutschen Beckens und das Gebiet der ungefalteten Molasse im Alpenvorland mit den sehr jungen pleistozänen und holozänen Ablagerungen von Lockersedimenten, die das Kartieren und den geologischen Blick mit der Extrapolation in den tieferen geologischen Untergrund erschweren bis verwehren (Abb. 3.5). Selbst in den oberflächennäheren Schichten können rasch wechselnde Lagerungsverhältnisse mit vielfältigen Faziesverzahnungen dazu führen, dass die geologische Kartierung ratlos lässt und hydraulische Zusammenhänge nicht verstanden werden. Im Vorland des bis heute

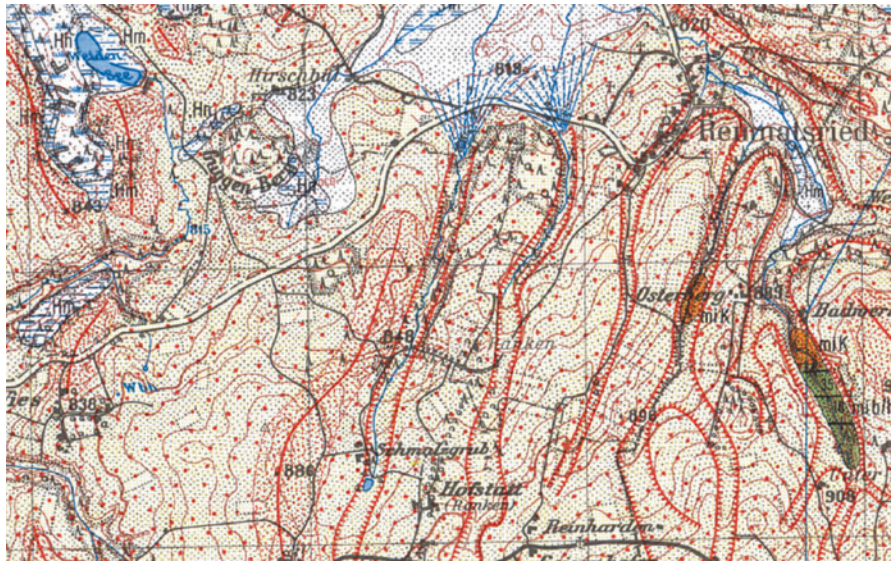


Abb. 3.5 Ausschnitt aus der geologischen Karte 1 : 25 000. Alpenvorland mit pleistozänen Ablagerungen und einem Fleck (olivgrün) Oberer Meeresmolasse. Gitterweite 1 km. Quelle Landesamt für Umwelt Bayern. (Ausschnitt aus Kuhnert und Rohr 1975)

aktiven Alpen-Orogens, aber auch in den Randregionen des Rheintalgrabens wird häufig vergessen, dass eine jüngste, subrezente bis rezente Bruchtektonik Spuren – auch in den hydraulischen Verhältnissen – hinterlassen haben kann, die der Kartierung wegen fehlender durchhaltender Bezugshorizonte fast immer verborgen bleiben, worauf nachfolgend noch eingegangen wird.

Aber auch in Regionen mit tertiären, mesozoischen und paläozoischen Schichtfolgen kann es für kartierende Geolog(inn)en „trostlos“ werden, wenn quadratkilometerweise Lössüberdeckung jeden weiteren Einblick unmöglich macht (Abb. 3.6). Stellen wir uns vor, dass sich in diesem Areal der Abb. 3.6 ein Industriebetrieb ansiedeln möchte, der Oberflächennahe Geothermie zur Heizung von Gebäuden und Kühlung von Maschinen in sein Konzept eines Neubaus einbezogen hat. Hier ist es mit ein oder zwei Probebohrungen nicht getan, wenn unter dem Löss eine tektonische Bruchzone mit kleinstückigen Gesteinsschollen und Verwerfungen im Dekameter-Bereich hindurchzieht (Abb. 3.7) oder stark verkarstungsanfälliges Gestein ansteht. Selbst bei weniger bedrohlichen Konstellationen täuschen Einzelbohrungen häufig über geothermisch einschlägige hydraulische Probleme in den Grundwasserstockwerken hinweg. An einer flächigen Geophysik wird man nicht vorbei kommen, nach der dann ganz gezielt Erkundungsbohrungen abgeteuft werden können, womit späteren Ausführungen bereits kurz vorgegriffen wird.

Zu den beschriebenen „natürlichen“ Problemen einer geologischen Kartierung und Kartenerstellung kommt die menschliche Komponente hinzu, die die Qualität und Zuverlässigkeit einer geologischen Karte ausmacht. Viele Karten werden von langjährig erfahrenen guten Geologinnen und Geologen an Ämtern und in der Universität produziert. In vielen Fällen entstanden Kartenabschnitte im Rahmen von geologischen Diplomarbeiten, die mit redaktioneller Zusammenfügung durch den Betreuer der Arbeiten fertig

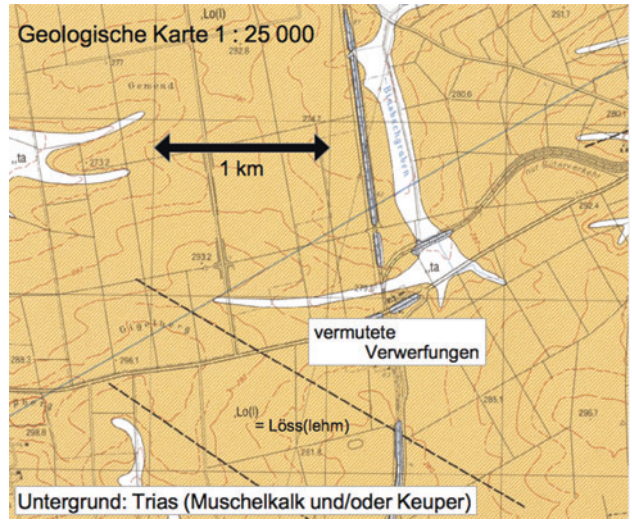


Abb. 3.6 Ausschnitt aus der geologischen Karte 1 : 25 000 mit ausschließlich Lössüberdeckung über einer Fläche von ca. 10 km^2. Die vermuteten Verwerfungen dürften aus einer Luftbildlineation abgeleitet sein. (Verändert nach Freudenberger 1999)

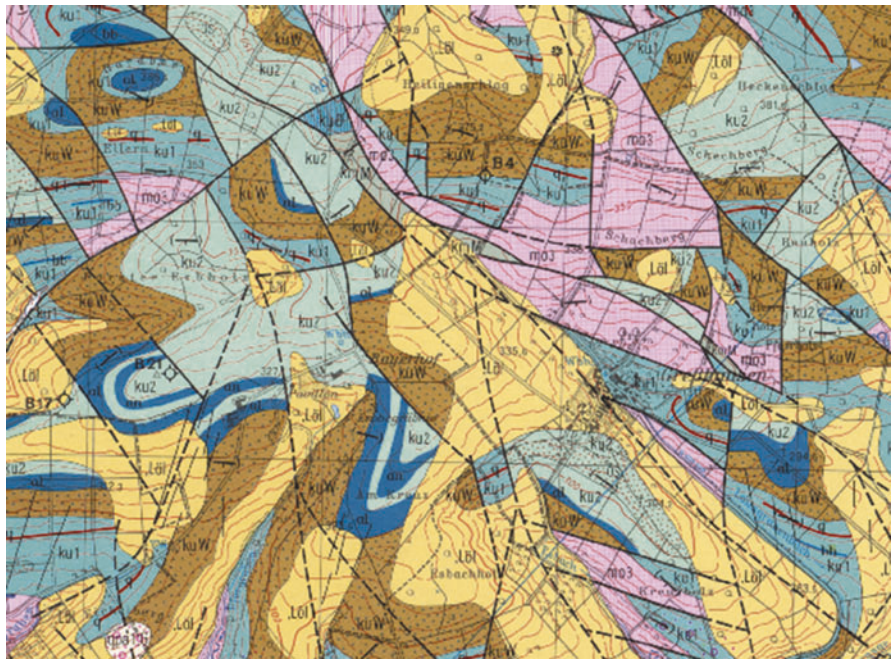


Abb. 3.7 Ausschnitt aus der geologischen Karte 1 : 25 000. Tektonisch stark gestörtes Gebiet. Trias (Muschelkalk, Keuper) und Löss(lehm). So etwa könnte es strukturell unter der weitflächigen Lössüberdeckung der Abb. 3.6 aussehen. Gitterweite 1 km. (Ausschnitt aus Büttner 1989)

wurden. Der Übergang zur neueren Praxis, geologische Kartierungen auch gegen Bezahlung an Ingenieurbüros zu vergeben, hat zwei Aspekte. Diese Arbeiten aus dem rein akademischen und Amtsrahmen herauszunehmen, fördert zweifellos den raschen Fortschritt bei der Beseitigung der „weißen Flecken" der geologischen Kartierung, was mit Sicherheit auch der Oberflächennahen Geothermie zugute kommt. Auf der anderen Seite ist nicht zu verkennen, dass Ausschreibungen von Kartierarbeiten und der Faktor Kosten zu gewissen „Großzügigkeiten" bei der geologischen Geländearbeit führen dürften, was nicht generell bedeuten muss, dass die Karten dadurch schlechter werden.

Interessant in diesem Zusammenhang und mit Blick auf die Nutzung geologischer Karten für die Oberflächennahe Geothermie ist der Wandel der Kartier-„Philosophie" in den vergangenen grob 100 Jahren, was die Beschreibung der strukturellen Verhältnisse (Tektonik) betrifft, aber keineswegs im Einzelfall zutreffen muss. In den sehr frühen Karten, die von der stratigraphischen Geländeaufnahme her meist als exzellent zu bezeichnen sind, wird die Schichtlagerung (Verbiegungen, Versätze) im Allgemeinen stiefmütterlich behandelt, was auch die Aufnahme von Verwerfungen in die Karten betrifft. In späteren Zeiten wird es dann üblich, in den Erläuterungen zur jeweiligen geologischen Karte sogenannte Streichlinienkarten aufzunehmen. Streichlinienkarten sind sozusagen topographische Karten einer bestimmten, gut ansprechbaren stratigraphischen Schichtgrenze

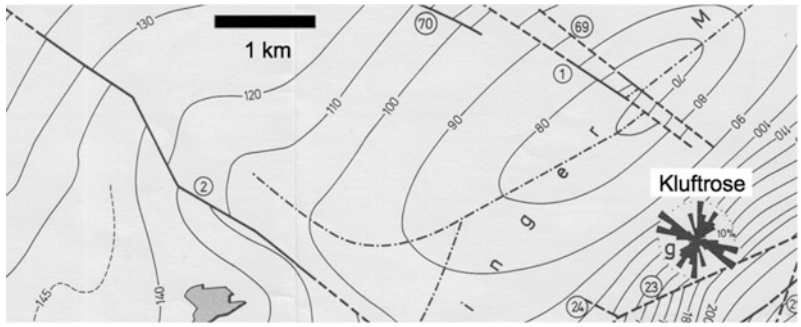


Abb. 3.8 Ausschnitt aus einer Streichkurvenkarte mit Verbiegungs- und Bruchstrukturen (Verwerfungen). Kluftrosen dokumentieren in einem Aufschluss gemessene Häufigkeitsverteilungen der Streichrichtung von Klüften im Gestein, die tektonisch kontrolliert sein können, aber nicht müssen. (Verändert nach Schwarzmeier 1977)

(Beispiel: Dogger – Malm), deren Verlauf von Höhenlinien ü. NN nachgezeichnet wird. Wie in der topographischen Karte gibt es ein Auf und Ab mit Bergen und Tälern (die Geologie sagt: Sättel und Mulden), dann aber auch plötzliche Versätze, die Verwerfungen kennzeichnen (Abb. 3.8). Ursache sind gebirgsbildende Kräfte, die die Schichtpakete verbiegen und versetzen.

Anders als bei topographischen Karten, deren Höhen flächendeckend mit einem Nivellement eingemessen wurden, entstehen Schichtlagerungskarten in der Regel nur aus verhältnismäßig wenigen tatsächlich kartierten Punkten an der Erdoberfläche, und die Extrapolation in die Tiefe erfolgt über die Berücksichtigung von Zwischenhorizonten und bekannte bzw. angenommene Standardmächtigkeiten der geologischen Stratigraphie. Das lässt viel interpretatorischen Spielraum zu mit dem Ergebnis, dass vielfach in Schichtlagerungskarten selbst stärkste Verbiegungen mit extremem Schichtfallen den Vorzug vor einfachen Schichtversätzen an Verwerfungen genießen. Das muss nicht von vornherein falsch sein, führt aber dazu, dass in der Kartendarstellung der Oberflächengeologie ein falsches Bild der tatsächlichen Tektonik entstehen kann. In diese geologischen Karten werden bekanntlich neben der farblichen Kennzeichnung der verschiedenen stratigraphischen Einheiten auch kartierte Verwerfungen und solche, die vermutet werden, eingezeichnet (Abb. 3.5, 3.7). Werden mithin in Modellen der Schichtlagerungskarten Verbiegungen favorisiert, finden sich in der geologischen Karte keine Verwerfungen markiert, die dem Auge ja graphisch signalisieren, ob eine Region tektonisch stark, mittel oder schwach bis gar nicht überprägt ist, was auch Konsequenzen für die Beurteilung der hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse haben kann. Ein diesbezüglich charakteristisches Beispiel geologischer Kartier-„Philosophie“ äußert sich in dem folgenden Zitat aus den Erläuterungen zu einer geologischen Karte: „*Dort wandert die Sandsteinobergrenze auf ca. 150 m Erstreckung um etwa 20 m in der Vertikalen. Eine solch enge tektonische Einsenkung scheidet in diesem an sich tektonisch ruhigen Gebiet aus.* “ Wird dieser Gedankengang so fortgeschrieben, macht sich eine geologische Karte von ganz allein tektonik-frei.

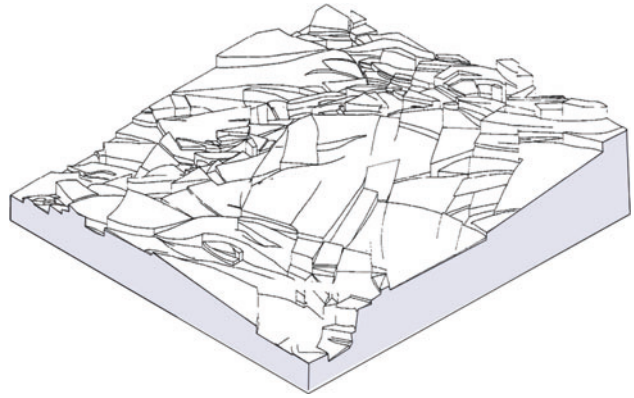


Abb. 3.9 Die Streichkurvenkarte einer definierten Schichtgrenze in ein 3D-Blockbild umgesetzt. (Verändert nach Büttner 1989)

Modernere geologische Kartierungen und Karten sind im Allgemeinen weit fortschrittlicher, wie die Beispiele der Abb. 3.7 und 3.9 vermitteln. Aber man muss sich auch darüber im Klaren sein, dass selbst diese gute Kartierung (Abb. 3.7) und das mit Aufwand erstellte Blockbild (Abb. 3.9) immer noch eine Generalisierung darstellen. Mit der erheblichen Zunahme von Bohraufschlüssen hat man in vielen Regionen die Vorstellungen zum strukturellen Aufbau teilweise erheblich korrigieren müssen, und es ist nicht ungewöhnlich, dass auch fern einer alpidischen Tektonik eine Bruchschollentektonik mit Blöcken der Dimension 50 m bei Verwerfungsbeträgen von 100 m angetroffen wird. Dazu muss man sich vorstellen, dass in der geologischen Karte 1 : 25 000 ein 50 m messender tektonischer Block gerade einmal zwei Millimeter einnimmt, zutreffender gesagt: einnehmen müsste. Es ist ersichtlich, dass hier und gerade auch im Bereich der kleinräumigen Oberflächennahen Geothermie die Brücke zur Geophysik zu schlagen ist.

Hydrogeologische Karten

Wie bei den geologischen Karten, deren bundesweit auch kleinmaßstäblich (z. B. 1 : 200 000, 1 : 300 000, 1 : 400 000, 1 : 500 000) erhältliche Ausgaben für die Oberflächennahe Geothermie meist wenig hilfreich sind, gibt es auch die kleinmaßstäblichen hydrogeologischen Übersichtskarten (z. B. Sachsen 1 : 400 000, Thüringen 1 : 200 000), für die dieselbe Einschätzung gilt. Der größte Maßstab für die flächendeckende hydrogeologische Aufnahme ist beispielsweise in Bayern 1 : 25 000 (was sich an den Maßstäben der topographischen und geologischen Karte 1 : 25 000 orientiert). Die Karten selbst erscheinen als HK50 aber dann im Maßstab 1 : 50 000 in Form von jeweils drei kostenlos im Internet herunterzuladenden Kartenblättern als hydrogeologische Grundkarte (Abb. 3.10), als Blatt der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung sowie als Blatt mit hydrogeologischen Profilschnitten. Zusammenfassende Erläuterungen gibt es dann in der parallel erscheinenden HK100, der hydrogeologischen Karte 1 : 100 000. In anderen Bundesländern ist der Stand der hydrogeologischen Erkundung und Kartierung sowie die Handhabung des Zuganges sehr unterschiedlich. Nicht frei im Internet verfügbar ist die hydrogeologische Karte 1 : 50 000 von Nordrhein-Westfalen, für die man den kompletten

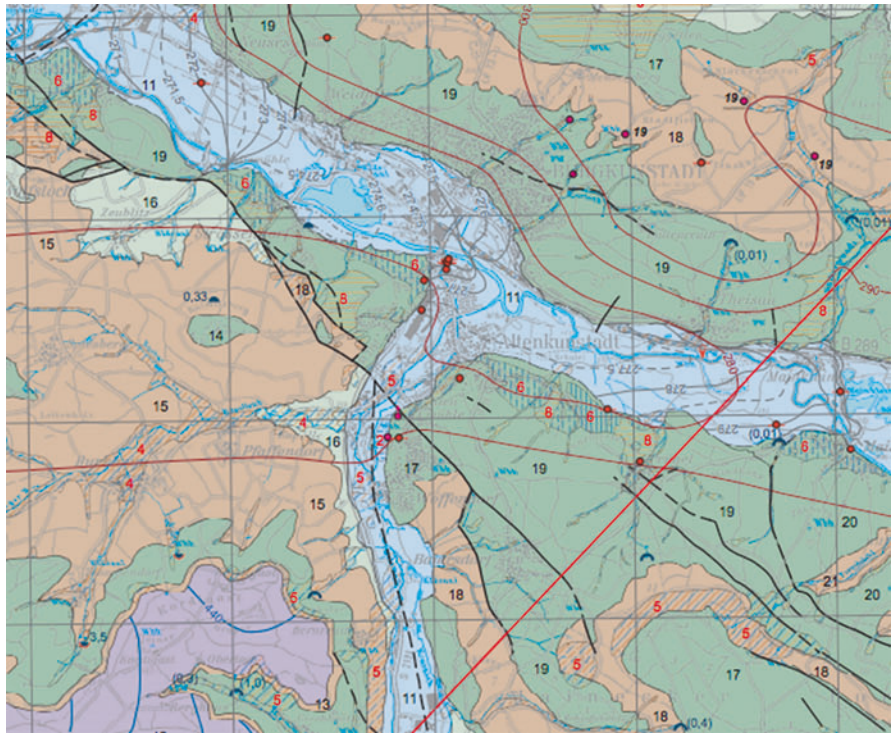


Abb. 3.10 Fortschrittlich: Ausschnitt aus der hydrogeologischen Grundkarte 1 : 50 000 von Bayern. Farben: Grundwasserleiter mit unterschiedlichen Poren- und Kluftdurchlässigkeiten. Weitere Signaturen: Grundwassergeringleiter, Deckschichten, offene Wasserflächen, geologische Verwerfungen, Verlauf von Profilschnitten, Quellen, Brunnen, Grundwassermessstellen. (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009)

GIS-Datensatz erwerben kann. Interaktive hydrogeologische Karten für die verschiedensten Themenkomplexe, aber nur für flächenmäßig sehr beschränkte Gebiete, existieren in Baden-Württemberg. In Rheinland-Pfalz gibt es einen Hydrologischen Atlas, aber explizit hydrogeologische Karten vermisst man. In Niedersachsen gibt es nur kleinmaßstäbliche Karten (1 : 200 000 und 1 : 500 000) für die verschiedenen Themenbereiche; allein Karten mit der Lage der Grundwasseroberfläche sind im Maßstab 1 : 50 000 für grob 40 % der Landesfläche publiziert. Weiter ist das Land Brandenburg mit einer im Internet frei zugänglichen recht detaillierten Hydrogeologischen Karte HYK50 zumindest der oberflächennahen Hydrogeologie. Wiederum anders im Saarland, wo man im Internet beim GeoPortal Saarland in der Rubrik Geowissenschaften die drei Komplexe Boden, Bergbau und Geologie sowie Altlasten anklicken kann und unter der zweiten Überschrift hinsichtlich Hydrogeologie allein etwas über die Einzugsgebiete der Grundwasserkörper des Saarlandes erfahren kann.

Im Idealfall sollten hydrogeologische Karten und deren Erläuterungen über die Grundwasserführung der Gesteine mit den Besonderheiten und Unterschieden im Locker- und

Festgestein informieren, die Deckschichten ausweisen, die Grundwasserleiter nach der Durchlässigkeit charakterisieren, Grundwasserstauer (Grundwassergeringleiter) benennen, den Wasserhaushalt mit Wechselwirkung zwischen Grund- und Oberflächenwasser abhandeln, die Grundwassergefährdung thematisieren und die Beschaffenheit des Grundwassers mit Chemismus und Zuordnung zu Grundwassertypen vermitteln. Direkte Aufschlüsse bei Quellen, durch wichtigere Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen mit entsprechenden Profilen sollten mit aufgenommen sein, und selbst Befunde aus geologischen Karten wie nachgewiesene und vermutete Verwerfungen, Verkarstungserscheinungen wie Dolinen oder allgemein Erdfälle sollten Eingang finden. In der Oberflächennahen Geothermie, bei der das Grundwasser eine, wenn nicht *die* Hauptrolle spielt, sind gute, großmaßstäbliche hydrogeologische Karten ein sehr wichtiges Instrument bei Planung und Ausführung. Wie oben ausgeführt, besteht da in weiten Bereichen noch erheblicher Nachholbedarf.

Geothermische Karten

Der beschriebene, vielfach anzutreffende Mangel teilt sich verständlicherweise auch allen geothermischen Karten zu Standorteignungen mit, die sich weitgehend auf geologische und hydrogeologische Karten beziehen müssen. Der Ansatz bei solchen geothermischen Karten, die auch im Internet zugänglich sind, kann ganz unterschiedlich ausfallen. Geothermie-Karten für Bayern (Abb. 3.11) unterscheiden Areale für verschiedene Nutzungsmöglichkeiten: Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Grundwasserwärmepumpen – Einzel- und Gemischt-Eignungen – sowie nicht zugelassene Flächen. Eine interaktive Karte für Thüringen (Abb. 3.12) beschreibt Areale unterschiedlicher mittlerer spezifischer Wärmeleitfähigkeit der Gesteine für wählbare Tiefenbereiche. Die spezifische

Abb. 3.11 Ausschnitt aus der Karte der Standorteignung für Oberflächennahe Geothermie. Die Farben unterscheiden zwischen Arealen für verschiedene Nutzungsmöglichkeiten: Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Grundwasserwärmepumpen – Einzel- und Gemischt-Eignungen – sowie nicht zugelassene Flächen. (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009)

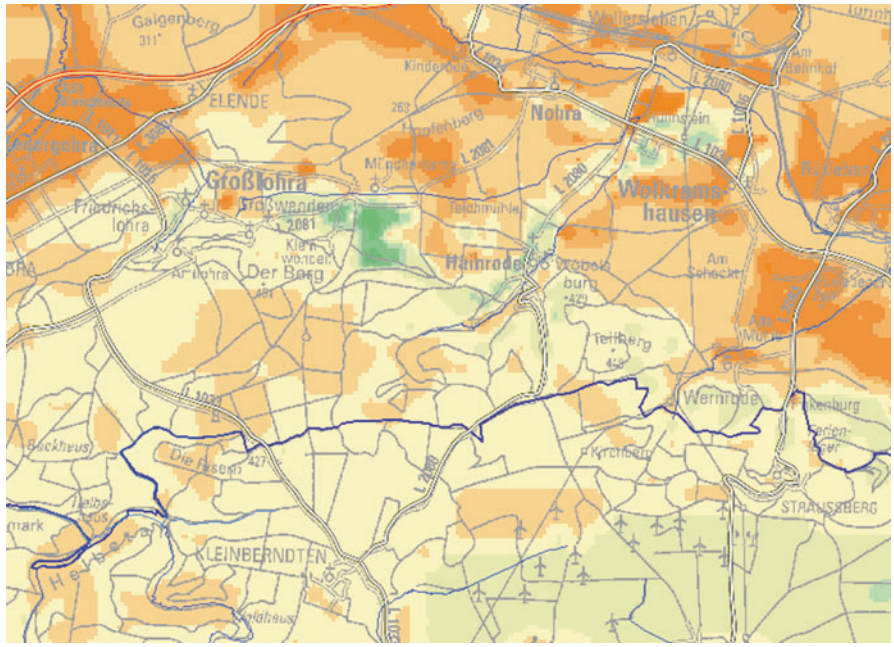


Abb. 3.12 Ausschnitt aus der interaktiven geothermischen Karte der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. Die Farben beschreiben Areale unterschiedlicher mittlerer spezifischer Wärmeleitfähigkeit der Gesteine für bestimmte Tiefenbereiche. (Quelle: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie o.J.)

Wärmeleitfähigkeit ist eine der wichtigsten Kenngrößen bei der korrekten Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen. Sie steht in enger Verbindung zu den Grundwasserverhältnissen, was im Abschn. 3.3.7 noch näher angesprochen wird. Wieder einen anderen Weg, aber auch auf Erdwärmesonden beschränkt, geht die geothermische Karte von Hessen auf der topographischen Kartengrundlage 1 : 50 000 (Abb. 3.13). Farben markieren Bereiche, die hydrogeologisch und wasserwirtschaftlich günstig, hydrogeologisch ungünstig, wasserwirtschaftlich ungünstig sowie generell unzulässig sind.

3.3.2 Das digitale Geländemodell (DGM)

Eigenartigerweise besteht auch heute noch bei vielen Geologie- und Ingenieurbüros Unkenntnis über die generelle Nutzung und die vielfältigen Möglichkeiten des digitalen Geländemodells, wobei hier vor allen Dingen geologische und hydrogeologische Geländeaufnahmen angesprochen werden. Das DGM beschreibt die Geländeoberfläche mit Datensätzen eines dreidimensionalen Koordinatensystems mit Rechts- (X) und Hochwerten (Y) der üblichen Gauß-Krüger- oder UTM-Netze bzw. von geographischer Länge und Breite sowie der Geländehöhe (Z) über NN an regelmäßigen Gitterpunkten. Die Daten werden aus einer Befliegung mit einem Laserscan (LIDAR, engl. *light*

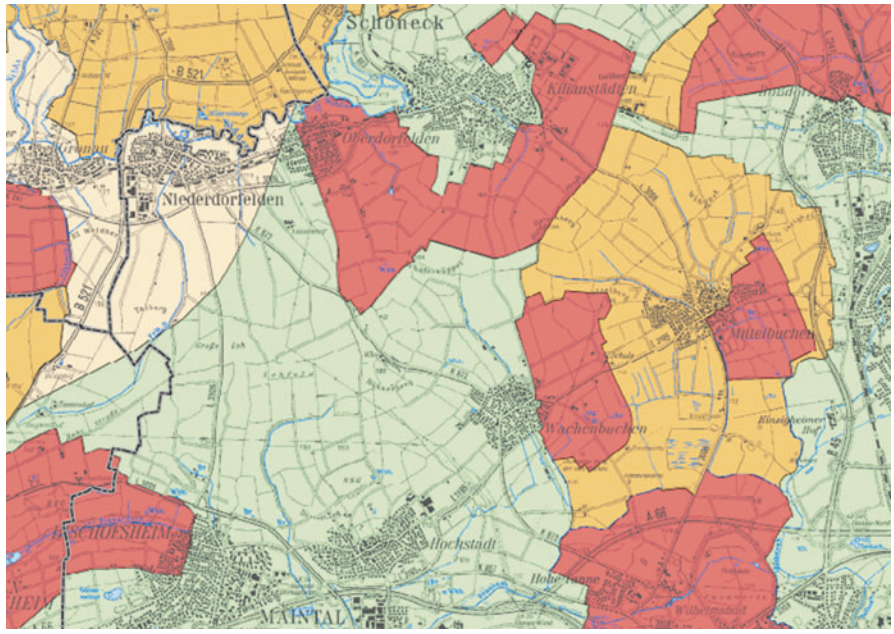


Abb. 3.13 Ausschnitt aus der Karte der hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Standortbeurteilung für Erdwärmesonden in Hessen auf der Grundlage der topographischen Karte 1 : 50 000. Die Farben markieren Bereiche, die hydrogeologisch und wasserwirtschaftlich günstig, hydrogeologisch ungünstig, wasserwirtschaftlich ungünstig sowie wasserwirtschaftlich unzulässig sind. (Quelle: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie o.J.)

detection and ranging) gewonnen, wobei aus den Primärsignalen des DOM (= digitales Oberflächenmodell) durch Datenverarbeitung alle Gebäude und die Vegetation herausgerechnet werden, sodass das DGM selbst in Waldgebieten die Oberfläche des Bodens sehr genau wiedergibt. Die Datensatz-Benennungen DGM1, DGM2, DGM5 beziehen sich auf die Gitterweite der Punktraster, wobei DGM1 ein 1-m-, DGM2 ein 2-m- und DGM5 wahlweise ein 5-m- oder 10-m-Raster zur Verfügung stellt. Die Lagegenauigkeit der Punkte beträgt beim DGM1 und DGM2 ca. $\pm 0{,}5$ m bei einer Höhengenauigkeit besser als $\pm 0{,}2$ m. Beim DGM5 sind die Zahlen entsprechend ± 1 m und $\pm 0{,}3$ m. Die digitalen Datensätze für frei wählbare Kartenausschnitte können in der Regel per E-Mail von den Vermessungsämtern zu sehr moderaten Preisen bezogen werden. Zu bedenken ist, dass bei einem Quadratkilometer Fläche das DGM1 eine Million Datenzeilen liefert, was bei manchen Programmen, die den Datensatz weiter bearbeiten sollen, die maximal zulässige Zahl überschreitet, und dazu rät, stattdessen besser das DGM2 zu ordern.

Es fragt sich, was man mit dem DGM anfangen kann, was im Folgenden an sehr einfachen Beispielen mit dem bekannten Programm Surfer für die Visualisierung algebraischer Flächen demonstriert wird, ehe dann reale geologische Situationen in der DGM-Analyse präsentiert werden.

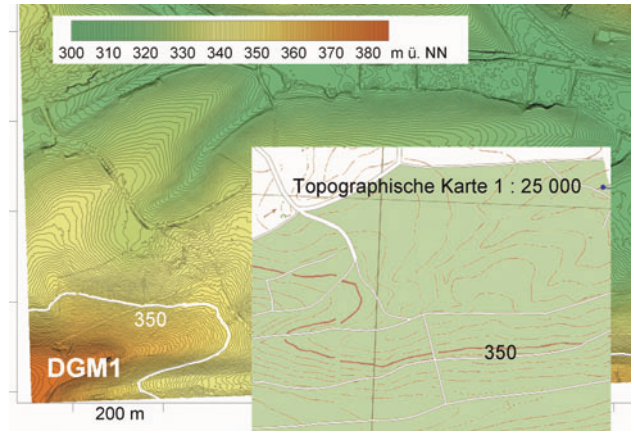


Abb. 3.14 Vergleich der üblichen topographischen Karte 1 : 25 000 mit einer Karte des digitalen Geländemodells (Abstand der Isohypsen im DGM 0,5 m). Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

Abb. 3.14 stellt einen Ausschnitt der gewohnten topographischen Karte 1 : 25 000 (TK25) dem entsprechenden Blattschnitt des DGM1 gegenüber, den man sich selbst aus dem erworbenen Datensatz bei selbst gewählter Farbgebung erzeugen kann. Während in der normalen TK25 der Isohypsenabstand selten und dann nur im flachen Gelände 5 m unterschreitet, kann das Programm für die DGM1-Karte jeden beliebigen Isohypsenabstand bis hinunter zu den ±20 cm der Höhenauflösung der Originaldaten bereitstellen. Damit fangen aber die Möglichkeiten des Programms erst an, was die Abb. 3.15 und 3.16 mit einigen Beispielen einmal fürs Lockergestein und einmal fürs Festgestein zeigen. Während sich die unterschiedlichen Darstellungen in Abb. 3.15 allein auf den originalen Datensatz der Höhen ü. NN stützen, geht die Datenverarbeitung in Abb. 3.16 einige Schritte weiter. Ausgehend wiederum von der Karte der reinen Höhendaten (A), bringt Abb. 3.16 (B) das Resultat einer mathematischen Operation, der Berechnung des Horizontalgradienten. Der Horizontalgradient beschreibt an jedem Punkt des Gitters, das für die Interpolation und die Isolinien-Konstruktion vorab aus den Originaldaten erzeugt wird, die größte Geländeneigung als Zahl. Aus diesen Zahlen entsteht sozusagen eine verfeinerte topographische Karte mit der Darstellung des Gefälles und seiner flächigen Veränderungen (Abb. 3.16 B) mit einer neuen Skalierung in Meter pro Meter. 0,1 m/m bedeuten dann einfach 10 % Gefälle. Dann kann man das Programm veranlassen, bei der Gradientenberechnung an jedem Punkt nur in eine ganz bestimmte, frei wählbare Richtung zu schauen und den sogenannten gerichteten Horizontalgradienten und das Gefälle des Geländes nur in diese Richtung zu berechnen, woraus eine neue Karte entsteht. In Abb. 3.16 (C) ist das für die „Blickrichtung“ Südost, in Abb. 3.16 (D) für die Richtung Südwest geschehen. Es ist ersichtlich – und zu erwarten –, dass der gerichtete Horizontalgradient bevorzugt Geländestrukturen senkrecht zu der für die Berechnung gewählten Richtung betont. Orientieren sich Geländestrukturen dann an geologischen Gegebenheiten, so lassen sich sehr häufig geologische Streichrichtungen auffällig gut in den Gradientenkarten verfolgen. In bestimmten Variationen der Kartendarstellung kann sich daraus ein linienhaft-geometrisches Strukturmuster

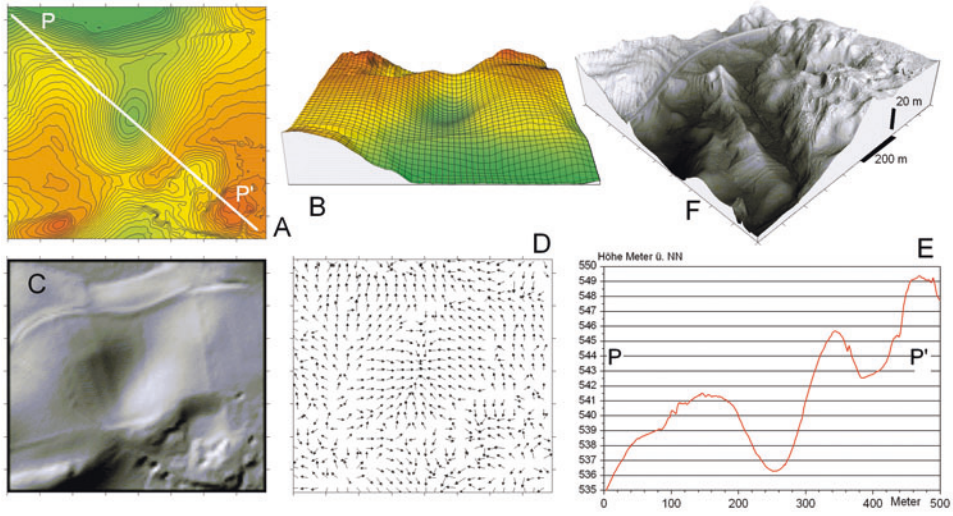


Abb. 3.15 Das DGM1 als topographische Karte mit frei wählbarem Abstand der Isohypsen, beliebig wählbaren Ausschnitten und beliebiger Farbskalierung (A); als 3D-Modell mit frei wählbarer Beleuchtung und Perspektive, mit und ohne Gitter einstellbar (B); als Schummerungskarte mit frei wählbarer Beleuchtung (C, F); als Vektorkarte für Gefälledarstellungen, Richtung und Stärke (D); als Basis für präzise Höhenprofile (A, E). Bilder A–E: Moränen-Landschaft, offenes Ackergelände; Bild F: Moränen-Landschaft, dichtes Waldgebiet. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

entwickeln, wie die Schummerungskarte in Abb. 3.16 (E) mit dem Nachzeichnen des tektonischen Inventars deutlich macht.

Wenn Abb. 3.17 aufzeigt, wie sich Geologie im DGM widerspiegeln kann, so liegt der Zusammenhang in den teilweise erheblichen Unterschieden in der Gesteinshärte, die sowohl lithologisch als auch tektonisch bedingt sein können. Greift die Erosion in Schichtpaketen mit abwechselnd weichen und harten Einheiten an, so leisten erstere weniger Widerstand, was vor allem bei stärker ausgeprägter Morphologie Geländestufen im Kontakt zu harten Gesteinen erzeugt. Versetzt eine tektonische Bewegung an einer Verwerfung weiche gegen harte Schichten, so resultieren linienhafte Geländestrukturen, die mit dem hochauflösenden DGM häufig rasch tektonisch interpretiert werden können. Auch Störungszonen mit Gesteinsauflockerung kann die Erosion bevorzugt angreifen und im DGM sichtbar machen.

Die Möglichkeiten der Datenverarbeitung beim digitalen Geländemodell sind ungemein vielfältig, verlangen aber auch eine gehörige Einarbeitung und Vertrautheit mit dem Programm. Einige weitere Beispiele sollen das näher vermitteln. Die freie Wahl von Werte- und Farbskalierung (Abb. 3.15) mit Anwendung von Filterverfahren (Hochpässe, Tiefpässe, Richtungsfilter, Abb. 3.16), die bereits genannten Berechnungen der horizontalen Ableitungen (Abb. 3.18), Vektorkarten, die dem Auge Besonderheiten der Morphologie besonders gut vermitteln können (Abb. 3.19), variable 3D-Wiedergaben

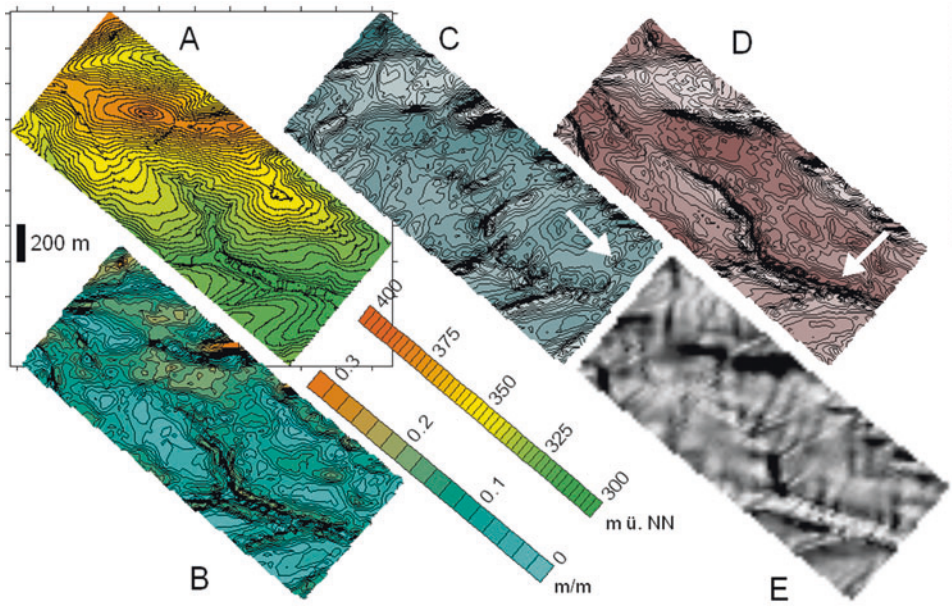


Abb. 3.16 DGM1 und Bearbeitung. A: Topographische Karte aus DGM1-Daten; Abstand der Isohypsen 2,5 m. B: Karte des berechneten Horizontalgradienten der Höhe = Gefälle des Geländes, 0,1 m/m entspricht 10 % Gefälle. C, D: Karten des richtungsabhängig berechneten Horizontalgradienten (nach 135° und 225°). E: Schummerungsversion der Karte in D. Man beachte das geometrische Muster, das die wesentlichen tektonischen Richtungen des Gebietes nachzeichnen dürfte. Äcker und Wald; Geologie: Keuper; Tonsteine, Sandsteine. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

der Morphologie mit Schummerungseffekten (Abb. 3.20) sind auch für kleinere Geländeausschnitte praktikabel und können vorteilhaft für die Planung und Errichtung von Anlagen der Oberflächennahen Geothermie eingesetzt werden. Geologische Risiken beim Abteufen und Installieren von Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden (Abschn. 3.8) wie zum Beispiel Zonen intensiver Verkarstung (Abb. 3.21) oder Hangrutschungen (Abb. 3.22) sind insbesondere angesprochen. Hier soll angemerkt werden, dass in Abschn. 3.4.5 die gezeigten Möglichkeiten der Datenverarbeitung ganz analog für Messdaten der Geophysik eingesetzt werden.

Vielfach geben bereits allein Schummerungskarten, die auf dem digitalen Geländemodell beruhen und zum Teil von den Vermessungsämtern frei verfügbar ins Internet gestellt werden, ganz wesentliche Informationen, zumal wenn man sie noch einer geeigneten Bildbearbeitung unterzieht. Was normale topographische Karten auch in Ansätzen nicht vermitteln, kann in Schummerungskarten sehr eindrucksvoll in Erscheinung treten (Abb. 3.23, 3.24).

In vielen Fällen zeigt sich, dass DGM-Daten erhebliche Vorteile gegenüber einer Luftbild- oder Satellitenbildanalyse von Fotolineationen besitzen. Abb. 3.25 zeigt

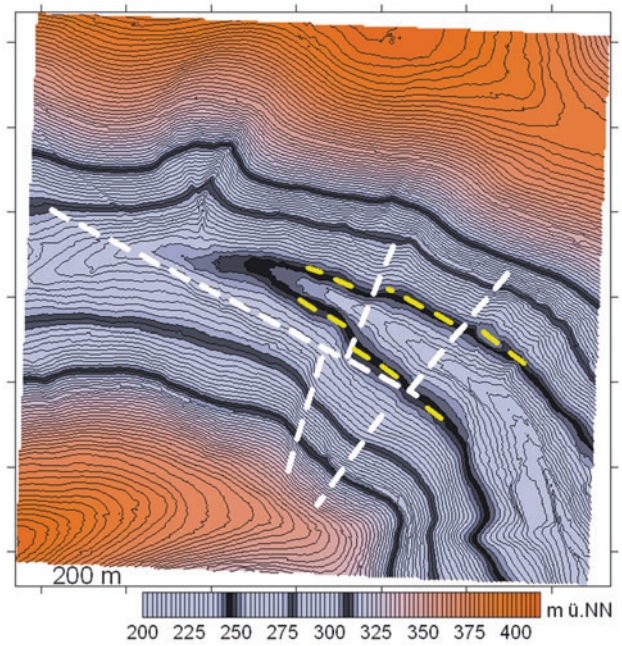


Abb. 3.17 DGM1: Topographie und Geologie, Abstand der Isohypsen 2,5 m. Einige interpretierte Verwerfungen (weiß) und ein Bezugshorizont (gelb). Mittlerer Buntsandstein mit einer Wechselfolge von Tonsteinen, Sandsteinen und Konglomeraten. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

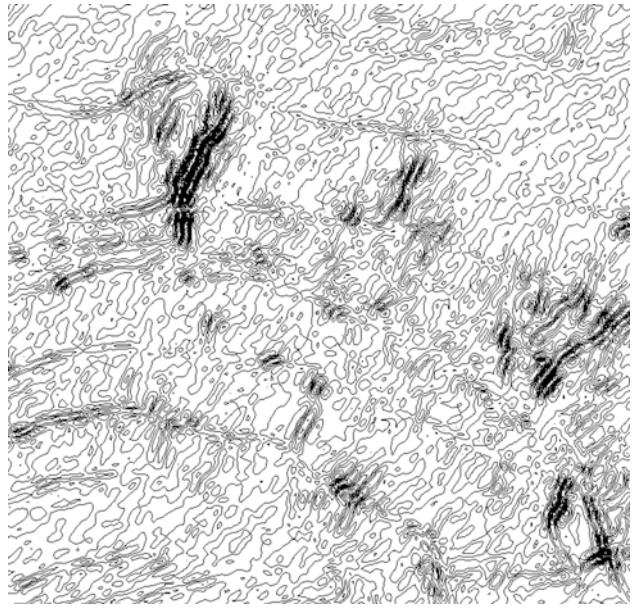


Abb. 3.18 Richtungsgefilterte (hier SO-Richtung) DGM1-Daten betonen Vorzugsrichtungen, die tektonisch oder generell morphologisch interpretiert werden können. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

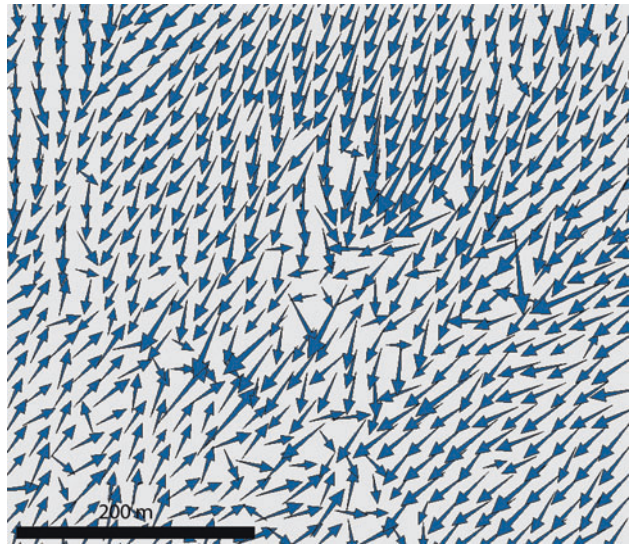


Abb. 3.19 Das digitale Geländemodell DGM1 als Vektorkarte. Die Vektorpfeile zeigen in Richtung des Gefälles, dessen Stärke mit der Vektorlänge korrespondiert. Der mittlere Bereich ist auch tektonisch stark gestört, was mit der Geophysik nachgewiesen wurde. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

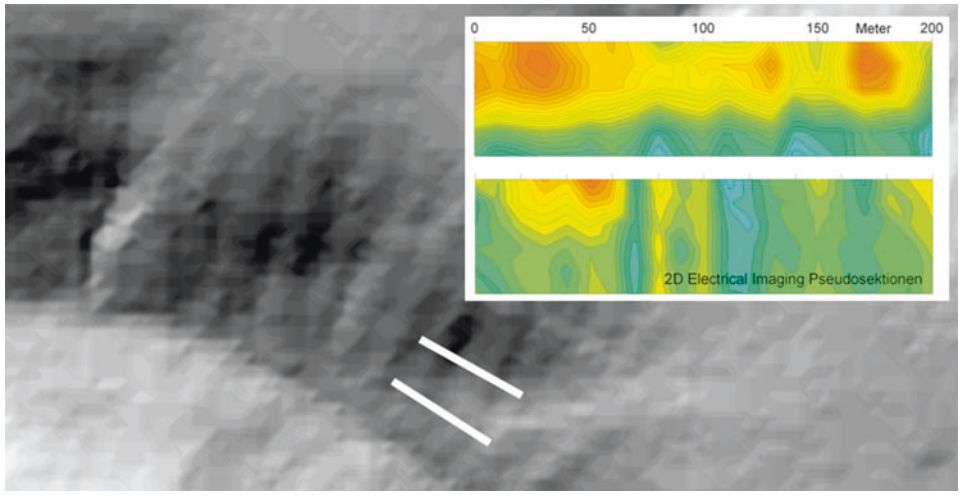


Abb. 3.20 Digitales Geländemodell DGM1 als Schummerungskarte. Das Streifenmuster dokumentiert schmale tektonische Blöcke, die auf querenden Profilen auch mit der Geophysik nachgewiesen werden (kleines Bild). Mehr zum Electrical Imaging in Abschn. 3.6.1. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

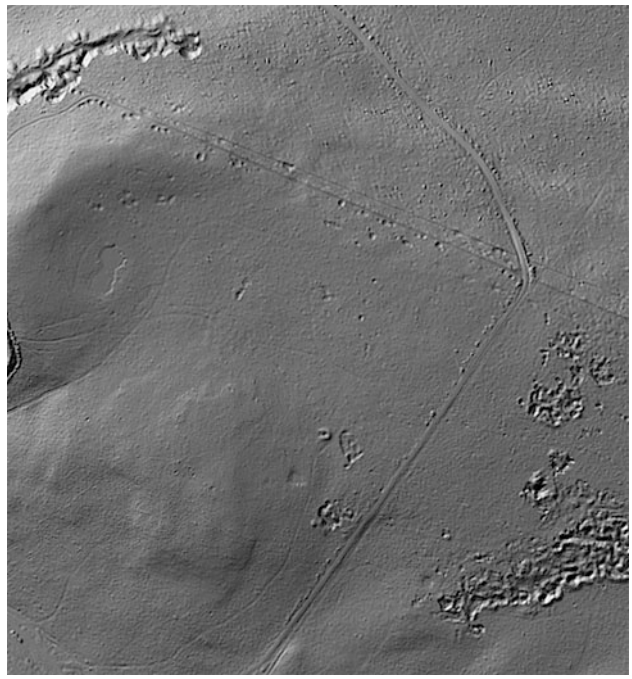


Abb. 3.21 Schummerungskarte auf Basis des digitalen Geländemodells DGM1: Verkarstung im Jura mit Erdfällen (Dolinen), Subrosionssenken und Trockentälern. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

Abb. 3.22 Hangrutsch in der Schummerungskarte des digitalen Geländemodells (DGM1). Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

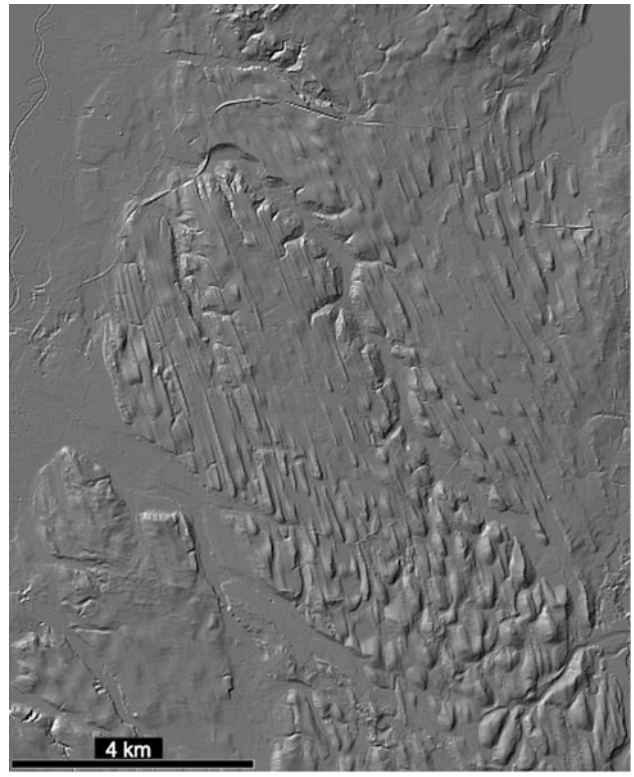


Abb. 3.23 DGM1: Endmoränenlandschaft im Alpenvorland. In der topographischen Karte 1 : 25 000 sind die eigenartigen Geländeformen nicht annähernd zu erahnen. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

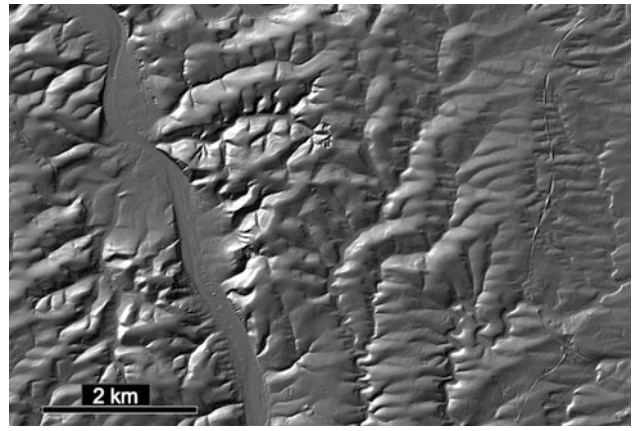


Abb. 3.24 DGM1: Vermutlich tektonisch geprägte, richtungshaltende Geländeformen im Festgestein (Trias: Buntsandstein – Muschelkalk). Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15

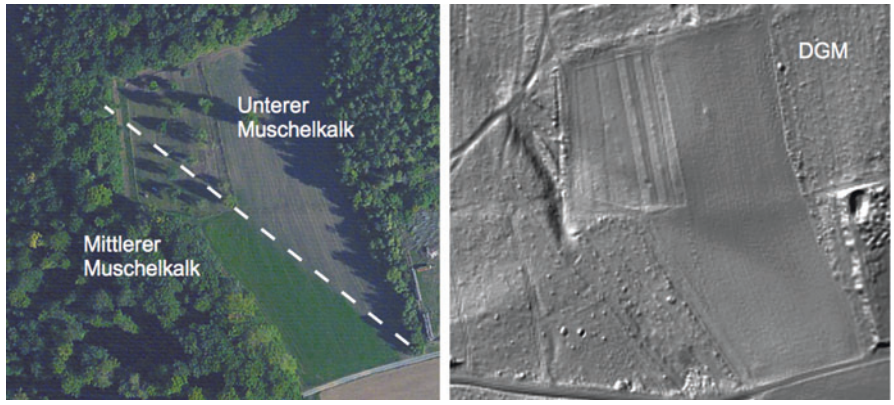


Abb. 3.25 Verwerfung als deutliche Fotolineation und in der Schummerungskarte des digitalen Geländemodells DGM1. Grundlage: Digitales Geländemodell – Bayerische Vermessungsverwaltung; 12/15. (Luftbild: Google Earth)

dazu ein instruktives Beispiel mit einer Verwerfung, die extrem scharf als Boden- und Vegetationsgrenze im Luftbild erscheint, aber auch, eher leicht diffus, in der DGM-Schummerungskarte zu verfolgen ist. Das scheint der vorherigen Aussage zu widersprechen, solange man nicht Abb. 3.26 zur Kenntnis genommen hat. Dort sind den beiden Aufnahmen der Abb. 3.25 zwei Luftbilder derselben Fläche hinzugefügt, die nur zu zwei anderen Zeitpunkten aufgenommen worden sind und auf denen die Verwerfungslineation praktisch verschwunden ist. Hinzu kommt der DGM-Vorteil, dass selbst schwächste Morphologie-Lineationen auch in Wälder hinein zu verfolgen sind, wo die gewöhnliche Lineationsanalyse sehr häufig versagt.

3.3.3 Etwas Wärme-Physik: Heizung, Kühlung, Speicherung von Wärme und Kälte

Die Oberflächennahe Geothermie ist – was häufig vergessen wird – untrennbar mit dem geologischen Untergrund, seinen Gesteinen und ihrer Grundwasserführung verknüpft; wobei Letzteres das wichtige Gebiet der Hydrogeologie einbezieht. Geothermie wird leicht mit der Vorstellung von Wärme verbunden, wobei Wärme als Ausdruck von Energie nur als ein relativer Begriff zu sehen ist. Die vier grundlegenden Begriffe der Geothermie sind Temperatur, Wärme(energie), Wärmespeichervermögen und Wärmetransport (siehe dazu Abschn. 3.3.7). Im Gesteinsuntergrund ist dabei ein Temperaturfeld durch die Temperaturverteilung definiert, die zeitlich konstant (stationäre geothermische Prozesse) und zeitlich veränderlich (instationäre geothermische Prozesse) sein kann. Die Wärme als Form der Energie kann im Gestein gespeichert werden, d. h. es kann Energie aufnehmen oder abgeben, was mit einer Veränderung der Temperatur einhergeht. Insbesondere für die

Abb. 3.26 Die Verwerfung von Abb. 3.25 im Luftbild zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen. (Luftbild: Google Earth)

Anwendung der Oberflächennahen Geothermie ist dabei stets vor Augen zu halten, dass „Wärme-Energie“ und -transport auch „Kälte-Energie“ und -transport bedeuten kann.

Oberflächennahe Geothermie bedeutet grundsätzlich und pauschal Wärmetransport im Gestein, aus dem Gestein heraus und in das Gestein hinein. Im Gestein wird Wärme durch Wärmeleitung und Wärmekonvektion transportiert. Wärmeleitung gehorcht Temperaturdifferenzen, und das geothermisch wichtigste Temperaturgefälle ist das der Temperaturzunahme mit der Gesteinstiefe, die in vielen Regionen der Welt ganz grob im Mittel 3 °C/100 m beträgt. Für diese und andere im Gestein herrschenden Temperaturunterschiede beschreibt der Parameter der *Wärmeleitfähigkeit*, wie viel Wärme pro Zeiteinheit von A nach B transportiert wird. Im Gegensatz zu vielen Materialien, insbesondere Metallen, ist sie im Gestein recht gering und schwankt grob um einen Faktor 5, wobei das Gesteinsgefüge sowie das im Porenraum enthaltene Wasser eine wichtige Rolle spielen.

In vielen geothermischen Prozessen, so auch bei der Oberflächennahen Geothermie, ist der Wärmetransport durch Konvektion weitaus wichtiger als der durch reine Leitung. Wärmekonvektion ist an einen Massentransport geknüpft, der die Wärme bei der Bewegung mitnimmt. Beim Vulkanismus kann das gigantisch sein; im hier einschlägig wichtigen Bereich der Oberflächennahen Geothermie ist es die Bewegung des Grundwassers mit dem konvektiven Wärmetransport, der vielfach und unverständlicherweise weniger Beachtung

findet. Beim einfachen Beispiel der saisonalen Wärmespeicherung ist das sofort einsehbar, wenn die im Sommer im Gesteinsvolumen gespeicherte Wärme zum Winter hin durch den Grundwasserstrom längst zu großen Teilen abtransportiert worden ist (vgl. Abb. 3.29). In diesem Zusammenhang der Wärme- und Kältespeicherung ist auch der geothermische Parameter der *spezifischen Wärme* von großer Bedeutung, der das Wärmespeichervermögen von Gesteinen beschreibt. Wegen der hohen spezifischen Wärme von Wasser, die grob beim Faktor 5 derjenigen trockener Gesteine liegt, sind Porosität und Wassersättigung wichtige Größen.

Bei praktisch allen Vorgänge der Oberflächennahen Geothermie handelt es sich um geothermisch instationäre Prozesse, bei denen sich die Temperaturfelder zeitlich ändern. Der wichtige Parameter der *Temperaturleitfähigkeit*, selbst abhängig von Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärme und Dichte der Gesteine, beschreibt z. B., wie rasch sich bestimmte Bereiche erwärmen bzw. abkühlen oder ein Temperaturausgleich erfolgt. Charakteristisch ist der grob periodische Beitrag der Sonneneinstrahlung bei Erdwärmekollektoren, bei denen natürlich auch das stationäre Temperaturfeld mit der Bedeutung des Grundwassers und der Bodenfeuchte mitspielt. Auf diese physikalischen Zusammenhänge wird etwas ausführlicher im Abschn. 3.6.7 der Geophysik eingegangen.

3.3.4 Offene Systeme

Grundwasserwärmepumpen können als sehr effektiv bei der Oberflächennahen Geothermie angesehen werden, aber sie bedeuten auch den massivsten Eingriff in den Grundwasserhaushalt mit den zugehörigen hydrogeologischen Aspekten. Voraussetzung ist ein oberflächennaher Aquifer, dem mit einem Förderbrunnen Wasser entnommen wird, das nach Wärme- oder Kälteentnahme für Heizungs- oder Kühlungszwecke über einen zweiten, sogenannten Schluckbrunnen in den Aquifer zurückgeleitet wird (Abb. 3.27, 3.28). Es ist dies dasselbe Prinzip, das bei der Tiefen Geothermie mit einer Bohrungsdublette zur Anwendung kommt. Der Erfolg einer Installation von Grundwasserwärmepumpen hängt von der Leistungsfähigkeit des Aquifers ab, und ungeachtet sonstiger Beschränkungen und Verbote sind ähnliche Überlegungen geologischer, hydrogeologischer und geophysikalischer Art anzustellen, wie sie bei der gewöhnlichen Grundwassererschließung für Trink- oder Betriebswasser nötig sind und gegebenenfalls zu Vergleichszwecken herangezogen werden können. Wichtige Aspekte sind dabei Porengrundwasserleiter und Kluftgrundwasserleiter oder auch Karstgrundwasserleiter sowie die zugehörigen hydraulischen Durchlässigkeiten, Fließrichtungen und Fließgeschwindigkeiten, was gleichermaßen für Förder- und Schluckbrunnen Bedeutung hat. Die Entnahmemengen liegen im selben Größenordnungsbereich wie bei der gewöhnlichen Grundwassererschließung: Für ein Einfamilienhaus mögen weniger als 1 l/s ausreichen, während für Industrie und Gewerbe durchaus 10 l/s und auch erheblich mehr nötig werden können. Abkühlungen des Wassers beim Heizen sowie die Erwärmung für die Kühlung beispielsweise von Maschinenparks können bei mehreren Grad Celsius liegen. Es ist ersichtlich, dass bei

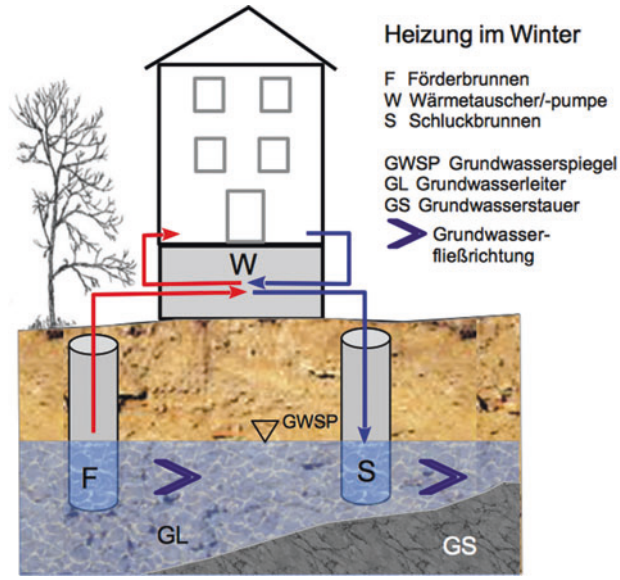


Abb. 3.27 Prinzip des offenen Geothermiesystems mit Grundwasserwärmepumpen für Heizungszwecke. Wesentlich ist die Existenz eines hinreichend ergiebigen Grundwasserleiters

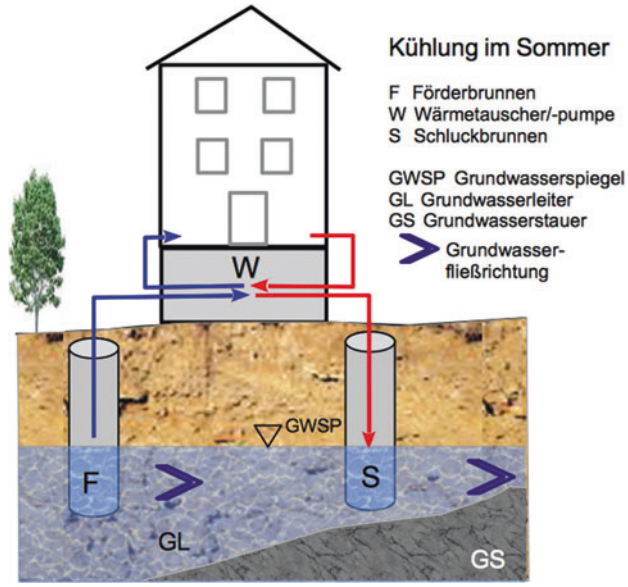


Abb. 3.28 Prinzip des offenen Geothermiesystems mit Grundwasserwärmepumpen für Kühlungszwecke (Klimatisierung, Kühlung von Maschinen in der Industrie)

noch höheren Temperaturen und andauernden Temperaturveränderungen im Grundwasser Probleme hinsichtlich konkurrierender Nutzung entstehen können und möglicherweise Auswirkungen auf die Grundwasserchemie und die Ökologie zu befürchten sind.

Erweitert man die Funktionsweise der Systeme in Abb. 3.27 und 3.28 dahingehend, dass die Strömungsrichtungen im Sommer und Winter jeweils umgekehrt werden, kommt

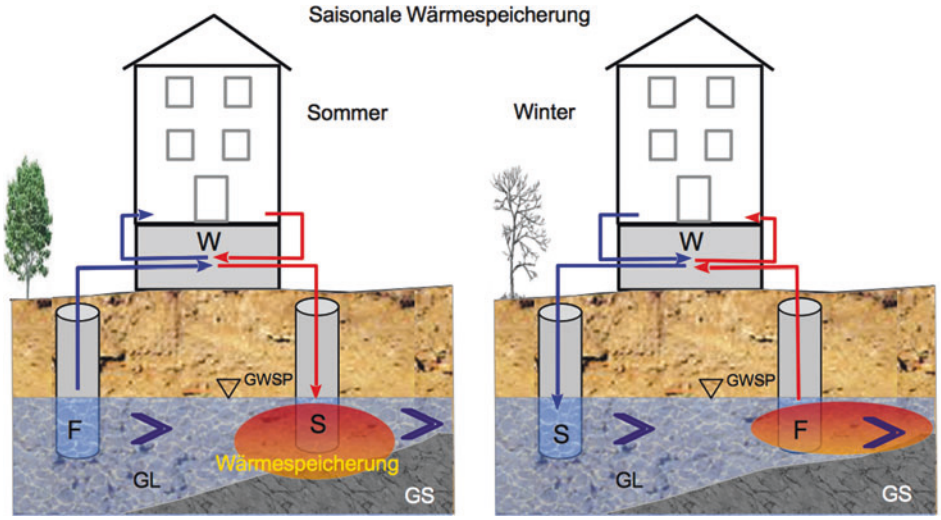


Abb. 3.29 Prinzip des Aquifer-Wärmespeichers. Mit dem analogen Prinzip kann umgekehrt auch ein Kältespeicher betrieben werden. Das Bild macht deutlich, dass bei größerem konvektiven Wärmetransport durch fließendes Grundwasser der Speichereffekt stark oder weitgehend verloren gehen kann. Legende wie in Abb. 3.27

man zu einem Aquifer-Wärmespeicher (Abb. 3.29). Hier wird deutlich, dass die Anforderungen an die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse besonders hoch liegen, wenn gemäß Abb. 3.29 dafür Sorge zu tragen ist, dass das Grundwasser bei höherer Fließgeschwindigkeit den Speicher nicht einfach wegführt. Erweitern lassen sich offene Aquifer-Speichersysteme, wenn zwei oder mehrere Grundwasserstockwerke zur Verfügung stehen, die durch einen Grundwasserstauer hydraulisch gut voneinander getrennt sind. Bei einem entsprechenden System unter dem Berliner Reichstag fungieren ein oberes Stockwerk in 60 m Tiefe als Kältespeicher und ein mehr als 300 m tiefes zweites Stockwerk als Wärmespeicher. Beide sind hydraulisch durch eine kreidezeitliche Tonschicht voneinander getrennt.

3.3.5 Geschlossene Systeme

Die weitaus meisten Systeme der Oberflächennahen Geothermie sind geschlossene Systeme mit Erdwärmekollektoren und Erdwärmesonden, bei denen das Grundwasser in den Wärmekreislauf nur indirekt oder gar nicht einbezogen wird. Das Prinzip ist bei beiden Verfahren dasselbe, mit dem Unterschied, dass die Wärmeübertrager einmal horizontal und einmal vertikal in den Untergrund eingebracht werden. In beiden Fällen zirkuliert meist eine Glykol-Wasser-Mischung in einem geschlossenen Rohr, das die Wärme bzw. Kälte dem Wärmetauscher zuführt.

Erdwärmekollektoren greifen in den geologischen Untergrund nur sehr oberflächennah ein: ca. 1–1,5 m bei horizontaler Rohrleitungsverlegung oder ca. 1–5 m bei platzsparenden

Erdkörben mit Spiralwicklung der Rohre. In praktisch allen Anleitungen und Firmenangeboten liest man über das „Erdreich“ oder den „Boden“ als geothermische Energiequelle, über Bäume und Leitungen, die bei Baggerarbeiten beachtet werden müssen, aber von der Geologie und den Gesteinen des Untergrundes ist kaum einmal die Rede, und selten wird das Mitwirken von Fachleuten aus der Geologie empfohlen. Letztlich geht es stets um die Bodenart oder die Boden-/Felsklasse von im Bau- und Ingenieurwesen gebräuchlichen Klassifizierungen, von z. B. „nicht zu empfehlen“ bis hin zu „sehr gut geeignet“. Mit Blick auf die besonderen geothermischen Eigenschaften des Wassers, dessen Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme (Abschn. 3.3.3), finden sich naturgemäß trockene Sande und Kiese am unteren Ende der Skala, während feuchte, sandig-lehmig-schluffige sowie wasserspeichernde und wasserführende Schichten bevorzugt sind. Auch von Verhältnissen ab der Bodenklasse 5 und von Felsformationen kann die Rede sein, wobei unklar bleibt, wie in Regionen mit Festgesteinsverbreitung und nicht selten bereits in weniger als einem Meter Tiefe unverwittert anstehenden massiven Kalksteinen oder Dolomiten mit einer Wärmekorb-Installation umzugehen ist. Selbst in Gebieten mit kiesiger Lockergesteinsverbreitung können oberflächennahe Schotterzementierungen (Nagelfluh) betonartig auftreten. Es kommt immer wieder zu einer falschen Einschätzung der Geologie bei der Gewinnung geothermischer Energie mit Wärmekörben, was zu Bauschäden und Störungen führen kann. Deshalb wird beispielsweise in einem Bericht des Schweizer Bundesamtes für Energie (2010) ausdrücklich die Geologie des Untergrundes als ein wichtiges Element bei der Auslegung und Installation von Erdwärmekorbanlagen genannt. Mit Vorgriff auf die Abschnitte zur Geophysik wird zudem bereits hier darauf hingewiesen, dass gerade im Tiefenbereich der Erdwärmekollektoren das Bodenradar (Georadar, GPR, *ground penetrating radar*) unschätzbare Dienste bei der Untergrunderkundung leisten kann, was nicht nur das Auffinden menschlicher Konstrukte betrifft, sondern auch im Hinblick auf die Gesteinsschichten und vor allem auf den Wassergehalt zu sehen ist (Abb. 3.30).

Geht die Installation eines Rohres, in dem wie bei den Wärmekollektoren ein Wärmeträger zirkuliert, vertikal (selten schräg) in die Tiefe, werden Geologie und Hydrogeologie bei

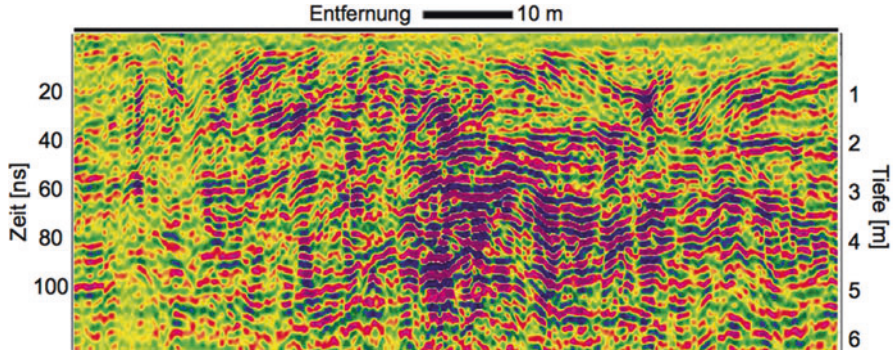


Abb. 3.30 Radargramm: äußerst komplexe Lagerungsverhältnisse und Wasserführung im Tiefenbereich von Erdwärme-Rohren und -Körben. Geologie: Quartär des Geestrückens in Schleswig-Holstein. Mehr Erläuterung in Abschn. 3.6.3. (Bildquelle J. Poßekel)

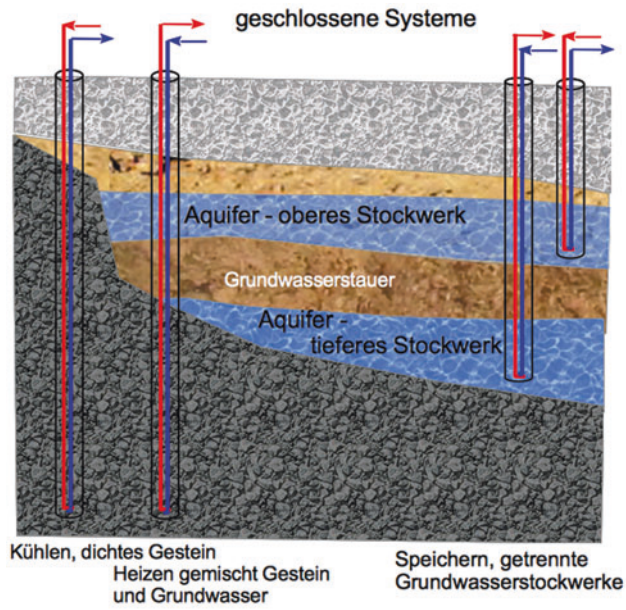


Abb. 3.31 Beispiele für Erdwärmesonden geschlossener Systeme im geologischen Untergrund

der Installation solcher *Erdwärmesonden* wieder wichtig, auch wenn wegen des geschlossenen Kreislaufs kein direkter Kontakt zum Grundwasser besteht und überhaupt ein großer Vorteil von tiefen Erdwärmesonden darin besteht, dass sie im Prinzip überall in das Gestein eingebracht werden können und die Notwendigkeit der Aufsuche geeigneter Aquifere entfällt. Aber vor dem Hintergrund, dass für den Wärme-/Kältetausch mit dem umgebenden Gestein nur die relativ kleine Fläche der Bohrungsummantelung zur Verfügung steht, spielen Wärmeleitung und Wärmekonvektion in den Gesteinen eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit einer Anlage, die mit der sogenannten spezifischen Entzugsleistung (in W/m) charakterisiert werden kann. Die genannten Größen verdeutlichen, dass aus geologischer Sicht sowohl Grundwasser führende Gesteinsschichten mit Wärmeleitung und Konvektion als auch dichte Festgesteine mit reiner Wärmeleitung genutzt werden können, wobei häufig Erdwärmesonden gemischte Abfolgen durchteufen (Abb. 3.31). Für die geologische, hydrogeologische und geophysikalische Erkundung der Untergrundverhältnisse sind in unseren Regionen vorzugsweise Tiefen zwischen etwa 50 und 150 m anzusehen, wobei gemäß Definition der Oberflächennahen Geothermie 400 m auch dazugehören würden und kilometertief eingebrachte Erdwärmesonden nach demselben Prinzip funktionieren.

3.3.6 GRT (Geothermal Response Test), geologische und hydrogeologische Rechenmodelle und geologische Risiken

Modellhaft vermittelt Abb. 3.31 nur einige Möglichkeiten der Installation geschlossener Systeme mit Erdwärmesonden, die wie bei den Grundwasserwärmepumpen heizen

und kühlen sowie speichern können – vorzugsweise über Grundwasser führende Schichten, aber auch über dichte Festgesteine. Ein oder zwei Bohrungen können kleinere Wohngebäude heizen; für größere Wohngebiete oder Gewerbeanlagen kommen ganze Sondenfelder infrage. Es leuchtet ein, dass hier nicht einfach nach Faustformel und Tabellen drauflos gebohrt werden kann, sondern dass ein Standort sorgfältig vor allem auch bezüglich geologischer Risiken geprüft werden muss. Dazu gehören mineralische Veränderungen (Gips, Anhydrit, siehe Abschn. 3.3.7), lösliche Gesteine im Salinar- und Karbonatkarst mit Erdfällen (Dolinen), Erdfälle durch Feinkornausspülung oder in Verbindung mit Bergbautätigkeit, Tektonik mit Bruchzonen und Verwerfungen, Gefahr von Erdbeben sowie neu geschaffene Wegsamkeiten für Gas, wobei vor allem das Radon und seine Ansammlung in Gebäuden zunehmend kritischer gesehen werden (siehe Abschn. 3.5.6, 3.6.6).

Als eine gewisse Absicherung wird der sogenannte Geothermal Response Test (GRT) bzw. Thermal Response Test (TRT) angesehen, bei dem die geothermisch relevanten Parameter, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Entzugsleistung der durchbohrten Gesteinsschichten mit einer Pilotbohrung getestet werden. Wieweit solche einzelnen Testbohrungen einigermaßen repräsentativ sind, darf getrost hinterfragt werden, vor allem wenn zu sehr allein auf die Wärmeleitfähigkeit gesetzt wird und der konvektive Transport beim Grundwasserfluss der Einfachheit halber („schwer bestimmbar“, „zu gering“) meist vernachlässigt wird. Weitergehende Aufschlüsse wie Erfassung der lithologischen Schichtenfolge, Grundwasserleiter und -stauer, Stockwerksgliederung, Grundwasserspiegel und Fließrichtung, hydraulische Leitfähigkeit können eminent wichtig sein, bei einer einzigen Testbohrung aber rasch zu falschen Schlüssen führen. Die Hinzuziehung hydrogeologischer Karten (Abschn. 3.3.1) z. B. für die Grundwassergleichen kann helfen, wobei vielfach der Maßstab als viel zu klein angesehen werden muss. Selbst wenn mit sogenannten hydrologischen Dreiecken mehr das lokale Grundwasserfließen erschlossen werden soll, ist Zurückhaltung angebracht. Hydrologische “Dreiecke“ bestehen aus mindestens drei Bohrungen, in denen der Grundwasserspiegel gemessen und über das gesamte von den Bohrungen aufgespannte Dreieck – oder bei bestimmten Interpolationsmethoden auch darüber hinaus – in Form der Grundwassergleichen gezeichnet wird (Abb. 3.32). Beim Grundwassergleichenplan der Abb. 3.32 ist ersichtlich, dass je nach gewählter Isolinien-Konstruktion unterschiedliche Fließfelder resultieren, wobei keines „richtiger“ als das andere ist. Bedenkt man darüber hinaus, dass vor allem im geologischen Festgestein ohne weitere Untersuchungen Einzelbohrungen des hydrologischen Dreiecks auf einer Singularität, beispielsweise auf oder nahe einer Verwerfung, stehen können, wird ein Grundwassergleichenplan rasch Makulatur. Grundwasserspiegel-Differenzen von 15 m in zwei 20 m voneinander entfernten Bohrungen sind keineswegs als exotisch zu bezeichnen.

Es muss nicht besonders betont werden, wie wichtig es vor allem auch für größere Anlagen der Oberflächennahen Geothermie ist, dass verlässliche und nicht nur punktuelle geologische und hydrogeologische Aufschlüsse existieren. Damit soll wiederum eine

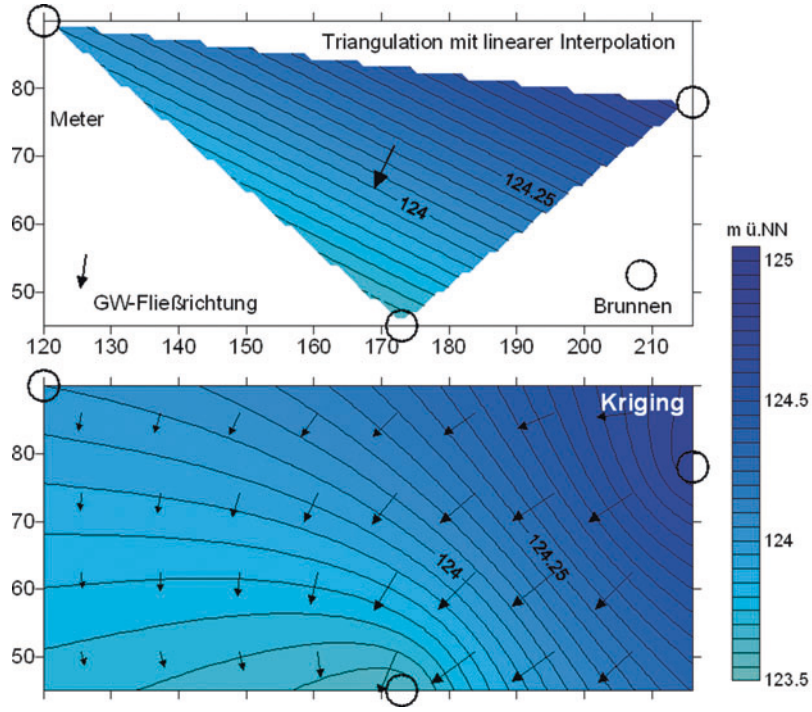


Abb. 3.32 Grundwassergleichenpläne mit denselben Daten, aber unterschiedlichen Berechnungsprozeduren für die Isolinien. Die Pfeile zeigen Fließrichtung und – beim Kriging – die relative Fließgeschwindigkeit gemäß der Pfeillänge an, die bei der Triangulation konstant ist

Brücke zur Geophysik und zu den nachfolgenden Abschnitten geschlagen werden, wo in Abschn. 3.9.5 auch über das Thema „Geophysik und Bohrungen“ zu reden sein wird.

Das Hervorheben dieser Zusammenhänge wird vor dem Hintergrund verständlich, dass Rechenmodelle zunehmend an Bedeutung gewinnen, mit denen bei deutlich heterogenen Grundwasserleitern und den meist deutlich instationären Vorgängen des Wärmetransportes einschlägige Zusammenhänge in größeren Erdwärmesondenfeldern behandelt werden können. Numerische Verfahren, die nicht nur die Grundwasserströmung in einem beliebigen geologischen Untergrund, sondern auch den daran gekoppelte Wärmetransport modellieren, finden immer weitere Verbreitung (z. B. Signorelli et al. 2007; De Paly et al. 2012; Wagner und Blum 2012; Cless 2012).

3.3.7 Die Fälle Staufen und Böblingen

„Umweltfreundliche Energiegewinnung mit unerfreulichen Begleiterscheinungen“ bis hin zu „Desaster“ bzw. „Katastrophe“ – so oder ähnlich hat es in jüngerer Vergangenheit in den Medien in Bezug auf die Geothermie und ihre Nutzung geheißen. War es zunächst im Rahmen der Tiefen Geothermie die Tiefbohrung für die petrothermale Geothermie bei

Basel, die 2006 ein leichtes Erdbeben mit Nachbeben ausgelöst hatte, so war nur kurze Zeit später auch die Oberflächennahe Geothermie bei Bohrungen für das Einbringen von Erdwärmesonden betroffen, in einem allerdings geologisch völlig anderen Zusammenhang. In der Stadt Staufen am Schwarzwaldrand waren mehrere Erdwärmesonden für die Rathausheizung mit bis zu 140 m tiefen Bohrungen eingebracht worden, als sich kurze Zeit später der Boden unter der gesamten Stadt zu heben begann mit der Folge, dass nach nur einem Jahr mehr als hundert Häuser von Rissen durchzogen waren und bei mehreren Häusern diskutiert wurde, ob sie überhaupt noch weiter bewohnbar seien. Für dann einsetzende Schadenersatzklagen und Versicherungsfragen musste der Ursache nachgegangen werden, wobei verständlicherweise die Stadt als Auftraggeber, das Ingenieurbüro und die Bohrfirma im Fokus standen. Hinzugezogene Fachleute aus der Geologie hatten rasch eine einleuchtende Erklärung zur Hand. Der geologische Untergrund aus Keuperschichten besteht zu erheblichen Anteilen aus Sulfatschichten des Anhydrit $CaSO_4$, der sich bei Reaktion mit und Aufnahme von Kristallwasser zu Gips umwandelt (Name für diesen Keuper-Abschnitt auch Gipskeuper), was mit einer erheblichen Volumenvergrößerung von bis zu 60 % einhergeht. Und diesen Vorgang, so die geologische Expertise, hatten offenbar die Wärmesonden-Bohrungen mit einem Verletzen der abdichtenden Schichten des unter Druck stehenden Grundwasserleiters mit den folgenden drastischen Hebungen in der Stadt eingeleitet.

Verständlich, dass die „Schuldfrage“ auch bei anderen, natürlichen Ursachen gesucht wird. Staufen liegt am Rand des Oberrheintalgrabens mit aktiven Schollenbewegungen, und eine Wegsamkeit für das Grundwasser mit dem Kontakt zum Anhydrit und der Umwandlung zu Gips könnte auch tektonisch geschaffen worden sein. Bei solchen geologischen und tektonischen Risikofaktoren machen Behörden im Allgemeinen strenge Auflagen bei der Planung und Errichtung von Erdwärmesonden und verlangen durchaus Einzelfallprüfungen. Dass die Geophysik hier zu den unverzichtbaren Aufschlussverfahren gehören sollte, wird in der Regel kaum oder allenfalls zögerlich beherzigt. Immerhin hat das Staufen-Ereignis dazu geführt, dass in der Schweiz ein aufwendiges spezielles Untersuchungsprogramm für die Mineralogie und Bohrlochgeophysik durchgeführt wurde, das zu einem Leitfaden für Erdwärmesonden-Bohrungen in potentiell gips- und anhydrithaltigen Gesteinen geführt hat (Sachs et al. 2012).

Staufen ist kein Einzelfall geblieben. Gipskeuper mit Anhydritschichten, Bohrungen für Erdwärmesonden und anschließende Hebungen mit Schäden an rund 200 Häusern seit dem Jahr 2011 als Folge von offensichtlich unsachgemäß niedergebrachten Bohrungen im Landkreis Böblingen bei Stuttgart haben dort zu einer „Ampelkarte“ mit grünen Bereichen geführt, in denen Erdwärmesonden in der Regel zugelassen sind, bis hin zu roten Bereichen, die entsprechende Bohrungen grundsätzlich untersagen. In gelben Bereichen sind Einzelfallbeurteilungen notwendig, wenn Tiefenbegrenzungen eingehalten werden oder Erkundungsbohrungen vorangehen. Auf das wichtige Thema „Bohrungen und Geophysik“ und auf das Vertrauen in Bohrungen und Bohrergebnisse wird dann weiter unten im Abschn. 3.9.5 eingegangen. Zuvor wird in Abschn. 3.8.3 ganz konkret ein auch geophysikalisch ungewöhnliches Szenario im Salinar Norddeutschlands beleuchtet.

3.4 Wichtige Prinzipien der geophysikalischen Messverfahren

3.4.1 Charakteristische Unterschiede bei den Verfahren

Die Palette der geophysikalischen Messverfahren, die im Bereich der Oberflächennahen Geothermie ihre Berechtigung haben, ist sehr groß. Für ein besseres Verständnis und für einen besseren Durchblick erscheint es dabei sinnvoll, in diese Vielfalt etwas Ordnung zu bringen, die sich zum Teil an der Physik orientiert, zum Teil der Praxis im Gelände geschuldet ist, was sich wiederum den Auswerte- und Interpretationsmethoden mitteilt. Eine einfache Unterscheidung betrifft *passive* und *aktive Verfahren,* was in den Abb. 3.33–3.35 symbolisch und mit der Aufzählung der entsprechenden Messmethoden zusammengefasst ist. Passive Verfahren registrieren natürlich vorkommende Felder wie das Schwerefeld der Erde, das Erdmagnetfeld, die natürliche radioaktive Strahlung der Gesteine oder natürliche elektrische Ströme, die im Untergrund fließen. Der Messaufwand ist gerätemäßig überschaubar, da nur ein „Empfänger" benötigt wird. Aktive Verfahren haben den großen Vorzug, dass man die Messung im Gelände wie in einem Laborexperiment gezielt aufbauen und an die geologischen und technischen Gegebenheiten anpassen und notfalls verändern kann. Das verlangt mehr Aufwand, mit dem Einsatz eines „Senders", dem Energie (Strom, mechanische Energie) zugeführt und der mit entsprechendem Mehrpersonal betrieben werden muss, was ein Kostenfaktor ist. Eine Zwischenstellung nehmen die Verfahren ein, die zwar einen aktiven „Sender" nutzen, auf den man aber – passiv – keinerlei Einfluss hat. Beim VLF ist es ein wirklicher Radiosender; schaltet der ab, ist die

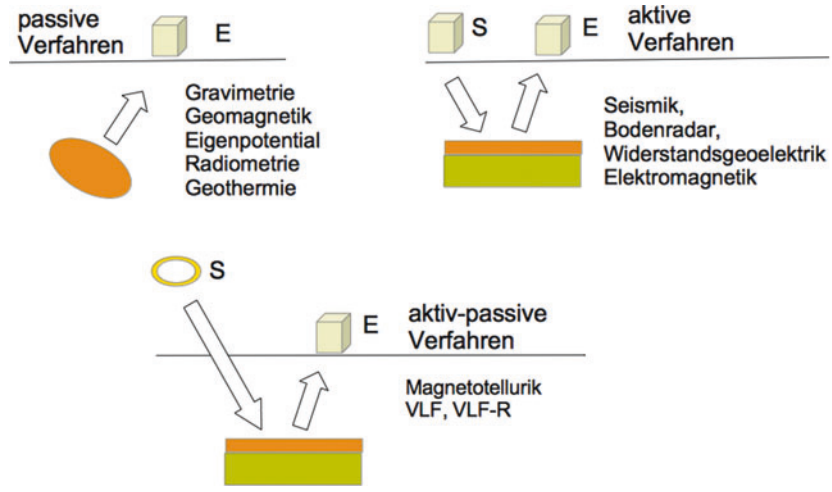


Abb. 3.33 Passive und aktive Verfahren an der Erdoberfläche. Aktiv-passiv bedeutet, dass es sich um aktive Quellen handelt, auf die aber – da weit entfernt – kein Einfluss zu nehmen ist. S = Sender, E = Empfänger

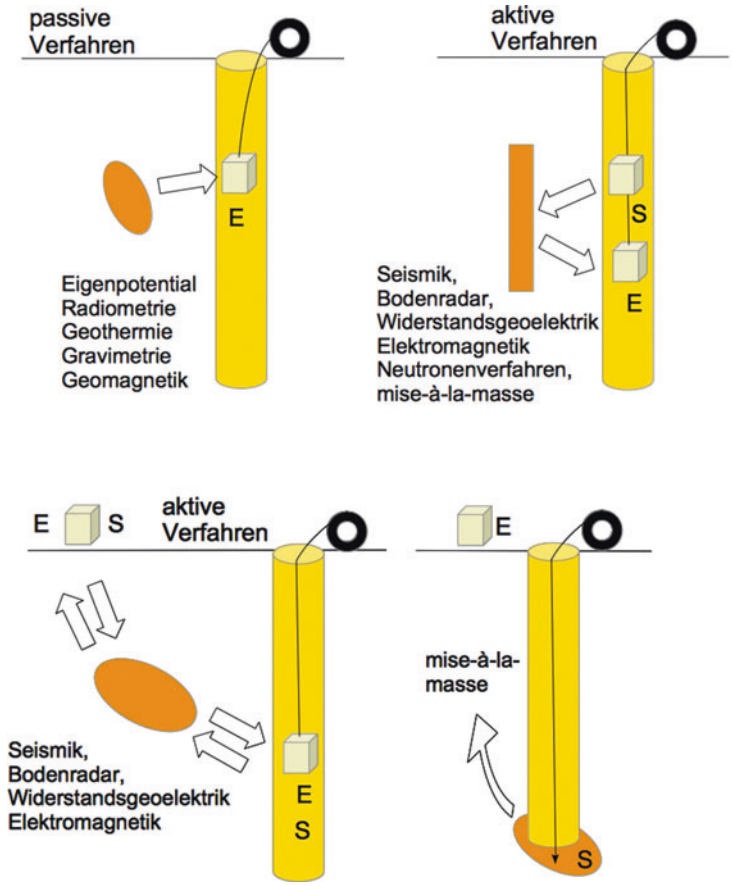


Abb. 3.34 Passive und aktive Verfahren bei der Bohrlochgeophysik und aktive Verfahren bei kombinierten Messungen Bohrloch – Oberfläche. S = Sender, E = Empfänger

Messung beendet. Bei den magnetotellurischen Verfahren sind es die stark unregelmäßigen Schwankungen der elektromagnetischen Felder, die ihren Ursprung in der Ionosphäre und dem circumäquatorialen Gewittergürtel haben. Liefern diese Quellen zeitweise keine „passenden" Frequenzen, müssen die Messungen verschoben werden.

Passive und aktive Verfahren unterscheidet man auch bei der Bohrlochgeophysik (Abb. 3.34), wobei es als Besonderheiten noch die geophysikalische Tomographie (Abb. 3.35), die Verknüpfung von Oberflächen- und Bohrlochmessungen und das für sich stehende *mise-à-la-masse*-Verfahren gibt.

Physikalisch grundsätzlich unterschiedlich sind die Potentialverfahren und die Laufzeitverfahren (Abb. 3.36), deren Eigenheiten bezüglich Auflösungsvermögen, Untersuchungstiefe und Reaktion auf Filterverfahren in den vorhergehenden Abschnitten angesprochen wurden. Wichtig ist, dass mit den Potentialverfahren Gravimetrie und

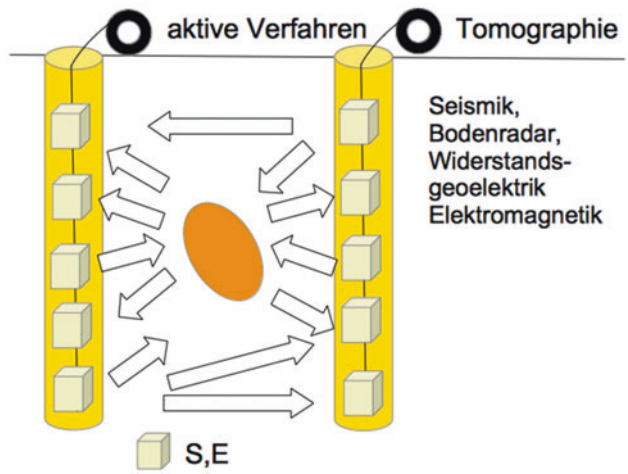


Abb. 3.35 Geophysikalische Tomographie. Mit zwei oder mehr Bohrungen, gegebenenfalls mit Einbeziehung von Oberflächenmessungen, wird der Untergrund von allen Seiten gewissermaßen „durchleuchtet“

Geomagnetik über einem horizontalgeschichteten Untergrund keine Informationen zu erlangen sind (Abb. 3.36, links) und nur laterale Änderungen von Strukturen und Lithofazies „gesehen“ werden. Ein geschichteter Untergrund ist dagegen das typische Beispiel, wenn die Grundzüge der Refraktionsseismik und der Reflexionsseismik einem Neuling vermittelt werden sollen, obgleich gerade auch die Untersuchung tektonischer Strukturen, unregelmäßiger Sedimentkörper und lateraler Faziesänderungen die Seismik so wertvoll macht.

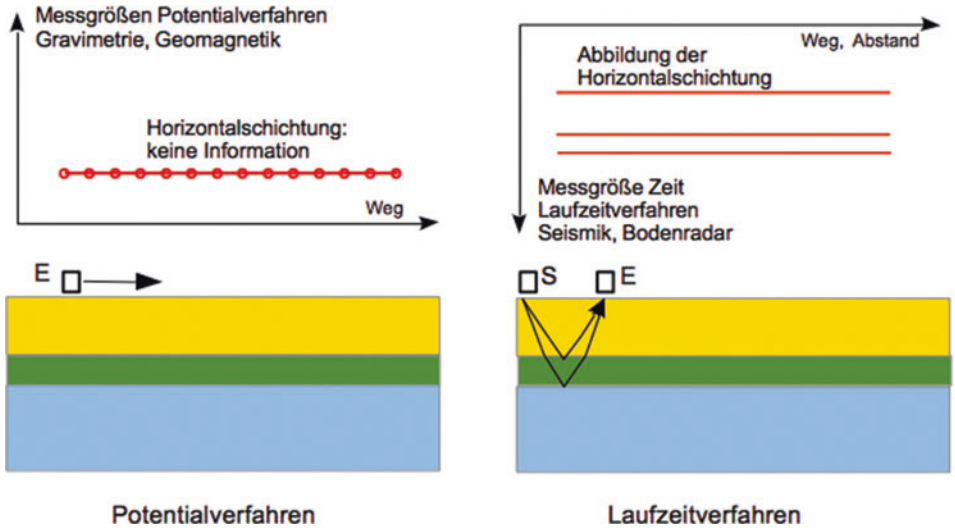


Abb. 3.36 Potentialverfahren Gravimetrie und Geomagnetik sowie Laufzeitverfahren Seismik und Bodenradar über einem horizontalgeschichteten Untergrund

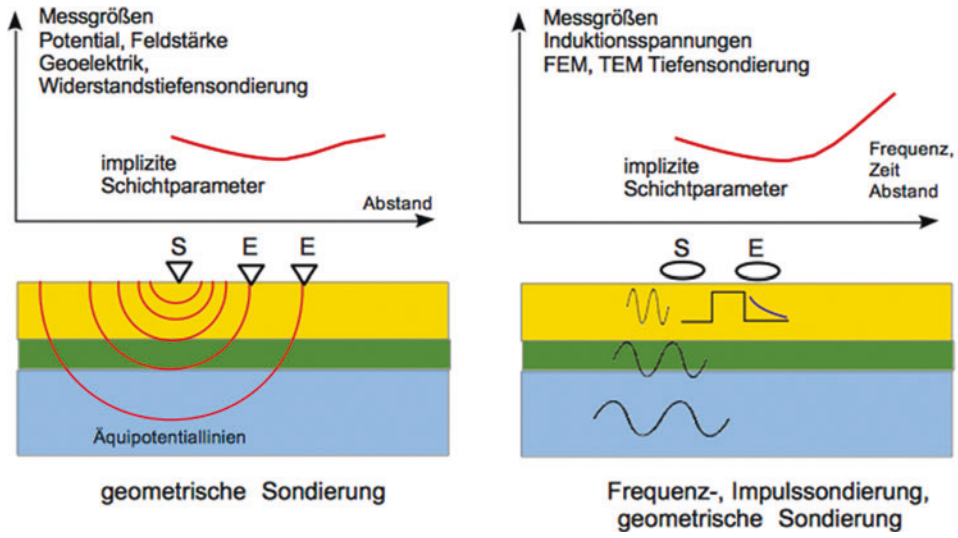


Abb. 3.37 Geoelektrische Sondierungen über horizontal geschichtetem Untergrund: Gleichstrom- und Wechselstromverfahren

Eine gewisse Zwischenstellung nehmen die Verfahren der Geoelektrik ein. Sie leiten sich auch aus Potentialen ab, können aber auch einen horizontal geschichteten Untergrund untersuchen. Am einleuchtendsten macht das Abb. 3.37 (links) für die geoelektrische Widerstandstiefensondierung klar. Der Sender S, dem ein elektrischer Strom zugeführt wird, erzeugt ein Potential mit – zweidimensional gesehen – Äquipotentiallinien, die zunehmend tiefer in den Untergrund greifen. Entfernt sich der Empfänger E vom Sender S, so misst er zunehmend Potentiale bzw. abgeleitete Feldstärken, die von tiefer liegenden Schichten beeinflusst sind. Bei einer solchen geometrischen Sondierung entsteht eine Sondierungskurve, die implizit die Schichtparameter enthält.

Komplexer sind die Verhältnisse, wenn mit Wechselströmen (FEM) oder elektrischen Impulsen (TEM) gearbeitet wird (Abb. 3.37, rechts). Dabei werden die elektrischen Felder im Untergrund meist über Spulen oder Leiterschleifen induktiv aufgebaut, und auch der Empfänger ist meist eine unterschiedlich dimensionierte Spule. Wie beim Gleichstrom hat man eine geometrische Sondierung, wenn Sende- und Empfangsspule auseinanderwandern und dabei systematisch tiefer schauen, darüber hinaus aber auch die Möglichkeit einer Frequenzsondierung, wenn bei fester Geometrie die Frequenz am Sender systematisch geändert wird. Dann kommt der Zusammenhang zum Tragen, der im Abschn. 3.6.1 eine wichtige Rolle spielt, dass Signale tiefer Frequenzen eine größere Eindringtiefe haben und umgekehrt. In der Physik ist das beim Begriff „Skin-Effekt“ angesiedelt. Beides, geometrische und Frequenzsondierung lassen sich kombinieren und den jeweiligen geologischen und Geländeverhältnissen anpassen. Methodisch wiederum zu unterscheiden sind die Verfahren der transienten Elektromagnetik (TEM, auch TDEM, *time domain*

electromagnetics), bei der der sinusförmige Wechselstrom durch Impulse ersetzt und die Zeitabhängigkeit der Impulsausbreitung registriert wird. Es wird offenkundig, dass gerade für den Bereich der Oberflächennahen Geothermie, in dem die Hydrogeologie und das Grundwasser eine so entscheidende Rolle spielen, die Geophysik eine enorm große methodische Vielfalt der geoelektrischen Verfahren zur Verfügung stellt.

Weitere Klassifizierungen kann man mit der Zuordnung von aktiven Messprozeduren zu Horizontal- und Tiefensondierungen vornehmen, wobei bei der Tiefensondierung die Messgeometrie an einem Ort verändert wird und bei der Horizontalsondierung mit einer festen Messgeometrie ein mehr oder weniger regelmäßiges Punktraster – auf Profilen oder flächig – aufgenommen wird. Da Letzteres in der Konstruktion von Karten der Messgröße resultiert, spricht man auch von einer geophysikalischen Kartierung, z. B. einer Widerstandskartierung.

Einen Schritt weiter gehen echte 3D-Messungen, die als *Tomographie* versuchen, aus den Daten sehr vieler Messstationen gezielt im Untergrund bestimmte Bereiche mit ihren petrophysikalischen Parametern anzusprechen. Was in Abb. 3.35 bereits für die Bohrloch-Tomographie aufgezeigt wurde, kann sinngemäß auf die Messung an der Erdoberfläche übertragen werden, wo dann von seismischer, Widerstands- oder Bodenradar-Tomographie die Rede ist. Bei der Tiefen Geothermie steht eine solche aufwendige 3D-Seismik häufig am Ende aller vorbereitenden Untersuchungen, ehe mit den Bohrungen begonnen wird.

Treten, was nicht selten der Fall ist, langgestreckte geologische Strukturen mit mehr oder weniger immer dem gleichen Querschnitt (Gräben, Horste, Antiklinalen, Gänge) auf, so bleiben einleuchtenderweise geophysikalische Messgrößen auf Profilen im Streichen der Strukturen konstant, die man gemeinhin zweidimensionale Strukturen nennt. 2D-Messungen heißen dann optimal angelegte Messungen auf Profilen senkrecht zum Streichen (Abb. 3.38). Was die Physik der Auswertung und Interpretation sehr vereinfacht,

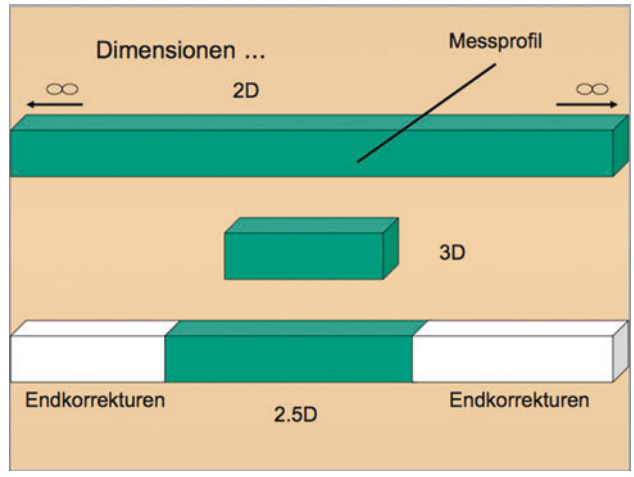


Abb. 3.38 Modellkörper unterschiedlich definierter Dimension bei geophysikalischen Messungen auf querenden Profilen.

ist in der Praxis häufig als problematisch anzusehen, wenn einzelne 2D-Profile gemessen und ausgewertet werden, ohne dass überhaupt die Voraussetzungen der Zweidimensionalität geprüft wurden. Bei geoelektrischen Widerstandsmessungen mit der sogenannten Multielektroden-Anordnung ist das regelmäßig zu konstatieren. Treten längere Strukturen auf, die überschaubar die Zweidimensionalität nicht erfüllen, helfen bei der Auswertung und Modellierung solcher Strukturen vielfach sogenannte Endkorrekturen, was den Begriff der immer wieder zu lesenden 2.5D-Modellierung erklärt (Abb. 3.38).

3.4.2 Erkundungstiefen

Die später im Abschn. 3.9.1 zitierte Frage des leitenden Ingenieurs eines Ingenieurbüros, ob man denn tatsächlich mit der Geophysik in den Untergrund schauen könne, ist sicherlich eine Ausnahme. Sehr viel häufiger wird gefragt, wie tief man denn mit der Geophysik schauen kann, meist im Zusammenhang mit einem bestimmten Verfahren, dem der Fragesteller im Gelände beiwohnt. Vielfach kann man getrost und mit gutem Gewissen antworten: Im Prinzip – theoretisch – beliebig tief. Das ist bei den passiven Potentialverfahren, zum Beispiel der Gravimetrie und Geomagnetik, mit dem Hinweis auf die Formeln für das Potential, in denen der Abstand R im Nenner steht, mithin das Potential und die abgeleiteten Größen erst im Unendlichen für $R = \infty$ Null werden, korrekt. Bei den aktiven Verfahren der Seismik und Geoelektrik gibt es im Prinzip auch keine Beschränkung. Denken wir an schwere Erdbeben, bei denen die Erdbebenwellen den gesamten Erdkörper durchlaufen und Informationen bis hinunter in den Erdkern hinein liefern, so wird deutlich, dass es vor allem, aber nicht allein, eine Frage der Energie ist, die bei seismischen Untersuchungen aufgebracht werden muss. Bei der geoelektrischen Widerstandstiefensondierung gilt die ganz grobe Faustformel, dass die Kabelauslage für die Stromzuführung an die Erder mindestens fünf bis zehn Mal so groß sein muss wie die angestrebte Untersuchungstiefe. Der einfache Schluss: Ich muss die Kabel nur 200 km weit im Gelände auslegen, um bis in 20–40 km Tiefe erkunden zu können. Obgleich solche Messungen unter Zuhilfenahme von neu eingerichteten Hochspannungsleitungen oder Telefonleitungen testweise für Forschungszwecke durchgeführt wurden und man tatsächlich Informationen zur elektrischen Leitfähigkeit aus dem oberen Erdmantel erhalten hat, wird sich der genannte Fragesteller damit nicht zufrieden geben. Deshalb wird man etwas weniger pauschal, aber dennoch zunächst etwas allgemein antworten: Bei den aktiven Verfahren verlangen zunehmende Erkundungstiefen zunehmenden Platzbedarf für die Messungen im Gelände, zunehmende Energie, die in den Untergrund geschickt werden muss, damit verknüpft leistungsfähigere Messgeräte, die wiederum größer und schwerer sind, was mehr Bedienungspersonal bedeutet und natürlich ein Anwachsen der Kosten unvermeidlich macht. Bei den passiven Potentialverfahren trifft das weit weniger zu; ein koffergroßes Gravimeter oder eine handgehaltene Magnetometersonde sind für alle Erkundungstiefen immer dieselben. Hier stellt die Geophysik andere Möglichkeiten im Rahmen der Datenverarbeitung (Abschn. 3.4.5) zur Verfügung, um sich unterschiedliche Tiefenbereiche genauer anzuschauen.

3.4.3 Auflösungsvermögen

Auch noch so große Energien, die in den Untergrund geschickt werden, beseitigen nicht einen wesentlichen Sachverhalt aller aktiven geophysikalischen Messungen: das Auflösungsvermögen für geologische Strukturen und Verteilungen petrophysikalischer und hydraulischer Parameter, das sehr rasch oder auch weniger rasch mit der Tiefe abnehmen kann und worauf bereits eingangs (Abb. 3.3) am Beispiel aus der Geoelektrik hingewiesen wurde. Auch bei den passiven Potentialverfahren wachsen mit zunehmender Tiefe mehrere beieinanderliegende Körper im Messprofil oder im Isolinienplan für das Auge zu einer einzigen Körperanomalie zusammen.

Bei der Reflexionsseismik wird immer wieder – zurecht – das erhebliche Auflösungsvermögen für Schichten und Strukturen auch in großen Tiefenbereichen angeführt. Aber auch dabei gibt es das abnehmende Auflösungsvermögen, was einem generellen Prinzip gehorcht und allen Messungen eigen ist, die geophysikalische Signale in Wellenform aussenden und empfangen. Dazu gehören neben der Seismik mit akustischen Wellen auch die mit stark unterschiedlichen Frequenzen elektromagnetischer Wellen arbeitenden Verfahren der Geoelektrik einschließlich der verschiedenen Verfahren der Magnetotellurik und der Radiowellen-Methode (VLF), aber auch das Bodenradar. Und da gibt es einen Rückgriff auf den vorstehenden Abschnitt mit einem Zusammenwirken von Signalfrequenz, Erkundungstiefe und Auflösungsvermögen. Bei allen Wellenverfahren geht eine niedrige Signalfrequenz (entsprechend große Wellenlänge) mit einem größeren Eindringvermögen bei geringerem Auflösungsvermögen einher, während höhere Frequenzen geringere Eindringtiefen erzielen, aber dort ein erhöhtes Auflösungsvermögen besitzen. Beim Bodenradar resultieren die im Allgemeinen geringe Untersuchungstiefe und das vergleichsweise hohe Auflösungsvermögen aus den sehr hohen Frequenzen der von den Antennen abgestrahlten Signale. Auch für die Oberflächennahe Geothermie gilt das Prinzip: Langwellige Temperaturänderungen dringen weiter in den Untergrund ein als kurzwellige, was sich bei den jahreszeitlichen und tageszeitlichen periodischen Temperaturänderungen deutlich bemerkbar macht (siehe dazu auch Abschn. 3.6.7).

Bei den seismischen Verfahren kommt es zu einer Verknüpfung von Physik und Geologie, die Einfluss auf das Auflösungsvermögen hat. Im Allgemeinen besteht bei seismischen Messungen das in den Untergrund geschickte Wellensignal aus einem mehr oder weniger breiten Frequenzgemisch, und aus diesem Gemisch haben nach dem zuvor Gesagten die tieferen Frequenzanteile ein größeres Eindringvermögen, und umgekehrt die hohen Frequenzen ein geringeres Eindringvermögen. Der Grund dafür sind die Eigenschaften der Gesteine, die an sich elastische Ausbreitung seismischer Wellen durch inelastische Absorption zu schwächen, die bei hohen Frequenzen auch entsprechend hoch ist. Je weiter und damit je tiefer sich ein seismischer Wellenzug bewegt, umso mehr werden die hochfrequenten Anteile herausgefiltert, womit das abnehmende Auflösungsvermögen mit der Tiefe erklärt ist. Die Gesteine, die die tiefen Frequenzen mithin bevorzugt „passieren“ lassen, machen nichts anderes als ein elektrisches Filter aus Bauteilen wie Kondensatoren, Spulen und Widerständen, die zu Tief-, Hoch- und Bandpässen

für Wechselströme zusammengeschaltet werden, oder der Computer, an dem solche Filter mathematisch und für alle Arten von Wellenvorgängen erzeugt werden können, was im Abschn. 3.4.5 wieder aufgegriffen wird. Hier wird noch einmal herausgestellt, dass der geologische Untergrund für seismische Wellen einen Tiefpass darstellt.

Untersuchungstiefe und Auflösungsvermögen können auch bei Potentialverfahren instrumentell beim Messen im Gelände oder bei der Datenverarbeitung beeinflusst werden. Der mathematisch-physikalische Hintergrund heißt Gradient oder erste bzw. zweite Ableitung, was bereits in der Schule bei der Kurvendiskussion der Mathematik Thema ist und beim digitalen Geländemodell (DGM) diskutiert wurde (Abschn. 3.3.2). Der Gradient beschreibt die Änderung einer Feldgröße (Schwerefeld, Magnetfeld, elektrisches Feld) in einer vorgegebenen Richtung, meist horizontal oder vertikal, mit den Begriffen Horizontal- bzw. Vertikalgradient (Abb. 3.39). Da der Gradient messtechnisch meist nicht zu erfassen ist, behilft man sich mit einer Näherung, indem man mit jeweils zwei dicht benachbarten Messsonden die Felddifferenz registriert und die entsprechenden Messgeräte für Gravimetrie, Geomagnetik und Elektromagnetik trotzdem Gradiometer nennt. Die Physik sagt, dass mit der Gradientenmessung ein höheres Auflösungsvermögen erzielt wird, was Abb. 3.39 an einem Modellbeispiel aus der Gravimetrie für den Horizontal- und den Vertikalgradienten deutlich macht. Verständlicherweise gehen Gradientenmessungen mit stark erhöhten Anforderungen an die Messgenauigkeit einher, was sich stark und negativ auf

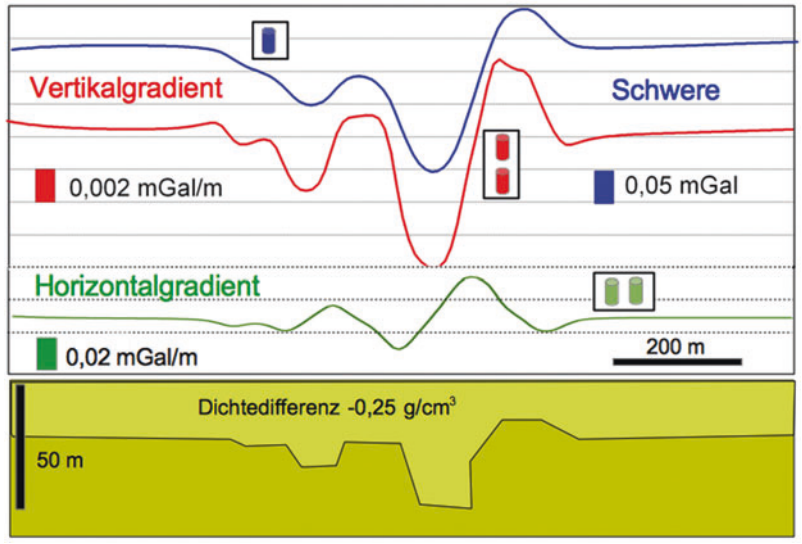


Abb. 3.39 Berechnete Schwerekurven für ein Profil über ein zweidimensionales Strukturmodell mit einer Lockersediment-Überdeckung über Festgestein mit höherer Dichte. Das höhere Auflösungsvermögen für die Reliefstrukturen bei den Gradientenkurven im Vergleich mit der reinen Schweremessung ist augenfällig. Symbolisch zeigen die jeweiligen Kästchen die Messanordnung der Einzel- und Differenzensonden

die Untersuchungstiefe auswirken kann – einmal mehr der geophysikalische Dualismus: Größere Untersuchungstiefen bedeuten allgemein reduziertes Auflösungsvermögen.

Gradientenfelder müssen nicht immer mit einem Messgerät erfasst werden. Beim Potentialfeld der Gravimetrie sagt die Physik z. B., dass aus gemessenen Flächendaten der Schwereverteilung auch die Gradienten in vertikaler und horizontaler Richtung berechnet werden können, was umso besser gelingt, je enger das Messpunktraster ist. Einfacher ist es beim Horizontalgradienten, der für alle Werteverteilungen, ob Geophysik oder Topographie oder Grundwasserspiegel, auf Profilen oder über Flächen verteilt berechnet werden kann und feinere Strukturen für das Auge besser auflöst.

3.4.4 Signal-Rausch-Verhältnis S/R

Der Begriff des Signal-Rausch-Verhältnisses S/R stammt aus der Mess- und Nachrichtentechnik und bezeichnet den mittleren Nutzsignalpegel, der von einem mittleren Störpegel, dem Rauschen, überlagert ist, er kann aber auch in vielen anderen technischen Bereichen als Maß für die Qualität eines Nutzsignals dienen. Da angewandte und praktische Geophysik das Messen impliziert, ist das S/R eine wichtige Größe und kann sogar eine Erweiterung über das physikalische und elektronische Rauschen hinaus in Richtung geologisches Rauschen erfahren.

Rauschen, physikalisches und geologisches, tritt bei allen Messungen der Geophysik auf, und es muss immer das Ziel sein, das Verhältnis S/R so groß wie möglich zu gestalten (Abb. 3.40). Davon hängen einleuchtenderweise die erzielbaren Erkundungstiefen

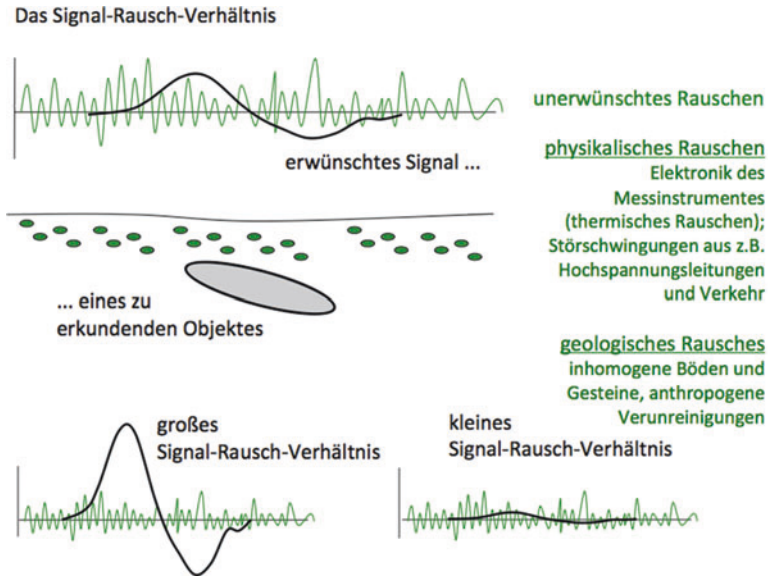


Abb. 3.40 Das Signal-Rausch-Verhältnis bei geophysikalischen Messungen

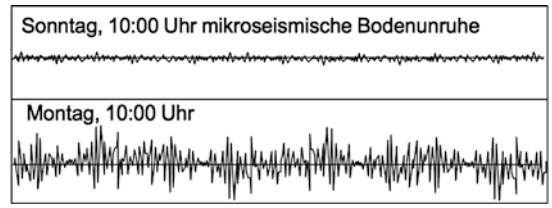


Abb. 3.41 Ältere Registrierung der seismischen Bodenunruhe in Innsbruck. (Verändert aus Hardtwig 1962)

(Abnahme des Nutzsignals bei zunehmender Tiefe) und das Auflösungsvermögen (Erkennen auch kleinerer Schwankungen des Nutzsignals) ab, womit eine Verknüpfung zu den beiden vorhergehenden Abschnitten hergestellt ist.

Bei den aktiven Verfahren der Geoelektrik und Seismik kann das S/R bei vorgegebenem Rauschen einfach durch eine Vergrößerung der Energie erhöht werden: Stärkere Ströme in den Boden schicken und eine leistungsfähigere seismische Quelle einsetzen (z. B. Fallgewicht statt Vorschlaghammer). Bei seismischen Messungen kann eine Verlegung in die Nachtstunden oder ans Wochenende das Verkehrsrauschen reduzieren (Abb. 3.41), was aber das Rauschen durch die permanent existierende Mikroseismik weit entfernter Quellen, z. B. der Küstenbrandung, nicht eliminiert. Interessanterweise hat es in der letzten Dekade aber auch Entwicklungen gegeben, den gewöhnlichen seismischen „Lärm“ der Umgebung (Straßenverkehr, Eisenbahnen) selbst für eine Untergrunderkundung (sogenannte *seismische Interferometrie*) einzusetzen (z. B. Dragonov 2009 mit weiteren Zitaten).

Ein wichtiges Mittel, das S/R zu vergrößern, besteht im sogenannten *Stapeln* der Signale. Lasse ich bei der Seismik das Fallgewicht zehn oder zwanzig Mal hintereinander, vielfach mit zusätzlicher Beschleunigung, auf den Boden prallen und addiere die an den Empfängern (Seismometer, Geophone) ankommenden Signale im Rechner, so wird das Nutzsignal, das stets dieselbe Form hat, 10 bzw. 20 Mal so groß, während der im allgemeinen statistisch schwankende Störpegel nur um den Faktor $\sqrt{10}$ bzw. $\sqrt{20}$ anwächst (Abb. 3.42).

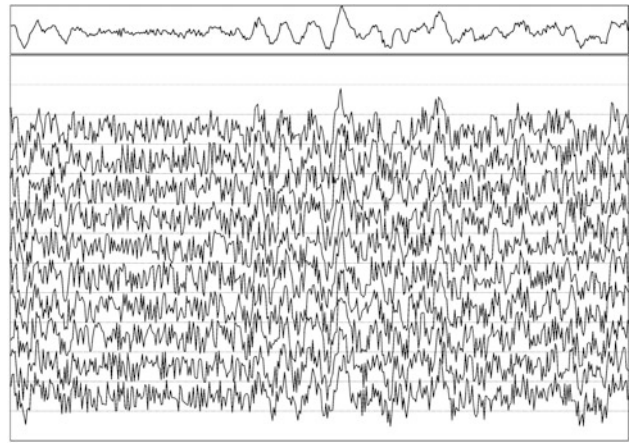


Abb. 3.42 Effekt des Stapelns zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Addition der zehn Spuren und Division der Summe durch zehn ergibt die obere Spur

Auch beim methodisch verwandten Bodenradar werden die abgestrahlten und empfangenen Antennensignale vielfach gestapelt. Bei Magnetfeldmessungen mit digitaler Datenaufnahme kann das Signal mit manchen Magnetometern 256 Mal pro Sekunde abgegriffen und zu einem einzigen Messwert gestapelt werden, was gegebenenfalls störende elektromagnetische 50-Hz-Schwingungen z. B. aus Hochspannungsleitungen unterdrückt. Bei geoelektrischen Messungen mit Wechselstrom werden ganz scharf begrenzte Frequenzen fern der üblichen 50-Hz-Netzfrequenz oder der $16\,{}^{2}/_{3}$-Hz-Eisenbahnfrequenz benutzt.

Anders als beim instrumentell reduzierten Rauschen oder durch ein Ausweichen in Zeiten verringerter Störungen ist das geologische Rauschen nicht beeinflussbar, es sei denn, man räumt oberflächennahe Schichten mit störenden Komponenten (z. B. Aufschüttungen oder Schrott bei der Kampfmittelräumung mit Magnetik oder Elektromagnetik) fort, um dann über einem „sauberen" Untergrund zu sondieren, was nicht unüblich ist. Möglichkeiten für ein geologisches Rauschen bleiben dann immer noch vielfältig: magnetisierte Findlinge oder kleinere Geschiebe in pleistozänen Moränenablagerungen Norddeutschlands oder im Alpenvorland, desgleichen Basalt-Gerölle in Flussablagerungen von Rhön, Vogelsberg oder in anderen Vulkanprovinzen. Verkarstungserscheinungen mit Hohlraumbildungen und lehmgefüllten Spalten können langwellige Schwereprofile über tieferliegenden Strukturen mit einem kurzwelligen Rauschen durch stärkere oberflächennahe Dichteschwankungen überlagern. Das geologische Rauschen muss nicht immer negativ gesehen werden. Bei der genannten Gravimetrie können genau die Verkarstungserscheinungen im Vordergrund der Erkundung stehen, und ganze Gesteinskörper können durch unterschiedliches „Rauschen" z. B. magnetischer Anomalien charakterisiert werden.

3.4.5 Datenverarbeitung

Mit der rasanten Entwicklung der Computer in den vergangenen Dekaden hat die Datenverarbeitung mit den rechnerischen und graphischen Möglichkeiten einen ungeahnt wichtigen Platz in der angewandten und praktischen Geophysik eingenommen, wobei bereits im Gelände bei vielen Verfahren eine Steuerung der Messprogramme mithilfe des Computers erfolgt. Die Datenverarbeitung (eingedeutscht auch „das Datenprocessing") steht vorbereitend am Anfang der Datenauswertung, die meist in die Berechnung von physikalischen Modellen für geologische oder technische Strukturen mündet (Abschn. 3.4.6).

Die am Anfang stehende Datenaufbereitung strebt vielfach danach, das zuvor diskutierte Signal-Rausch-Verhältnis weiter zu verbessern, was darüber hinausgehend auch so formuliert werden kann, dass erwünschte Anteile der gemessenen Felder (z. B. bei den Potentialverfahren) oder Zeitsektionen (Seismik, Bodenradar) verstärkt herausgearbeitet und unerwünschte Anteile möglichst stark unterdrückt werden. Damit werden auch wieder die Begriffe Erkundungstiefe und Auflösungsvermögen der vorhergehenden Abschnitte aufgegriffen. Ein Hauptaspekt, der alle Messverfahren, Potential- und Laufzeitverfahren betrifft, kann unter dem Begriff der Datenfilterung gesehen werden.

Filterverfahren

Bei den Verfahren mit echtem Schwingungsverhalten der primär empfangenen Signale, bei denen es sich vielfach um in Spulen induzierte und mit Elektroden und Antennen registrierte Wechselspannungen handelt (Geophone der Seismik, Empfangsschleifen der Elektromagnetik, Erder bei der Magnetotellurik (Abb. 3.43), Antennen beim Bodenradar (Abb. 3.44)) werden die Begriffe von Wellenlänge, Frequenz, Periode und Amplitude

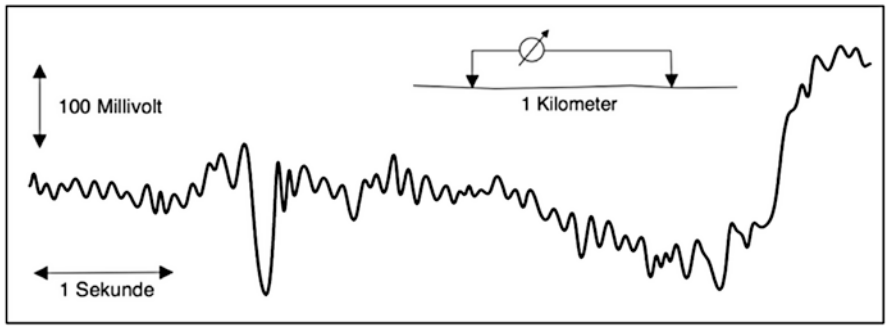


Abb. 3.43 Beispiel für die Registrierung tellurischer Ströme mit dem Hauptanteil aus der weltweiten Gewittertätigkeit. Eine Vorzugsfrequenz liegt bei etwa 8 Hz, die der langperiodischen Schwingung bei grob 0,2 Hz

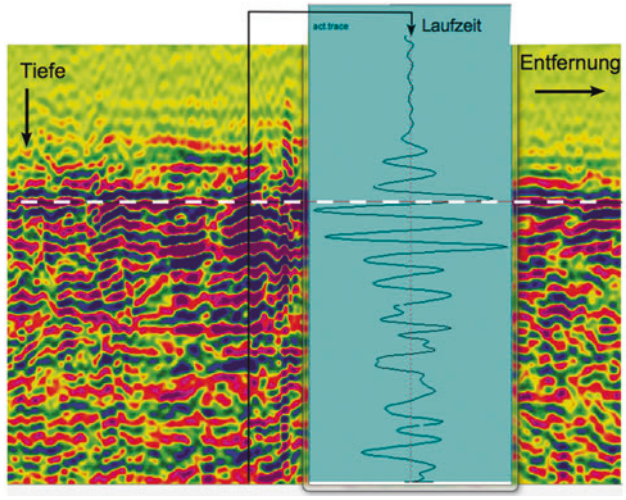


Abb. 3.44 Beispiel für ein Radargramm beim Bodenradar mit dem Wellenzug einer einzigen Spur. Das Radargramm selbst setzt sich aus unzähligen solcher Spuren zusammen, die beim Bewegen der Antennen registriert werden. Der einzelne Wellenzug verdeutlicht die Begriffe wie Frequenz, Wellenlänge, Amplitude, aber auch, wie die Farben (positive Amplitude rot-violett, negative Amplitude blau-grün) und deren Intensitäten zustande kommen. Prinzipiell könnte hier auch ein völlig analoges Beispiel aus der Reflexionsseismik stehen. (Bildquelle J. Poßekel)

leicht verstanden, was auch für die schon weiter oben angesprochenen Filterverfahren mit Hoch-, Tief- und Bandpässen gilt.

Wie der Name besagt, lassen Hochpässe hohe und Tiefpässe tiefe Frequenzen passieren. Bandpässe unterdrücken Frequenzen jenseits (oberhalb, unterhalb) eines wählbaren Frequenzbandes, das aber auch umgekehrt die Frequenzen in genau diesem Band unterdrücken kann (Name dann besser: Bandsperre). Im Feld können vielfach Störschwingungen (mechanisch von Maschinen, elektromagnetisch von z. B. Sendern) durch voreingestellte Filter an den Messgeräten unterdrückt werden. Die „Kunst des Filterns" setzt aber erst bei der Datenverarbeitung am Rechner ein, wo das analoge Filtern in Netzwerken mit digitalen mathematischen Prozeduren (digitale Filter) gewissermaßen nachgeahmt wird. Es besteht vielfach aus Probieren (auch mit verschiedenen Konzepten, z. B. in der Seismik mit einer Frequenz-, Dekonvolutions- oder Geschwindigkeitsfilterung) bis hin zum angenommen besten Ergebnis, führt den Unerfahrenen aber auch leicht in die Irre. Tiefpässe dienen vorzugsweise zur Unterdrückung höherfrequenter Störschwingen (Abb. 3.45), während Hochpässe in der Seismik eingesetzt werden, um das häufig stark störende Grundrauschen (engl. *ground roll*) langperiodischer (= niederfrequenter) seismischer Oberflächenwellen in den Griff zu bekommen.

Bandpässe mit der Betonung bestimmter Frequenzen oder Frequenzbänder können auch einen direkten geologischen Zweck erfüllen. Von der generellen Tiefpass-Wirkung der Gesteine bei der Ausbreitung seismischer Wellen war bereits die Rede, aber einzelne Schichten oder Schichtpakete können durchaus auch einen selektiven Einfluss auf die Wellenausbreitung haben und den Frequenzgehalt des Seismogramms beeinflussen, was im

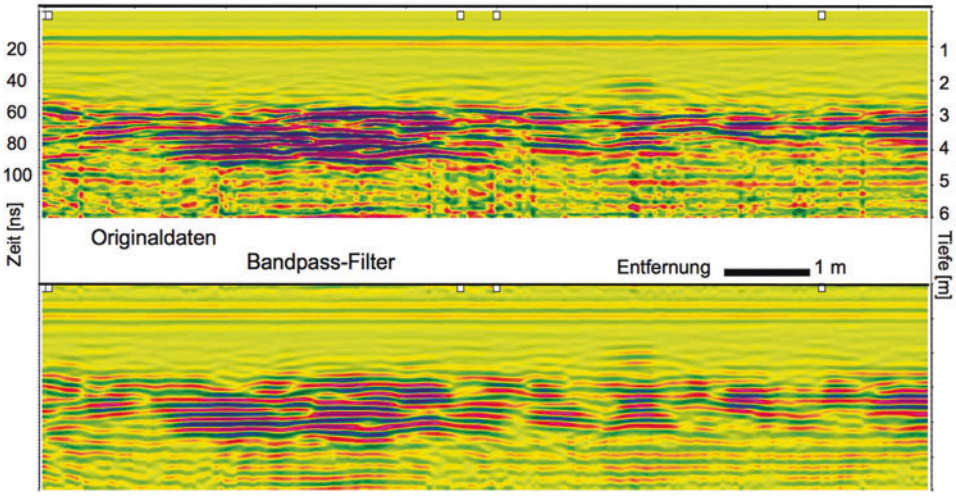


Abb. 3.45 Bodenradar – Originaldaten und tiefpassgefiltertes Radargramm. Beim deutlichen Radarreflektor in etwa 2,5 m Tiefe handelt es sich um die Oberkante eines Geschiebemergels. (Bildquelle J. Poßekel)

allgemeinsten Fall zur seismischen Attributanalyse gezählt werden kann. Als einfacher Zusammenhang gilt, dass dünne Schichten viel besser bei höheren Frequenzen gesehen werden, während mächtigere Schichten ausgeprägter bei niedrigen Frequenzen erscheinen. Entsprechend und als Beispiel können mit variabler Filterung zumindest qualitativ Mächtigkeitsänderungen einer bestimmten Gesteinseinheit verfolgt werden.

Das Besondere an der Anwendung digitaler Filter in der Geophysik ist der Umstand, dass die Prozesse, wie sie bei Zeitreihen (Seismik, Bodenradar, Magnetotellurik) angewendet werden, unmittelbar auf örtliche Datenverteilungen in Profilform (X, Y) und Flächenform (X, Y, Z) übertragbar sind, wobei Letzteres bereits beim digitalen Geländemodell (DGM) angesprochen wurde (Abschn. 3.3.2). Bei Messungen auf Profilen mit einer Folge von Messstationen ist das leicht nachvollziehbar, wenn man die Messwerte zu einem Kurvenzug verbindet, was Abb. 3.46 für eine Messreihe von VLF-Stationen zusammen mit Ergebnissen für eine Tiefpass-Filterung zeigt. Da der Computer nicht weiß, ob es sich um örtliche Variationen oder um digitalisierte Zeitreihen handelt, macht er auch keinen Unterschied beim Filtern.

Dabei tritt der geologische Aspekt des Filterns viel stärker als bei den Zeitreihen in den Vordergrund. Den Zusammenhang vermittelt anschaulich das Lampenbeispiel in Abb. 3.47. Tastet man in zunehmender Nähe zur Lichtquelle die Beleuchtungsstärke ab, so wird es – einleuchtend – zunehmend heller, und der Lichtkegel immer schmäler und schärfer. Genauso verhält es sich mit dem Potentialfeld eines geophysikalischen Störkörpers, was in Abb. 3.47 für die Schwereanomalie einer Kugel hinzugefügt ist und deutlich macht, wie die Amplitude anwächst und dabei die Anomalie immer schmäler wird, wenn die Kugel nach oben wandert. Vom Verständnis des Wellenzuges einer geophysikalischen

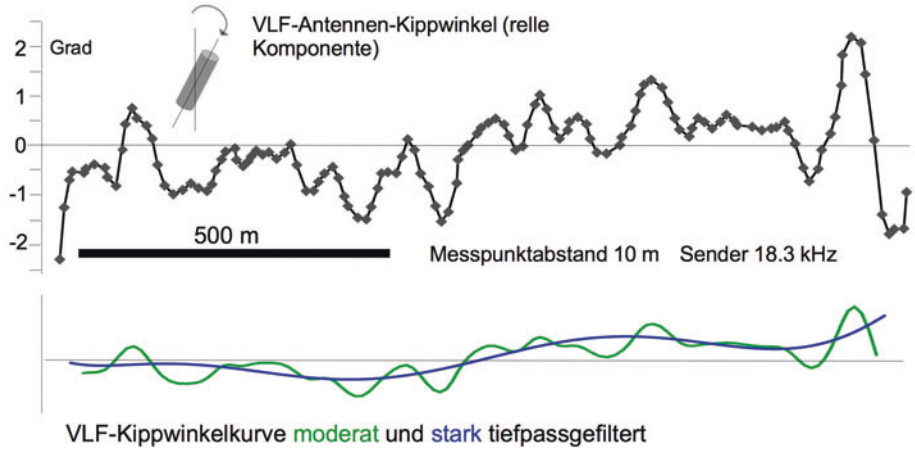


Abb. 3.46 Zu einer Kurve verbundene Messwerte von VLF-Messstationen (Radiowellenmethode, Abschn. 3.6.1) auf einem Profil mit den Charakteristika eines Wellenzuges mit Wellenlängen und Amplituden, den man verschiedenen Filterprozessen unterziehen kann, z. B. moderat (grün) bzw. stark (blau) tiefpassgefiltert

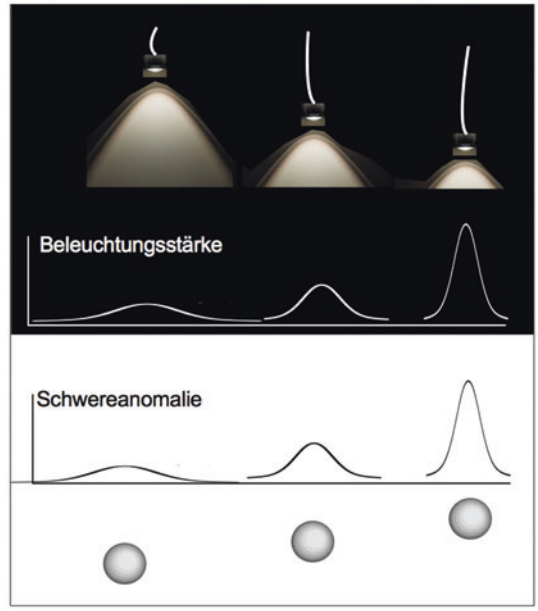


Abb. 3.47 Zum Verständnis von Breite und Amplitude einer Anomalie: Beleuchtungsstärke der Lampe und Schwereanomalie der Kugel nehmen gleichermaßen mit dem Quadrat der Lampenhöhe bzw. der Kugeltiefe ab

Anomalie her, wie ihn Abb. 3.47 zeigt, kann man umgekehrt sagen, dass mit zunehmender Tiefe des Körpers die Amplitude immer schwächer und ihre Wellenlänge immer größer wird. Damit sind der geophysikalische Filterprozess und seine geologische Bedeutung klar: Besteht der Untergrund aus einer Vielzahl verschiedener geologischer Körper, verteilt von oberflächennah bis in große Tiefen, so wird die geophysikalische Messung (z. B. Schwerefeld der Gravimetrie, Messung des Erdmagnetfeldes, elektrische Widerstandsmessung, Eigenpotentialmessung) stets eine Überlagerung aller Einzelwirkungen der Körper als Summensignal erfassen. Je nach Wahl eines geeignet konfigurierten Hoch-, Tief- oder Bandpasses kann dann in der Messkurve die Wirkung von Gesteinsmassen der unterschiedlichen Tiefenbereiche besonders betont und zur Auswertung herangezogen werden. Es versteht sich, dass damit wieder die Themen Erkundungstiefe und Auflösungsvermögen einbezogen sind.

Es besteht keine Schwierigkeit, diesen Zusammenhang auch auf flächige Datenverteilungen zu übertragen, wenn diese in einem regelmäßigen Messraster vorliegen bzw. durch

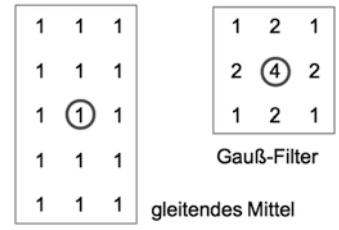


Abb. 3.48 Typische einfache Tiefpassfilter mit gleicher (links) und variierender Wichtung der umgebenden Messpunkte

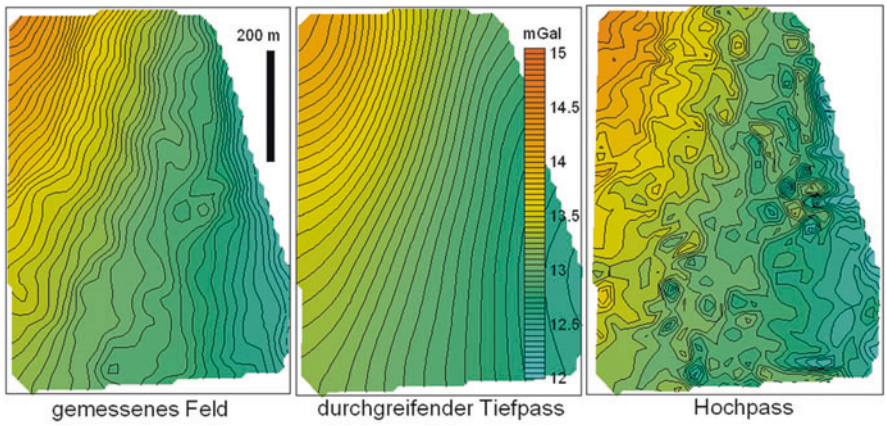


Abb. 3.49 Gemessenes Schwerefeld mit Feldern nach Tief- und Hochpassfilterung

Interpolation in ein solches Raster gebracht wurden (Abb. 3.48). Anschaulich ist das an einem sehr einfachen Tiefpass-Filter zu verstehen, dem sogenannten gleitenden Mittel. Dazu wird um einen Messpunkt ein Fenster wählbarer Länge und Breite aufgemacht, der Mittelwert aller in dieses Fenster fallenden benachbarten Messwerte gebildet und als neuer tiefpassgefilterter Wert dem Punkt zugeordnet. Dann wird das Fenster von Punkt zu Punkt über die gesamte Messfläche geschoben und letztlich ein neues, tiefpassgefiltertes Feld gewonnen. Es existiert eine große Zahl der unterschiedlichsten Filterkonfiguration, und in der Regel wird man erst nach mehreren Versuchen mit dem Resultat zufrieden sein.

Als Beispiel zeigt Abb. 3.49, wie Tief- und Hochpass auf ein gemessenes Schwerefeld der Gravimetrie wirken. Nach einem durchgreifenden Tiefpass (Mitte) zeichnet sich als strukturelles Hauptelement ein weitgespannter Schwereabfall des abtauchenden Grundgebirges ab, während nach einer Hochpassfilterung derselben Messung eine oberflächennahe, äußerst inhomogene Dichteverteilung im jungen Deckgebirge offenkundig wird.

Eine weitergehende Anwendung der Tiefpass-Filterung bringt Abb. 3.50. Hier wird das stark tiefpassgefilterte Schwerefeld im Sinne eines größerräumigen Trendfeldes gesehen. Zieht man vom gemessenen Feld diesen Trend ab, so erhält man die Strukturen, die sich diesem Trend überlagern und das sogenannte Restfeld der eher kurzwelligen Anomalien definieren.

Analytische Fortsetzung

Der Filterung von Daten aus Potentialfeldern kann man sich auch noch ganz anders nähern. Dazu bewegt man sich mit dem Messgerät gedanklich vom vermessenen Untergrund nach oben und entfernt sich somit von den geologischen Strukturen, oder man bewegt sich gedanklich umgekehrt nach unten in die Erde hinein, um sich den Strukturen zu nähern. Die mathematische Umsetzung heißt *analytische Fortsetzung nach oben* (AFO) bzw. *analytische Fortsetzung nach unten* (AFU) und besteht darin, aus den gemessenen Daten an

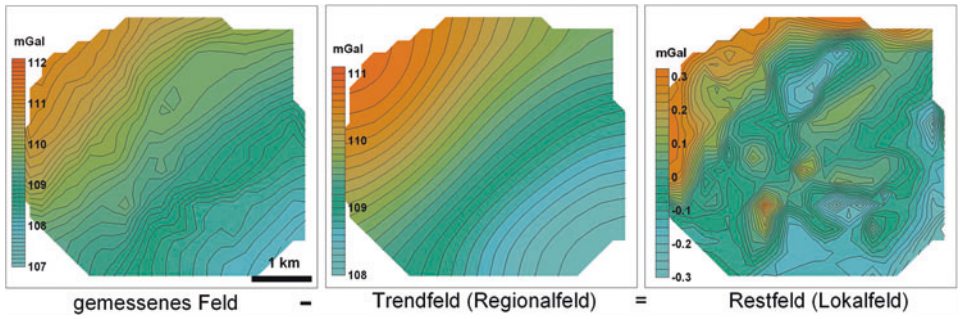


Abb. 3.50 Gemessenes Schwerefeld: Tertiär über Mesozoikum/Kristallin. Durchgreifende Tiefpassfilterung führt zu einem Trendfeld und nach Differenzbildung zum Restfeld der kurzwelligen Anomalien, die hier tektonisch gedeutet werden

der Erdoberfläche die Daten zu berechnen, die man mit dem Messgerät beispielsweise in 20 m Höhe oder 30 m unter der Erdoberfläche messen *würde*. Die Potentialtheorie lehrt, dass das möglich ist. Nach allen Ausführungen der vorhergehenden Abschnitte wird der Sinn sofort klar. Bei der AFO verschwinden die kurzwelligen Anomalien oberflächennaher geologischer Strukturen und Körper sehr viel rascher im Kartenbild als diejenigen tiefliegender, langwelliger Strukturen. Die AFO ist ein Tiefpass. Bewege ich mich mit der AFU in den Untergrund, so wachsen die kurzwelligen Anomalien oberflächennaher geologischer Strukturen rasch stark an, während es sich praktisch nicht auswirkt, wenn ich mit meinem gedachten Messgerät 30 m näher an der Kristallinoberkante in 1000 m Tiefe bin. Die AFU ist ein Hochpass. Abb. 3.51 zeigt ein Beispiel für die AFO, die durchaus Sinn auch im Rahmen kleinerer Messflächen machen kann.

Zwei wichtige Punkte bei allen Filterverfahren dürfen nie vergessen werden. Erstens: Filterverfahren erzeugen keine neuen Messdaten. Sie bereiten Datensätze von gemessenen Feldern für das Auge auf und können damit bestimmte Aspekte deutlicher sichtbar machen und andere unterdrücken, was die weitere Auswertung und geologische Interpretation erleichtert oder zwingender machen kann. Zweitens: Filterung von Daten kann dazu führen, dass in den gefilterten Karten Anomalien auftreten, die der Filterprozess künstlich erzeugt hat und die keinerlei realen Bezug zum geologischen Untergrund haben. Unerfahrenen Anwendern passiert das leicht.

Gradientenverfahren

Die Berechnung von Gradientenfeldern, auf die bereits beim digitalen Geländemodell (DGM, Abschn. 3.3.2) und beim Auflösungsvermögen im Abschn. 3.4.3 eingegangen wurde (Abb. 3.39), als es um die direkte Messung von Feldgradienten ging, kann im weiteren Sinne ebenfalls zu den Filterverfahren gestellt werden: Sie erzeugen keine neuen Messdaten, machen aber geologische Strukturen dem Auge besser sichtbar (Abb. 3.52) und reagieren auch spezifisch auf unterschiedliche Wellenlängen bei unterschiedlich tief

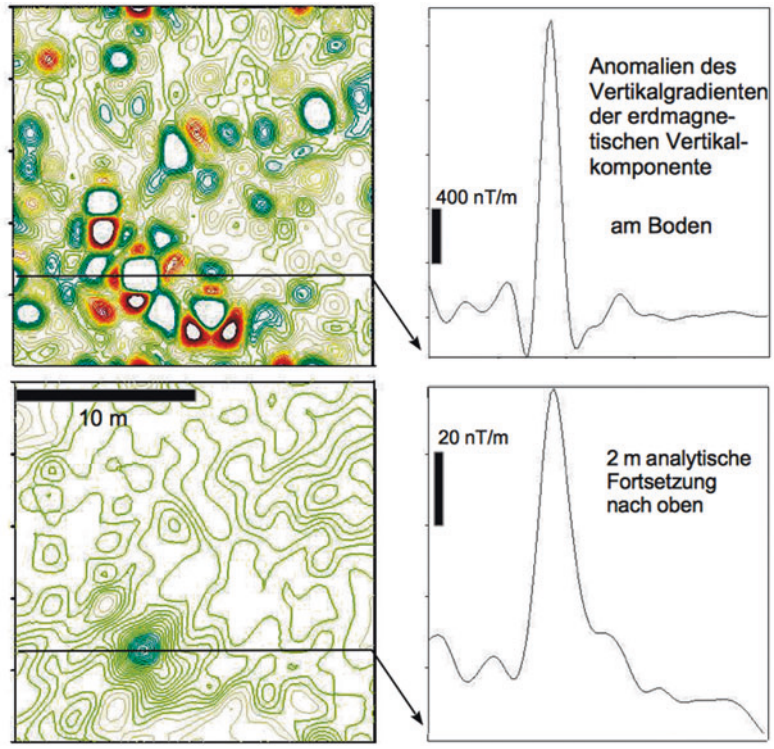


Abb. 3.51 Analytische Fortsetzung nach oben als Tiefpass-Filterung. Abstand der Isolinien 50 nT/m (oben) und 5 nT/m (unten). In den weißen Zentren der starken Anomalien über-/unterschreiten die Messwerte +/–500 nT/m. Messung über Altlastenverdachtsfläche

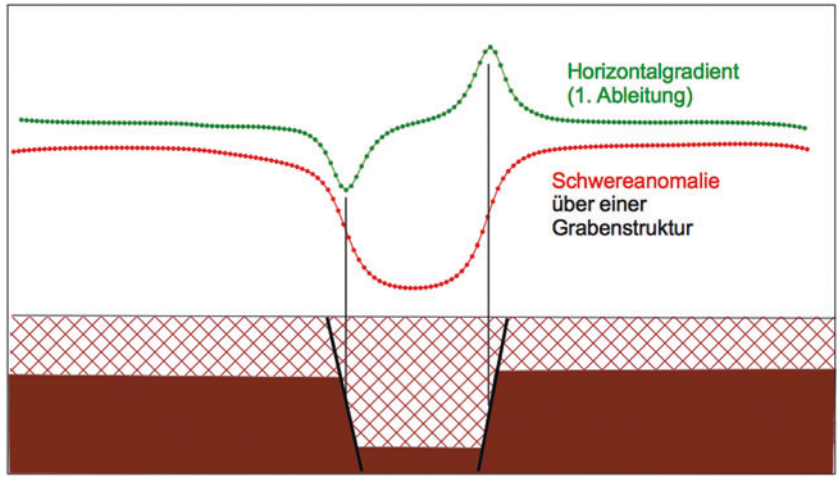


Abb. 3.52 Der berechnete Schwere-Horizontalgradient über dem Modell einer Grabenstruktur. Die Lage der tektonischen Grabenflanken, an denen der größte Dichtekontrast auftritt, wird durch Maximum und Minimum des Gradienten sehr scharf markiert

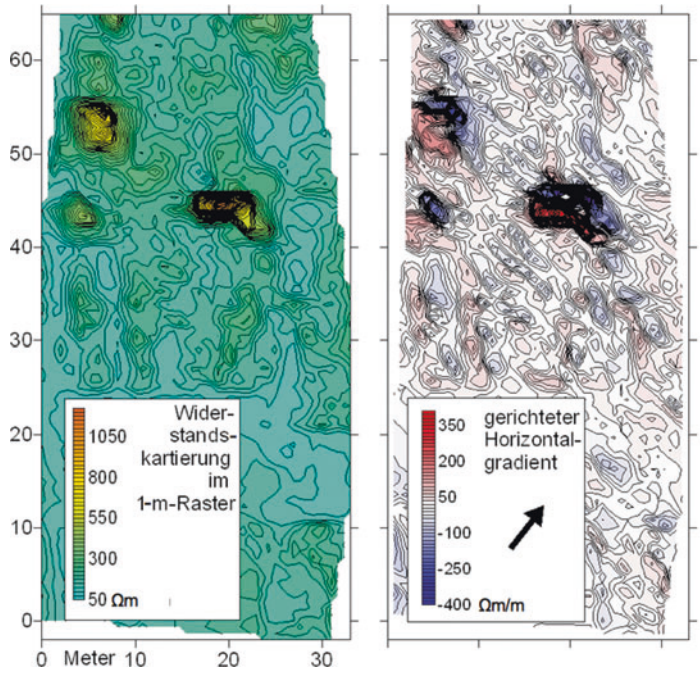


Abb. 3.53 Geoelektrische Widerstandskartierung über Resten alter Siedlungsspuren im Untergrund. Der gerichtete (Pfeil) Horizontalgradient präpariert das geologische Muster des Kalksteingebirges mit vorherrschender Streichrichtung lehmiger Verkarstungsspuren heraus

liegenden Strukturen mit Beziehungen zum Auflösungsvermögen. Besonders aussagekräftig können solche Gradienten werden, wenn sie als in verschiedene Azimute gerichtete Gradienten berechnet und dargestellt werden (Abb. 3.53).

3.4.6 Von der Messung zur (hydro)geologischen Aussage: Mehrdeutigkeit geophysikalischer Messungen

Geophysikalische Untersuchungen bestehen grundsätzlich aus drei Schritten:

- der Gewinnung von Messdaten,
- der Bearbeitung und physikalischen Auswertung der Daten sowie
- der geologischen, hydrogeologischen bzw. geotechnischen Interpretation.

Jeder der drei Schritte beinhaltet Fehlerquellen und Probleme. Die Gewinnung von korrekten Messdaten erfordert eine sorgfältige Planung, zuverlässig und fehlerfrei arbeitende Messapparaturen (keineswegs selbstverständlich!) und in aller Regel sehr erfahrene Geophysiker(innen) vor Ort. Messungen für den oberflächennahen Bereich müssen in sehr vielen Fällen auf problematischen Arealen mit künstlicher Bodenversiegelung, ober- und

unterirdischen Versorgungsleitungen, Metallzäunen, ober- und unterirdischen Bauwerken usw. erfolgen. Nur erfahrene Praktiker(innen) können abschätzen, ob und in welchem Maße Einfluss auf die Gewinnung sinnvoller Messdaten zu erwarten ist. Bei korrekter Arbeit wird man in einigen Fällen sagen (müssen), dass von geophysikalischen Messungen unter den gebotenen Umständen abzuraten ist. Vernünftig kann der Vorschlag sein, zunächst Testmessungen vorzunehmen, um dann gegebenenfalls ein modifiziertes Konzept vorzulegen. Der zweite Schritt, die Bearbeitung und physikalische Auswertung der Messdaten, führt gewöhnlich zu physikalischen Modellen von Verteilungen petrophysikalischer Parameter. Im allereinfachsten Fall kann ein solches Modell aus einem einzigen homogenen Körper (Kugel, Quader, Zylinder) bestehen, der in ein andersartiges homogenes Medium eingebettet ist. In den meisten Fällen sind die Modelle sehr viel komplexer, sowohl was die Geometrie als auch die Variationsbreite der petrophysikalischen Parameter (z. B. elektrischer Widerstand, Dichte, Magnetisierung, seismische Geschwindigkeit) anbelangt.

Eine methodische Eigenart fast jeder physikalischen Auswertung ist die *Mehrdeutigkeit*. Mit anderen Worten: Aus einem vorgegebenen Satz von gemessenen geophysikalischen Daten lassen sich in aller Regel mehrere, u. U. sehr viele verschiedene, physikalisch gleichwertige Modelle ableiten. Ein Extremfall ist mit unendlich vielen Lösungen beim Schwerefeld einer Kugel gegeben: Alle Kugeln mit derselben Mittelpunktslage und derselben Masse erzeugen exakt dasselbe Störfeld. In der Seismik gilt die allereinfachste Grundformel *Weg* = *Zeit* · *Geschwindigkeit*. Messgröße ist die Zeit, und zwei verschiedene Geschwindigkeitseingaben resultieren in zwei zunächst gleichberechtigten Tiefenberechnungen für einen geologischen Reflektor. Diese Mehrdeutigkeit darf niemals unter den Tisch gekehrt werden und muss gegebenenfalls dem Auftraggeber klar vermittelt werden (siehe dazu auch Abschn. 3.9).

Der dritte, abschließende Schritt der Interpretation, die Überführung der physikalischen Modelle in geologische, hydrogeologische und geotechnische Modelle, führt zu einer weiteren Vermehrung möglicher Lösungen: Fast immer lässt sich ein physikalisches Modell durch unterschiedliche (hydro)geologische oder geotechnische „Bilder“ deuten. Die im Karst aus einer Schweremessung physikalisch abgeleitete fehlende Masse eines Störkörpers kann ein kleiner luftgefüllter, aber genauso gut ein großer wassergefüllter Hohlraum sein. Und da sich die Geophysik der Oberflächennahen Geothermie immer in einem geologischen Rahmen abspielt, sind tiefgreifende geologische Kenntnisse unverzichtbar, die entweder von der Geophysik selbst eingebracht werden oder aus einer engen Zusammenarbeit mit erfahrenen Geolog(inn)en erwachsen müssen.

3.5 Petrophysikalische Parameter

Hinsichtlich der petrophysikalischen Parameter gibt es keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen der *Tiefen Geothermie* und der *Oberflächennahen Geothermie*. Aus diesem Grund und vor allem im Hinblick darauf, dass die 400-m-Zäsur für die Oberflächennahe Geothermie wenig praktischen Sinn ergibt, hat der Verfasser der Einfachheit

halber hier seinen diesbezüglichen Text in großen Teilen unverändert aus dem *Handbuch Tiefe Geothermie* (Bauer et al. 2014) übernommen. Eine etwas andere Wichtung wurde dadurch vorgenommen, dass den Parametern der Geoelektrik eine Vorzugsstellung eingeräumt wird, da sie für die hydrogeologischen und hydraulischen Belange der Oberflächennahen Geothermie ohne Zweifel die wichtigste Rolle spielen.

3.5.1 Geoelektrik

Die geoelektrischen Gesteinsparameter haben die Besonderheit, dass sich der spezifische Widerstand von Mineralen über einen Bereich von rund 20 Zehnerpotenzen erstrecken und bei den Gesteinen immerhin noch über eine Spanne von 8 Zehnerpotenzen variieren kann, wobei die Eigenschaften von Erzen hier außen vor bleiben sollen. In Kristallingesteinen und Sedimentiten ist der spezifische Widerstand (der in der Geoelektrik gegenüber dem in der Hydrogeologie gebräuchlichen Kehrwert elektrische Leitfähigkeit bevorzugt wird) praktisch allein vom Porenraum – Porosität, Klüftigkeit – und dessen Inhalt abhängig, da die Minerale der Gesteinsmatrix praktisch als Nichtleiter zu gelten haben, wobei die tonhaltigen Gesteine noch eine Sonderrolle spielen. Als Ionenleiter gilt für tonfreie, wassergesättigte Gesteine, dass ihr spezifischer Widerstand ρ_G proportional dem spezifischen Widerstand des Porenwassers ρ_w und in guter Näherung umgekehrt proportional dem Quadrat der Porosität Φ ist. Diesen etwa quadratischen Einfluss hat auch die Wassersättigung S_w im Porenraum. Allgemeiner zusammengefasst leiten sich daraus empirische Formeln der Art

$$\rho_G = (a/\Phi^m) \cdot \rho_w \cdot (1/{S_w}^n)$$

ab, die je nach Wahl der Größen a, m und n nach Archie und Dachnov (und anderen) benannt werden und eine wichtige Beziehung in der Bohrlochgeophysik bei der Erkundung von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten bedeuten. Die variierenden Größen a und m sind vielfach charakteristisch lithofaziell bezogen, was zur Benennung der Größe $F = a/\Phi^m$ als *Formationsfaktor* geführt hat. Eine praktische Bedeutung liegt darin, dass für einen betrachteten bestimmten Formationstyp und bei Wassersättigung ($S_w = 1$) mit

$$\rho_G = F \cdot \rho_w$$

eine direkte Proportionalität zwischen dem gemessenen Gesteinswiderstand und dem Widerstand der Porenflüssigkeit gegeben ist. Auch hat sich gezeigt, dass die Einflussgrößen Porosität, Porenlösung und Grad der Wassersättigung gleichermaßen für klüftige Magmatite und Metamorphite maßgeblich sind. Nicht gültig ist der Zusammenhang für ton- und stark schluffhaltige Gesteine. Sie sind besonders gut leitend, was nicht nur eine Folge der hohen Porosität ist, sondern damit zusammenhängt, dass auch die Matrix der

Tonminerale durch Adsorption von Ionen aus dem Porenelektrolyten in erheblichem Maße zum Leitungsmechanismus (Festkörperleitung) beiträgt. Dieser Zusammenhang begründet das schon angesprochene (und häufig missverstandene) scheinbare Paradoxon, dass die hydraulisch gut leitenden Grundwasserleiter die schlechten elektrischen und die hydraulisch schlecht leitenden Grundwasserstauer die elektrisch gut leitenden Gesteine sind. Sehr gründliche Ausführungen zu diesem ganzen Komplex der elektrischen Leitfähigkeit der Gesteine bringt das Buch von Schön (1983).

Aus den vorstehenden Ausführungen wird klar, das der spezifische Widerstand (in der Geoelektrik allgemein angegeben in der Einheit Ohmmeter, Ωm, innerhalb der einzelnen lithologischen Gruppen stark schwanken kann. Grobe Wertebereiche (in Ωm) sind: Tonsteine 1–10; Sandsteine 100–500, abnehmend mit zunehmendem Tongehalt; Mergelsteine, Kalksteine, Dolomite 100–1000; frische Kristallingesteine >1000.

Für Belange der Geothermie und bei Messungen der Tiefengeoelektrik insbesondere für die petrothermale Geothermie sind die Kenntnisse zu den Widerstandsverhältnissen im kristallinen Grundgebirge besonders wichtig, und mittlerweile hat sich an vielen Stellen die Erkenntnis durchgesetzt, dass der spezifische Widerstand der nützlichste geophysikalische Parameter bei der Exploration auf geothermale Ressourcen sein kann.

Für die Geothermie bisher ohne große Bedeutung, aber für die Geoelektrik bei der Untersuchung der höheren vor allem sedimentären Stockwerke mit galvanischen Verfahren der direkten Stromzufuhr zunehmend interessanter ist die Frequenzabhängigkeit des spezifischen Widerstandes, die das Verfahren der *induzierten Polarisation (IP)* begründet. Ursprünglich das erfolgreiche geoelektrische Verfahren in der Erzexploration, hat die IP vermehrt Bedeutung für hydrogeologische und Umwelt-Belange gewonnen. IP im Frequenzbereich messen, heißt den komplexen Widerstand der Gesteine erfassen. Das ergibt Sinn, weil sich Gesteine wie eine Impedanz, also wie ein Wechselstromwiderstand verhalten, der frequenzabhängig ist und eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom bewirkt. Wie in der Elektrotechnik kann dann in einer komplexen Ebene mit Realteil und 90°(imaginärer) Komponente operiert werden. Die Frequenzabhängigkeit ist besonders ausgeprägt bei sehr niedrigen Frequenzen, aber moderne Apparaturen nutzen häufig im Rahmen einer *spektralen induzierten Polarisation (SIP)* komplette Frequenzspektren von 0,01–100 Hz. Messgrößen sind die reelle, ohmsche Komponente des Widerstandes und die Phasenverschiebung bei einer oder mehreren Frequenzen oder die Verhältnisse der Realteile bei zwei oder mehr Frequenzen. Die IP als petrophysikalischer Parameter erzfreier Sedimentite ist vor allem im Kontaktbereich fluide Phase – Gesteinsmatrix angesiedelt und maßgeblich vom Tongehalt beeinflusst. Als synchron zum ohmschen Widerstand zusätzlich gewonnener geoelektrischer Parameter erlaubt die IP in der Regel weitergehende fazielle Aussagen mit häufig sehr viel schärferer Auflösung geologischer Strukturen. Es drängt sich auf, dass diese Zusammenhänge im Rahmen der Oberflächennahen Geothermie mit ihren hydrogeologischen und hydraulischen Aspekten deutlich mehr Beachtung finden müssen als es gegenwärtig noch der Fall ist.

3.5.2 Seismik

Der wichtigste Parameter ist die seismische (Schall-)Geschwindigkeit V (für engl. *velocity*) in den Gesteinen. In der Refraktionsseismik bestimmt sie die speziellen Laufwege der seismischen Wellen entlang von Schichtgrenzen oder beim Eintauchen in die Schichten. Bei der Reflexionsseismik kommt die Gesteinsdichte hinzu, die über den Begriff der *seismischen Impedanz* mit dem Produkt aus seismischer Geschwindigkeit und Dichte das Reflexionsverhalten an Schichtgrenzen bestimmt. Das schlägt sich wiederum in den Amplituden der an der Erdoberfläche registrierten seismischen Wellen nieder, was im Sinne einer Attributanalyse faziell interpretiert werden kann. Von den Hauptwellenarten der Kompressionswellen (Longitudinal-, P-Wellen), der Scherwellen (Transversal-, S-Wellen) und Oberflächenwellen (Rayleigh-, Love-Wellen) werden in der Tiefen Geothermie in der Regel nur die P-Wellen analysiert. In der oberflächennahen Seismik werden aber auch zunehmend die Möglichkeiten einer Scherwellen-Seismik und der Oberflächenwellen-Seismik genutzt. Für die Oberflächennahe Geothermie mit ihren Bezügen zum Wasser (Hydrogeologie und Hydraulik) wird das verständlich, da sich Scherwellen nicht in Wasser ausbreiten. Wassergefüllter Porenraum und Wassersättigung, aber auch das Gesteinsgefüge können sich über die Elastizitätskonstanten stark auf das Geschwindigkeitsverhalten von Scherwellen und vor allem auf das Verhältnis V_P/V_S auswirken. Kombinierte Registrierungen von P-, S- und Oberflächenwellen mit der Bestimmung von V_P/V_S versprechen zukünftige, deutlich weitergehende Aussagen über Aquifere über die reine Charakterisierung der Aquifer-Geometrie hinaus (Pasquet et al. 2015). Aber auch die Longitudinalwellen allein reagieren meist mit einem signifikanten Geschwindigkeitssprung beim Übergang vom ungesättigten in den gesättigten Bereich sandig-kiesiger Aquifere, was zur Ermittlung der Tiefe des Grundwasserspiegels dienen kann. Erhebliche Überschneidungen mit Geschwindigkeitsbereichen impermeabler Gesteine (Tone, Geschiebemergel) können aber Probleme bereiten. In sedimentären Festgesteinen hat innerhalb einer Gesteinsart die Porosität den maßgeblichen Einfluss auf die Geschwindigkeit, die bei zunehmenden Porositätswerten deutlich abnehmen kann. Außer der Porosität und der Temperatur sind in Sedimentiten auch die Zementation und die mineralische Matrixsubstanz wesentliche Einflussgrößen. In dichten Karbonatgesteinen verändern sich z. B. die Geschwindigkeiten gemäß dem Verhältnis von Dolomit und Kalkstein: im Dolomit Abnahme mit wachsendem Kalkgehalt, in Kalkstein Zunahme mit wachsendem Dolomitgehalt. In allen Fällen führen tonige Anteile zu einer Geschwindigkeitsreduzierung.

Nicht nur die Geschwindigkeit der seismischen Wellen, sondern auch deren Verformung beim Durchlaufen der verschiedenen Gesteinseinheiten kann charakteristische fazielle Informationen zur Erdoberfläche transportieren, was mit den wellentypischen Begriffen der Amplitude und Frequenz verknüpft und bei den inelastischen Eigenschaften der Gesteine, mit anderen Worten bei der Absorption elastischer Wellen, angesiedelt ist. Dabei ist nicht nur gefühlsmäßig die Absorption mit einer Amplitudenreduzierung in lockeren, unverfestigten Sedimentgesteinen viel größer als in festen magmatischen und metamorphen Gesteinen. Die Absorption steigt auch – wie bei allenWellenvorgängen – mit zuneh-

mender Schwingungsfrequenz. Das hat zur Folge, dass aus dem seismisch abgestrahlten Frequenzgemisch mit zunehmendem Laufweg immer mehr die höheren Frequenzen nach Art eines Tiefpasses herausgefiltert werden, worüber bereits im Abschn. 3.4.5 geschrieben wurde. Für die Tiefenerkundung bedeutet das, dass auch – wiederum wie bei allen Wellenvorgängen – das Auflösungsvermögen für Schichten und Strukturen zurückgeht. Andererseits kann dieses Tiefpassverhalten auch für eine Attributanalyse in der Geothermie genutzt werden, zumal ähnlich wie bei der Geschwindigkeit diese Effekte der Absorption von Dichte, Porosität, Poreninhalt, Korngröße und Temperatur der Gesteine abhängen.

3.5.3 Bodenradar (Georadar, GPR, *ground penetrating radar*)

Wie bei der Reflexionsseismik ist die Geschwindigkeit der ausgesandten und reflektierten Signale der entscheidende petrophysikalische Parameter, der wiederum von der Dielektrizitätskonstanten und der elektrischen Leitfähigkeit der Gesteine abhängt. Die Größenunterschiede sind beachtlich und führen dazu, die Radar-Geschwindigkeiten gewöhnlich in Meter pro Nanosekunden (m/ns) anzugeben. Mit der Sonderstellung der hohen (relativen) Dielektrizitätskonstante von 80 für Wasser wird der besondere Einfluss von Porosität, Korngrößen und Kapillarität in den mit dem Bodenradar erreichbaren Schichten offenkundig, und sehr viele Fehlschläge bei Radarmessungen resultieren einfach aus einem zu „sorglosen“ Umgang mit diesen wichtigen Parametern. Der Einfluss des Wassers zeigt sich an einigen charakteristischen Werten für trockenen Sand (Dielektrizitätskonstante 3–5), wassergesättigten Sand (20–30), dichte Kristallingesteine (um 5), Schluff, Ton (bis 40) und dichten Kalkstein (4-8). Bei der Dielektrizitätskonstanten 1 pflanzen sich die Radarsignale in der Luft mit der Lichtgeschwindigkeit von 0,3 m/ns fort, um im Gestein um ganz grob den Faktor 10–20 zurückzugehen (Wasser 0,033 m/ns).

Wie in der Seismik die Signale durch inelastische Prozesse gedämpft werden, passiert Vergleichbares bei den Radarwellen durch eine Absorption elektrisch gut leitender Schichten, die enorm sein kann und das Eindringvermögen entscheidend begrenzt. Wie im Abschn. 3.4.2 bereits erläutert, ist diese Absorption frequenzabhängig und erlaubt entsprechend tieferfrequenten Antennen größere Untersuchungstiefen bei allerdings reduziertem Auflösungsvermögen.

3.5.4 Gravimetrie

Die Gravimetrie kann an die Seismik (Abschn. 3.5.2) insofern anknüpfen, als es empirische Beziehungen zwischen der seismischen Geschwindigkeit und der Dichte der Gesteine gibt. Früh publizierten Beziehungen (Nafe & Drake 1957; Ludwig et al. 1970) folgte dann eine in der Kohlenwasserstoff-Exploration sehr populäre Beziehung, die sogenannte Gardner-Gleichung (Gardner et al. 1974)

$$\sigma = \alpha \cdot V_P{}^{\beta},$$

die Dichte σ mit der Geschwindigkeit V_p über Faktor α und Exponent β für verschiedene Lithologien empirisch verbindet. Dabei werden α und β wenn möglich über Bohrlochgeophysik kalibriert, und wenn das nicht möglich ist, werden auch mit Standardzahlen gute Näherungswerte erzielt. In der Folgezeit hat es Abwandlungen und Verfeinerungen gegeben (Lindseth 1979; Wang 2000), darunter auch solche, die beides, P- und S-Wellengeschwindigkeit, für die Beziehung nutzen (Dey & Stewart 1997; Potter & Stewart 1998; Quijada & Stewart 2007). In den in der Kohlenwasserstoff-Exploration hauptsächlich interessierenden Sedimentiten werden die Formeln z. B. genutzt, um aus seismischen Intervallgeschwindigkeiten Hinweise zur Fazies zu bekommen, aber auch um Modellierungen der Gravimetrie mit vernünftigen Dichtewerten zu versorgen.

Der Grund, auf diese Beziehungen näher einzugehen, ist einfach. Anders als bei der seismischen Geschwindigkeit kann die Dichte niemals aus der Schweremessung selbst abgeleitet werden. In der Seismik wird die Geschwindigkeit benötigt, um die gemessenen Laufzeiten in Tiefen umzurechnen, und sowohl bei der Refraktionsseismik als auch bei der Reflexionsseismik können Geschwindigkeitswerte durch die Messungen selbst geliefert werden. Messungen der Gravimetrie haben dagegen von vornherein mit der Unsicherheit unbekannter Dichten zu leben. Ein kleiner Körper mit hoher Dichte kann dieselbe Schwereanomalie erzeugen wie ein großer Körper mit geringerer Dichte. Am einfachsten ist der Fall bei homogenen Kugeln unterschiedlicher Größe, die bei identischer Masse und derselben Mittelpunktstiefe alle exakt dieselbe Schwereverteilung an der Erdoberfläche liefern. Bei Verwerfungen hängt die aus der Gravimetrie abgeleitete Sprunghöhe linear von der Dichtedifferenz der beteiligten, versetzten Körper ab. In der Praxis ist diese Unsicherheit viel weniger dramatisch, da die Dichte der Gesteine nicht beliebig groß oder klein sein kann und sogar für bestimmte Lithologien relativ enge Grenzen existieren, innerhalb derer dann vor allem die Porosität und der Poreninhalt (Flüssigkeit oder Gas) Einfluss haben. Beispiele: Bei massiven Basalten oder Diabasen liegen die Dichten zwischen 2,9 und 3,2 g/cm^3; sie sinken mit zunehmenden Blasenanteilen. Quarzporphyre liegen zwischen 2,55 und 2,65, Granite bei 2,6 bis 2,7, Gabbros zwischen 2,85 und 3,0 und alle Metamorphite der Regionalmetamorphose zwischen etwa 2,6 und 3,0 (alle Zahlen in g/cm^3; Daten nach Militzer & Lindner (1979)). Die Schwankungsbreite bei Sedimentiten ist im allgemeinen sehr viel größer, was eine Folge der stärker variierenden Porositäten und der viel stärkeren Einflüsse von sekundären Umwandlungen durch beispielsweise Überlagerungsdruck, Zementation und Drucklösung ist. Bei Dolomiten und Kalksteinen kann der Schwankungsbereich zwischen etwa 2,0 und 3,0 g/cm^3 betragen, bei Sandsteinen zwischen etwa 1,8 und 2,8 g/cm^3. Im konkreten Fall einer gravimetrischen Vermessung sind die Dichtebereiche für Modellierungen meist sehr viel enger gefasst, obgleich heute im Zuge der verfeinerten Berechnung von 3D-Modellen auch verbesserte Dichtewerte wünschenswert sein können.

Dichte- und Porositätsbestimmungen aus geophysikalischen Bohrlochmessungen haben schon immer eine wichtige Rolle in der Kohlenwasserstoff-Exploration gespielt,

was vor allem indirekt über kernphysikalische Verfahren (z. B. Neutron-Logs) erfolgt. Bereits vor 50 Jahren wurden darüber hinaus von Erdölfirmen halbroutinemäßig Bohrloch-Gravimeter eingesetzt, die die Dichte der durchfahrenen Gesteinsschichten recht genau bestimmen konnten (Goodell & Fay 1964; Howell et al. 1966). Heute ist die Bohrloch-Gravimetrie, teilweise mit dem Einsatz von Gravimeter-Gradiometern, Routine geworden, und bei einer vertikalen Intervallmessung von 3 m und höher ist die Auflösung besser als 0,01 g/cm^3. Der enorme Vorteil einer solchen gravimetrischen Dichtemessung (implizite Porositätsmessung) ist, dass sie praktisch unbeeinflusst von Faktoren wie Verrohrung, Zementation, Auswaschen und Fluideinbrüchen ist, denen die nuklearen Verfahren unterliegen. Da die Gesteinsdichte auch in die Reflexionsstärke (den Reflexionskoeffizienten) seismischer Wellen eingeht, profitiert auch die Seismik letztlich von dieser Güte der Dichtemessung, was sich in verbesserten Faziesansprachen in der Attributanalyse niederschlagen kann. Der vorhergehende Text ist wenig verändert aus dem *Handbuch Tiefe Geothermie* (Bauer et al. 2014) übernommen worden, hat aber auch für die Oberflächennahe (und die mitteltiefe) Geothermie seine Berechtigung, wenn Erschließungstiefen bis zu 400 m und darunter zur Diskussion stehen und der Einsatz von Seismik und auch Gravimetrie zunehmend wichtiger werden.

3.5.5 Geomagnetik

Der zur Dichte korrespondierende aber weitaus komplexere Parameter ist die Magnetisierung der Gesteine. Anders als die Dichte als skalare Größe ist die Magnetisierung ein Vektor, der eine beliebige Orientierung im Körper haben kann. Deshalb können geometrisch identische Körper ganz unterschiedliche magnetische Anomalien zeigen. Zwei Faktoren sind maßgeblich: die Lage und Orientierung des Körpers in unterschiedlichen Breiten und die remanente (bleibende) Magnetisierung. Unterschiedliche Breite bedeutet unterschiedliche Richtung und Stärke des induzierenden Erdmagnetfeldes, die den Vektor der induzierten Magnetisierung im Gestein festlegen. Dem überlagert sich der Vektor der remanenten Magnetisierung, der, beliebig orientiert, fest im Gestein fixiert ist und die Vorgeschichte des Gesteins mit physikalischen, chemischen und sedimentären Prozessen unterschiedlichster Art widerspiegelt. Anders als die Dichte ist also die Magnetisierung (Einheit Ampère pro Meter, A/m) keine Materialkonstante. Eine solche ist die magnetische Suszeptibilität (dimensionslose Angabe in SI-Einheiten), die, stark vereinfacht gesagt, angibt, wie viel magnetisches Material einer bestimmten Art in der Volumeneinheit steckt. Dabei kann es zu der paradoxen Situation kommen, dass ein Gesteinskörper mit reichlichem Gehalt an stark magnetischem Material trotzdem in manchen Fällen für ein Magnetometer-Messgerät unentdeckt bleibt, wenn die Vektoren der induzierten und remanenten Magnetisierung im Gestein etwa gleich stark entgegengesetzt orientiert sind und ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis (Abschn. 3.4.4) eine Maskierung fördert. Im Bereich der Kampfmittelräumung, mit der auch die Oberflächennahe Geothermie nicht selten konfrontiert ist, wird von den Räumdiensten und zuständigen Behörden dieser Zusammenhang

als physikalisches Standardwissen befremdlicherweise immer noch weitgehend ignoriert und allein mit der Magnetik sondierte Flächen leichtfertig als kampfmittelfrei freigegeben.

Wird die remanente Magnetisierung außer Acht gelassen, ist der Magnetismus der Gesteine mit dem Magnetismus der gesteinsbildenden Minerale verknüpft. Diamagnetische Minerale wie Quarz und Calcit haben negative Suszeptibilitäten der Größenordnung 10^{-5} SI. Minerale wie die Feldspäte und Glimmer sind paramagnetisch und haben höhere (positive) Suszeptibilitäten (10^{-4}–10^{-2}). Die Suszeptibilität ferrimagnetischer Minerale (Titanomagnetite, Magnetit) ist nochmals um Größenordnungen höher (bis zu 10) und im Allgemeinen am wichtigsten für die Magnetisierung der Gesteine. Ganz grob ergibt sich damit eine Reihenfolge der Gesteinssuszeptibilitäten (von ungefähr 0,00001 bis 0,1 SI): Sedimentite – Metamorphite – saure Vulkanite und Plutonite – basische Plutonite – basische Vulkanite, mit allen nur denkbaren Überschneidungen und „Ausreißern“. Eine starke remanente Magnetisierung wird häufig bei jungen Vulkaniten beobachtet, während sie in Sedimentiten und Metamorphiten meist viel kleiner als die induzierte Magnetisierung ist. Der pauschale Kontrast zwischen Sedimentiten und Kristallingesteinen kann die Basis für Anwendungen der Geomagnetik bei Übersichtsvermessungen zur Kartierung von Strukturen des kristallinen Grundgebirges sein. Wegen der komplexen geomagnetischen Petrophysik erweist sich Geomagnetik mit ihren Messungen als ein merklich schwierigeres Kapitel als z. B. die Gravimetrie.

3.5.6 Radiometrie

Praktisch alle Gesteine strahlen radioaktiv durch einen Gehalt an Uran und Thorium mit den Folgeprodukten der Zerfallsreihen sowie Kalium-40, das 0,012 % des natürlichen Kaliums ausmacht. Sieht man von Anreicherungen radioaktiver Uran- und Thorium-Minerale ab, so sind die Gehalte i.a. sehr gering, in der Größenordnung ppm für Uran und Thorium und 100 ppm für Kalium-40. Dennoch ist diese Gesteinsradioaktivität mit Instrumenten leicht messbar und als petrophysikalischer Parameter definiert. Zusammenstellungen über die natürliche Radioaktivität von Gesteinen sind vielfach in der Literatur zu finden; hier werden einige allgemeine Befunde mitgeteilt. Bei Magmatiten und Metamorphiten nimmt die Aktivität i.a. von den basischen zu den sauren Gesteinen zu. Bei Sedimentiten ist eine merkliche Zunahme mit dem Tongehalt festzustellen. Reine Sandsteine sowie chemische Sedimentite (außer den Kalisalzen!) zeigen i.a. sehr geringe Aktivitäten. Ausnahmen sind meist durch Anreicherungen der uran- und thoriumhaltigen Minerale Zirkon und Monazit verursacht (siehe Abb. 3.98).

Die Radioaktivität von Wässern spiegelt den Gehalt an gelösten oder in Suspension befindlichen radioaktiven Isotopen bzw. ihrer Verbindungen wider. Generell ist festzuhalten, dass Thorium wenig, Uran und Kalium stärkere Mobilität zeigen. Ein unmittelbarer Bezug zu geophysikalischen Messungen ist kaum gegeben; indirekt sind die Mobilität des Urans und des Radiums und die Migration des Radons die Basis für die radiometrische Kartierung tiefreichender tektonischer Störungen.

3.5.7 Geothermische Parameter

Wärme ist eine Form von Energie mit der Einheit Joule (J) oder Wattsekunde (Ws). Wärme(energie) kann in einem Körper gespeichert werden, d. h. ein Körper kann Wärme aufnehmen und abgeben, was mit einer Temperaturänderung verknüpft ist. Die aufgenommene oder abgegebene Wärme Q ist der Temperaturdifferenz ΔT proportional:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

mit m = Masse des Körpers und c = spezifische Wärme. c ist eine Materialkonstante mit der Einheit J/(K·kg), und das Produkt $W = m \cdot c$ heißt Wärmekapazität. Wasser hat eine große spezifische Wärme (c_W = 4186 J/(K·kg) und damit eine hohe Wärmekapazität, während für trockene Gesteine die spezifische Wärme bei nur grob 800 J/(K·kg) liegt. Die spezifische Wärme von wasserhaltigen Gesteinen berechnet sich zu

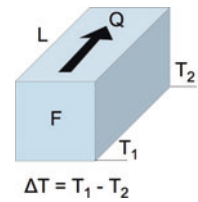
$$c_G = (W_t + W_W)/m$$

mit W_t = Wärmekapazität des trockenen Gesteins, W_W = Wärmekapazität des Wassergehaltes und m = Gesamtmasse. Entscheidend ist damit der wassergefüllte Porenraum, und generell ist die spezifische Wärme der Gesteine wichtig, wenn es in der Oberflächennahen Geothermie um Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund geht (siehe Abschn. 3.3.4 und 3.3.5).

Die für geothermale Prozesse weiterhin entscheidenden gesteinsphysikalischen Parameter sind die *Wärmeleitfähigkeit* λ und die *Temperaturleitfähigkeit a* der Gesteine. Die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine ist in der Oberflächennahen Geothermie ein Schlüsselparameter für die Dimensionierung von Erdwärmesonden im Hinblick auf die spezifische Entzugsleistung. Sie ist ebenfalls eine Materialeigenschaft und von Zusammensetzung, Geometrie der Gesteinsmatrix bzw. des Porenraumes und der Porenfüllung abhängig. λ ist maßgeblich für die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und kontrolliert – wie die elektrische Leitfähigkeit den elektrischen Strom – den Wärmestrom, der bei Temperaturgradienten fließt. Es gilt (Abb. 3.54):

$$Q = \lambda \cdot t \cdot \Delta T \cdot F/L,$$

Abb. 3.54 Wärmetransport



wobei Q die konstante Wärme ist, die bei fester Temperaturdifferenz ΔT in der Zeit t durch den Querschnitt F fließt. Schreibt man um,

$$Q / (t \cdot F) = \lambda \cdot \Delta T / L = q,$$

so ist q die Wärmestromdichte (kurz: der Wärmestrom) in der Einheit W/m^2. Die Wärmeleitfähigkeit λ als Proportionalitätsfaktor hat die Einheit W/(K·m).

λ von Gesteinen gewinnt man in Bohrungen aus Temperaturmessungen und an Bohrkernen über ein künstlich erzeugtes Temperaturgefälle. Die Schwankungen der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine bewegen sich innerhalb einer Zehnerpotenz in Abhängigkeit vom Mineralbestand, Porenraum und Poreninhalt. Einige Zahlenwerte (ca.) für λ (in W/(K·m)): Wasser 0,56, Eis 2,3, Quarz 1,3, Polyethylen 0,45, Eisen 80, Beton 2, trockener Sand 0,5, Kalkstein 2,5, Sandstein 3, Granit 3,5. Wassergesättigte Gesteine haben im Vergleich mit trockenen Gesteinen meist eine um 20–30 % erhöhte Wärmeleitfähigkeit; parallel zu Schichtung und Schieferung ist sie meist auch höher als senkrecht dazu.

Die *Temperaturleitfähigkeit* $a = \lambda \cdot \sigma^{-1} \cdot c^{-1}$ (σ Dichte, c spezifische Wärme), Einheit m^2/s, ist der Parameter für instationäre thermische Prozesse, wenn es um Aufheizung und Abkühlung im Untergrund geht, was ja die Oberflächennahe Geothermie besonders charakterisiert. Zahlenwerte für a von Gesteinen liegen etwa zwischen 0,5 und $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ m^2/s.

3.6 Die Messverfahren

Im Vergleich mit der Tiefen Geothermie spielt bei der Oberflächennahen Geothermie die oberflächennahe Geophysik mit einer Vielzahl der unterschiedlichsten einsetzbaren Methoden eine stark veränderte Rolle, obgleich sie an keine Meterzahl der Untersuchungstiefe gebunden ist. Bei der tiefen petrothermalen und hydrothermalen Geothermie ist eine Seismik mit ihren unvergleichlichen Möglichkeiten der Strukturerkundung unverzichtbar – bei der Oberflächennahen Geothermie kann sie sehr häufig, vor allem zugunsten der Geoelektrik, unterbleiben, wenn Untersuchungstiefen im Dekameter-Bereich liegen. Die Gewichte verschieben sich mit zunehmender Tiefe, wenn das Auflösungsvermögen der Potentialverfahren und generell der geoelektrischen Widerstandsmessungen z. T. rapide abnimmt. Oberflächennahe Geophysik hat bei der Tiefen Geothermie dann ihre Berechtigung (was erstaunlicherweise praktisch nie in Erwägung gezogen wird), wenn es um den Bohransatzpunkt mit der Einrichtung eines sicheren Bohrplatzes sowie um den Bohrpfad geht, der bereits oberflächennah problematischen geologischen und geotechnischen Problemzonen begegnen kann.

Oberflächennahe Geophysik bedeutet dann nicht viel anderes, wenn es sich für den kleinen oder mittleren Nutzer geothermischer Energie um Erdwärmekollektoren/-körbe bzw. das Einbringen von Erdwärmesonden in größenordnungsmäßig 100 m tiefe Bohrlöcher auf einem überschaubaren Gelände handelt. Bei Großanlagen mit ganzen Feldern von

niederzubringenden Bohrungen und der Beurteilung der geologischen Verhältnisse und hydraulischen Zusammenhänge sieht das dann bereits ganz anders aus. Mehr noch wird beim Komplex der Erdwärmepumpen dann eine gründliche Geologie, Hydrogeologie und Geophysik zu bemühen sein, wenn ein großer, ausgedehnter Aquifer zur Diskussion steht, der für eine Wärmeenergie-Nutzung vorgesehen ist und vor allem im Fokus auch anderer, z. T. weiter entfernter Nutzer steht. Dann können plötzlich auch geophysikalische Verfahren wie die Eigenpotentialmessung und die *mise-à-la-masse*-Methode interessant und wichtig werden, wenn es um Grundwasser-Fließrichtung und -Fließgeschwindigkeiten, aber auch um infiltrierende oder aufsteigende Wässer geht. Starke laterale Faziesverzahnungen mit komplexem hydraulischen Verhalten, tektonische Versätze mit blockierten hydraulischen Wegsamkeiten, vorhersehbare und zu verhindernde hydraulische Kurzschlüsse zwischen Grundwasser-Stockwerken, Beeinträchtigungen der erwähnten konkurrierenden Grundwassernutzer sind prädestiniert mit den ganz verschiedenen und geeignet anzupassenden Verfahren der Geoelektrik anzugehen. Wenn davon auszugehen ist, dass Erdwärmenutzung meist in der Nähe von Bebauung (Wohngebiete, Gewerbe, Industrie) erfolgen soll, dann kann das Kapitel vermuteter oder bekannter Altlasten einschließlich Kampfmitteln ein schwerwiegender Punkt bei Genehmigungen, ganz zu schweigen vom plötzlichen Antreffen zuvor unbekannter problematischer Vorkommen, sein. Geophysikalisch bedeutet das wieder ein anderes Prozedere, und bewährte Verfahren der Altlastenerkundung wie die Geomagnetik, Impuls- und Frequenzelektromagnetik oder das Bodenradar sind plötzlich gefragt. Die angesprochene Nähe zu Bebauung mit metallischen Versorgungsleitungen, Zäunen und anderen Hindernissen weist auch der Gravimetrie eine unverzichtbare Rolle selbst bei kleinräumigen, oberflächennahen Untersuchungen zu, wofür es immer wieder Beispiele erfolgreicher Messkampagnen gibt. Ein enormer Vorteil einer gravimetrischen Vermessung ist, dass sie ohne große Genehmigungsverfahren überall durchgeführt werden kann: mitten durch enge Straßen einer Stadt, inmitten sensibler Industrieanlagen, durch Krankenhausanlagen und Naturschutzgebiete.

Seltener, aber durchaus praktiziert, gehen in der Oberflächennahen Geothermie Bohrungen für Erdwärmesonden und Erdwärmepumpen *per definitionem* (400 m Tiefe!) auch in Tiefen deutlich größer als die gemeinhin vorgesehenen 50–150 m. Neben der Seismik und der Gravimetrie erweitert sich dabei das Spektrum von Messungen der Geoelektrik um die Verfahren der Magnetotellurik, die natürliche elektromagnetische Felder nutzen oder die Natur mit dem aktiven Verfahren der CSAMT (*controlled source audio magnetotellurics*) nachahmen. Auch das wird nachfolgend angesprochen.

Wenn die Geoelektrik etwas herausgestellt wird, hat das seinen guten Grund, der bereits im Abschn. 3.2 und im Abschn. 3.5.1 angesprochen wurde und mit der scheinbar paradoxen Situation und dem pauschalen Dualismus zusammenhängt, dass die hydraulisch gut leitenden Gesteine die schlechten elektrischen Leiter und die hydraulisch schlechten Leiter die guten elektrischen Leiter sind. Dieser Vorzug darf nicht dazu führen, dass versucht wird, alle anstehenden Probleme insbesondere der Hydrogeologie und Hydraulik mit ein, zwei Standardverfahren zu lösen. So darf trotz der genannten besonderen Stellung der Geoelektrik im oberflächennahen Bereich nicht vergessen werden, dass Geoelektrik

in bebauten Arealen häufig mit anthropogenen metallischen Konstrukten zu kämpfen hat, wovon die Seismik eher weniger betroffen ist, und dass auch Neuentwicklungen beim Bodenradar ganz neue Möglichkeiten der Erkundung auch einer tieferen Geologie schaffen.

Leser und Leserinnen sollen hier vor allem auch erfahren, dass es außer den Standardverfahren eine große Vielfalt verschiedener geophysikalischer Herangehensweisen gibt; sie sollen wissen, dass es diese Vielfalt gibt und worauf sie sich da einlassen, wenn ein unkonventionelles Vorgehen angesagt ist und angeboten wird (siehe dazu auch den Abschn. 3.9: Geophysik als Dienstleistung). Und wenn es bei der Tiefen Geothermie im Allgemeinen keine Diskussion über die hohen Kosten einer Tiefenseismik gibt, verhält es sich – sofern überhaupt über Geophysik geredet wird – hier vielfach anders. Eine grundsätzliche Fehleinschätzung drückt sich sehr häufig dergestalt aus, dass argumentiert wird, doch lieber gleich zu bohren, wenn die Kosten einer Geophysik zu hoch erscheinen. Präziser wird diese Fehleinschätzung mit der möglichen Folge teilweise horrender Mehrkosten im Abschn. 3.9.5 erörtert.

3.6.1 Geoelektrik

Bei den unzähligen Verfahren der Geoelektrik unterscheidet man zwischen Verfahren, die galvanisch mit Gleichstrom arbeiten (Widerstandsverfahren) und solchen, die mit sinusförmigem Wechselstrom bzw. Impulsen arbeiten (Elektromagnetik, Induktionsverfahren), was – wie zuvor bereits angesprochen – keine sehr sinnvolle Namensgebung ist, da letztlich mit allen Verfahren die elektrische Leitfähigkeit bzw. deren Kehrwert, der spezifische Widerstand der Gesteine. ermittelt wird. Hier wird die Unterscheidung beibehalten. Charakteristische Modelle für den Einsatz der geoelektrischen Messverfahren zeigt Abb. 3.55.

Widerstandsgeoelektrik

Die Gleichstromgeoelektrik verlangt im Gelände nach langen Kabelauslagen zur Stromzuführung in verschiedenen Konfigurationen, in denen die Anordnung von Strom- und Spannungserdern mit Namen wie Schlumberger, Pol-Dipol (Halbschlumberger), Wenner und Dipol-Dipol verknüpft ist (Abb. 3.56). Moderne Verfahren messen statt mit Gleichstrom mit niederfrequentem Wechselstrom und erfassen dabei synchron den spezifischen Widerstand und die sogenannte induzierte Polarisation (IP), die ebenfalls ein die Gesteine charakterisierender und differenzierender elektrischer Parameter ist und nachfolgend erörtert wird. Als eines der ältesten Verfahren der Geophysik erlaubt die Widerstandsgeoelektrik die Untersuchung eines geschichteten Untergrundes mit einer Quantifizierung der Anzahl unterschiedlich leitender Schichten mit ihren Mächtigkeiten und spezifischen Widerständen durch Computermodellierung.

In der Oberflächennahen Geothermie zählt sie zu den wichtigsten geophysikalischen Messverfahren, wenn es größenordnungsmäßig um die Untersuchung der obersten 100 m geht. Aber die Auswertung und Interpretation der im Gelände gemessenen

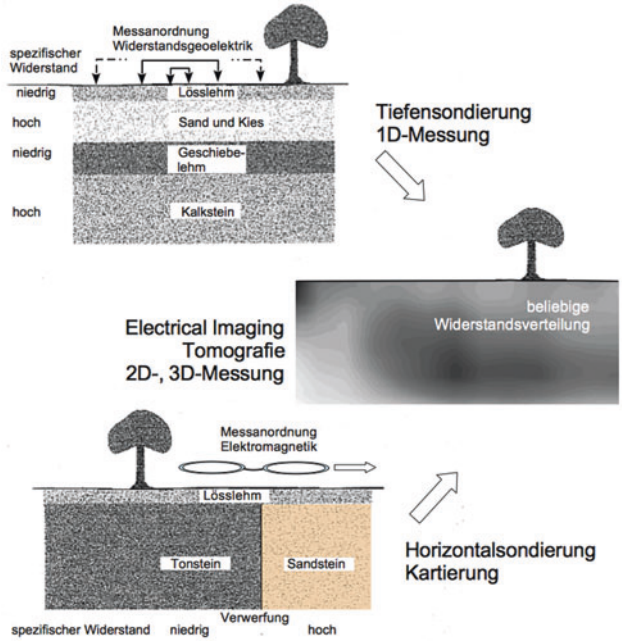
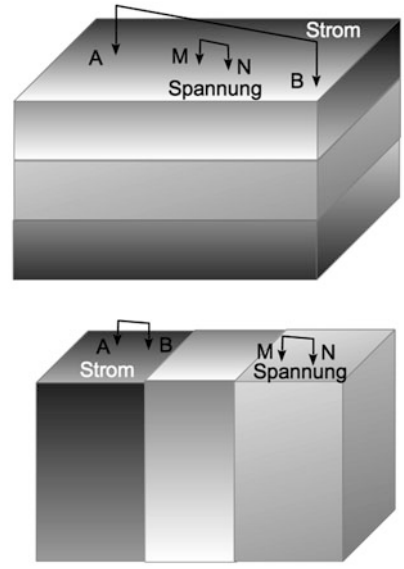


Abb. 3.55 Modelle für geoelektrische Messungen. Oben: die klassische Tiefensondierung für einen horizontal geschichteten Untergrund; unten: die einfache Horizontalsondierung mit bewegter fester Anordnung von Erdern oder Spulensystemen; Mitte: eine Kombination von vertikaler und horizontaler Sondierung. In allen Fällen können die Messsysteme für Gleichstrom- und Induktionsgeoelektrik ausgetauscht werden: z. B. Induktionstiefensondierung mit auseinander wandernden Spulen oder eine Horizontalsondierung mit fester Elektrodenanordnung

Abb. 3.56 Elektrodenanordnung für die Schlumberger- (oben) und die Dipol-Dipol-Messung (unten)



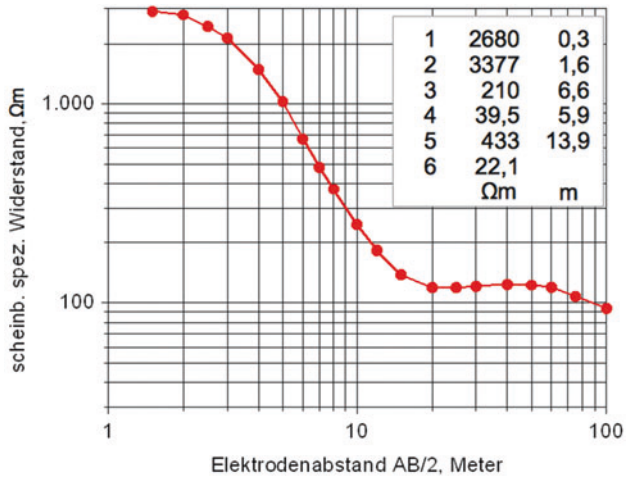


Abb. 3.57 Charakteristische Messkurve (Punkte) für den scheinbaren spezifischen Widerstand der klassischen Widerstandsgeoelektrik (Tiefensondierung in Schlumberger-Anordnung) mit einer berechneten angepassten Sondierungskurve. Die sechs modellierten Schichten werden als quartäre Lockersedimente (Schichten 1–5) über tertiären Mergelsteinen (6) interpretiert (1, 2: trockene Sande, 3: oberer Grundwasserhorizont, 4: tonige Zwischenschicht als Grundwasser-Geringleiter, 5: tieferer Grundwasserhorizont)

Sondierungskurven (Abb. 3.57) ist nicht einfach und birgt viele Fallstricke für unerfahrene Anwender, was mit Begriffen wie relative Mächtigkeit, Makro- und Mikroanisotropie, Ersatzschichten und vor allem mit dem Äquivalenzprinzip verknüpft ist. Letzteres sagt einfach, dass gemessene Sondierungskurven mit ganz unterschiedlichen Schichtfolgen modelliert und zunächst physikalisch absolut gleich gut erklärt werden können. Ohne Einbindung in ein Netz mehrerer Sondierungen und ohne einen geologischen Rahmen, in dem die Messungen zu sehen sind, sind Einzelsondierungen nutzlos und ersetzen niemals eine Bohrung. Die im englischen Sprachgebrauch auch anzutreffende Bezeichnung des „*electric drilling*“ sollte tunlichst unterbleiben.

Ein zentraler Begriff in der Widerstandsgeoelektrik ist der sogenannte *scheinbare spezifische Widerstand.* Dazu muss man sich vorstellen, dass bei einer Messung mit einer Vierpunktanordnung (Abb. 3.56) über zwei Erder (meist mit A, B bezeichnet) ein Strom I in den Untergrund geschickt wird, dessen elektrisches Feld an zwei weiteren Erdern (meist M, N) eine Spannung U erzeugt. Ähnlich wie beim Ohmschen Gesetz $R = U/I$ ergibt sich bei der Vierpunktmessung durch die Quotientenbildung U/I eine Widerstandsgröße, in die noch die Geometrie k mit den gegenseitigen Abständen der vier Erderpunkte eingeht: $\rho_s = k \cdot U/I$. ρ_s ist der scheinbare spezifische Widerstand. Das „*scheinbar*“ bezieht sich auf den Umstand, dass der eingeleitete Strom durch mehrere (oder viele) Gesteinskörper mit ganz unterschiedlichen spezifischen Widerständen (als echte Materialgröße) fließt und ρ_s eben kein Gesteinsparameter, sondern eine Art Durchschnittswert ist. Mit dem Rückgriff auf Abb. 3.37 wird klar, dass ρ_s auch von der Geometrie der Erder abhängt und

sich mit einer Veränderung der Geometrie auch der scheinbare spezifische Widerstand ändert. Systematische Veränderung der Geometrie, z. B. systematisches Auseinanderrücken der Stromerder A, B oder Auseinanderrücken der Dipole (Abb. 3.56), führt zu systematischen ρ_s -Messkurven als Grundlage von Auswertung und geologischer Interpretation (Abb. 3.57). Der scheinbare spezifische Widerstand ρ_s wird uns in den nachfolgenden Ausführungen immer wieder begegnen.

Komplexe Widerstandsmessungen – Induzierte Polarisation

Das Verfahren der induzierten Polarisation (IP) geht zurück auf die Beobachtung transienter Effekte nach Abschalten eines Gleichstroms im Gestein mit einem je nach Gestein unterschiedlich abklingenden elektrischen Feld. Diese IP-Messung im sogenannten Zeitbereich (engl. *time domain*) wird heute vielfach ersetzt durch eine Messung im Frequenzbereich (*frequency domain*). Für einen niederfrequenten Wechselstrom wird die Frequenzabhängigkeit des spezifischen Widerstandes bei verschiedenen Messfrequenzen ermittelt oder bei einer einzigen Frequenz der komplexe spezifische elektrische Widerstandes mit 0°- und 90°-Phase bzw. der Phasenverschiebung zwischen eingespeistem Strom und gemessener Spannung registriert (woher auch der Name „komplexe Widerstandsmessung“ stammt). Ohne Verbindlichkeit existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Messgrößen sowohl für den Zeit- als auch den Frequenzbereich. Im Beispiel der Abb. 3.58

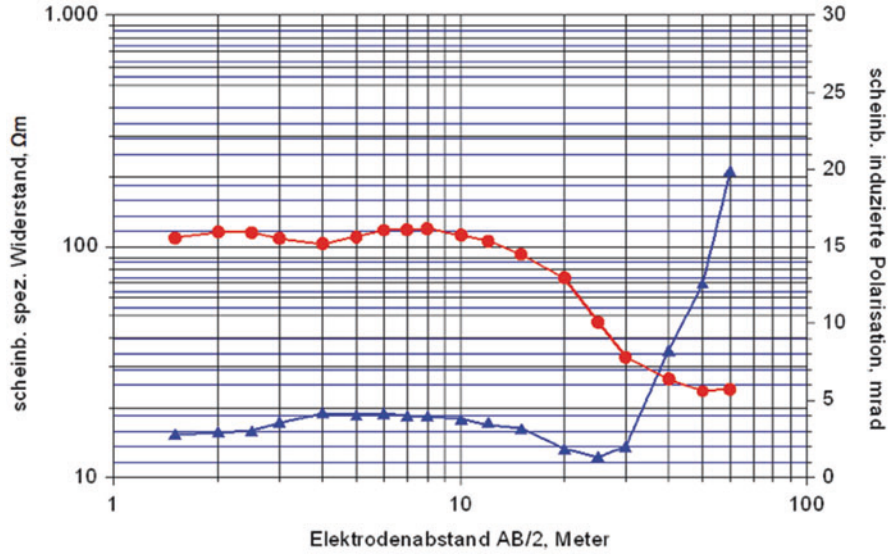


Abb. 3.58 Komplexe Widerstandsmessung (Schlumberger-Anordnung) mit Sondierungskurven für Widerstand (rot) und IP (blau). IP ist hier die Phasenverschiebung (in mrad, Bogenmaß) zwischen Spannung und Strom in der Vierpunkt-Anordnung. Wie bei der reinen Widerstandsmessung gilt auch bei der IP-Sondierungskurve, dass im Gelände eine scheinbare IP gemessen wird

ist es die Phasenverschiebung, und sie zeigt zudem in einer Gegenüberstellung der Sondierungskurven für Widerstand und IP den unterschiedlichen „Gehalt“ an geoelektrischer Untergrundinformation.

Eine Erweiterung erfährt die IP-Messung durch eine *spektrale induzierte Polarisation* (SIP), bei der die Frequenzabhängigkeit der IP (z. B. Phasenwinkel) für ein breites Frequenzspektrum (z. B. 0,01–100 Hz) bestimmt wird. Unterschiedliche Spektren können dann Unterschiede der Gesteinsfazies und anderer Materialien charakterisieren, und für den Bereich der Oberflächennahen Geothermie sind gerade Beziehungen zu hydraulischen Parametern von großem Interesse.

Eine auf wenige Frequenzen reduzierte SIP ist auch mit kleinem Equipment und einem höchst effektiven Messgerät für komplexe Widerstandsmessungen möglich, wie die Beispiele in Abb. 3.59 und Abb. 3.60 zeigen.

Electrical Imaging: 2D- , 3D- und 4D-Widerstandstomographie

Neuere Entwicklungen der Widerstandsgeoelektrik (z. B. Loke et al. 2013) in den letzten zwei, drei Dekaden gehen zunehmend in Richtung einer Automatisierung des Messablaufes mit computergesteuerten Multielektroden-Auslagen und einer automatisierten Inversion der gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände in reale Tiefenmodelle mit wahren spezifischen Gesteinswiderständen. Verbreitetste Messung eines solchen *Electrical Imaging* des Untergrundes ist die Aufnahme von Vertikalschnitten entlang eines Profils als 2D-Messung (Abb. 3.61 unten links). Eine 3D-Tomographie kann sehr aufwendig mit flächiger Anordnung der wechselseitig geschalteten Strom- und Spannungserder erfolgen (Abb. 3.61 oben rechts), wie es analog die 3D-Seismik mit *Inline*- und *Crossline*-Vergitterung vormacht, oder man nimmt eine Serie paralleler 2D-Schnitte auf, die zu einem räumlichen 3D-Bild zusammengesetzt werden (Abb. 3.61 oben links). Interessant ist der Aspekt einer 4D-Tomographie (Abb. 3.61 unten rechts), bei der mit derselben 2D- oder 3D-Anordnung Wiederholungsmessungen zu verschiedenen Zeiten durchgeführt werden. Auch Einsätze für Überwachung potentieller Erdrutsche (Supper et al. 2008) oder Wasserbewegungen in einem Aquifer (Cassiani et al. 2006; Coscia et al. 2012) sind bekannt

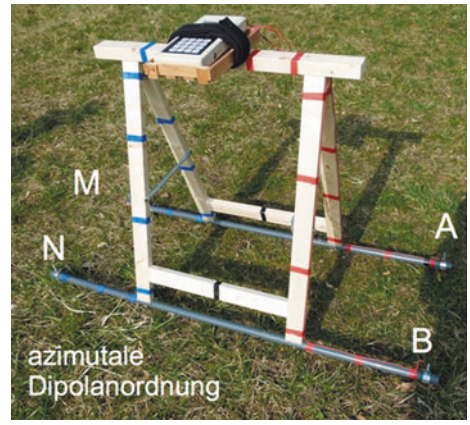


Abb. 3.59 Messanordnung für Widerstandskartierung geringer Untersuchungstiefen mit einem Messgerät für komplexe Widerstandsmessungen einschließlich einfacher spektraler induzierter Polarisation (SIP) bei vier Frequenzen (1,04–8,33 Hz). A, B stromzuführende Elektroden; M, N Spannungsmessung

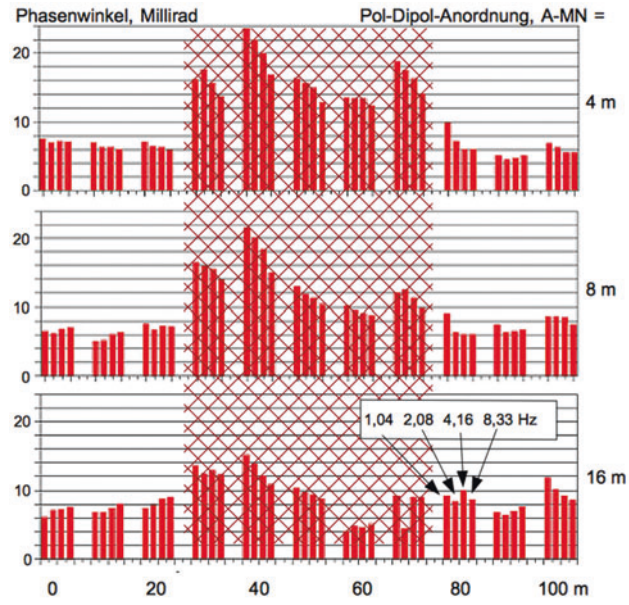


Abb. 3.60 Spektrale IP erlaubt das Messgerät von Abb. 3.59 auch für größere Untersuchungstiefen: SIP auf einem Profil über einer Altlast (Schraffur). Mit den Elektrodenabständen A-MN = 4–16 m werden ganz grob 3–10 m Eindringtiefe erfasst

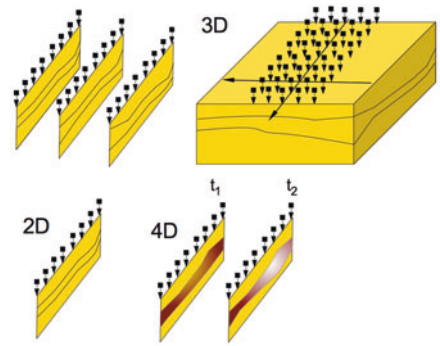


Abb. 3.61 Electrical Imaging mit Erder-Anordnung für 2D-, 3D- und 4D-Tomographie

geworden, was auch im Rahmen der Oberflächennahen Geothermie Anwendung finden mag.

Bei aller Wertschätzung der Möglichkeiten einer höher auflösenden Tomographie mit rasch arbeitenden Multielektroden-Anordnungen darf der wichtige Punkt nicht vergessen werden, dass die Physik mit den schwierigen mathematischen Grundlagen der Widerstandsmessung mit den erheblichen Konsequenzen für die Praxis immer noch dieselbe geblieben ist und gewisse Fehlentwicklungen nicht zu übersehen sind, worauf Abschn. 3.9.2 Bezug nimmt. Vorgreifend auf diesen Abschnitt bringt Abb. 3.62 das Beispiel einer 3D-Tomographie aus der Zusammensetzung eng paralleler 2D-Sektionen, die eben nicht mit der Multielektroden-Anordnung, sondern mit einem Raster von 1D-Sondierungen in Pol-Dipol-Anordnung gemessen wurden. Die der Physik weitaus besser angepasste logarithmische 1D-Messung ist zwar aufwendiger, führt aber in vielen Fällen über eine

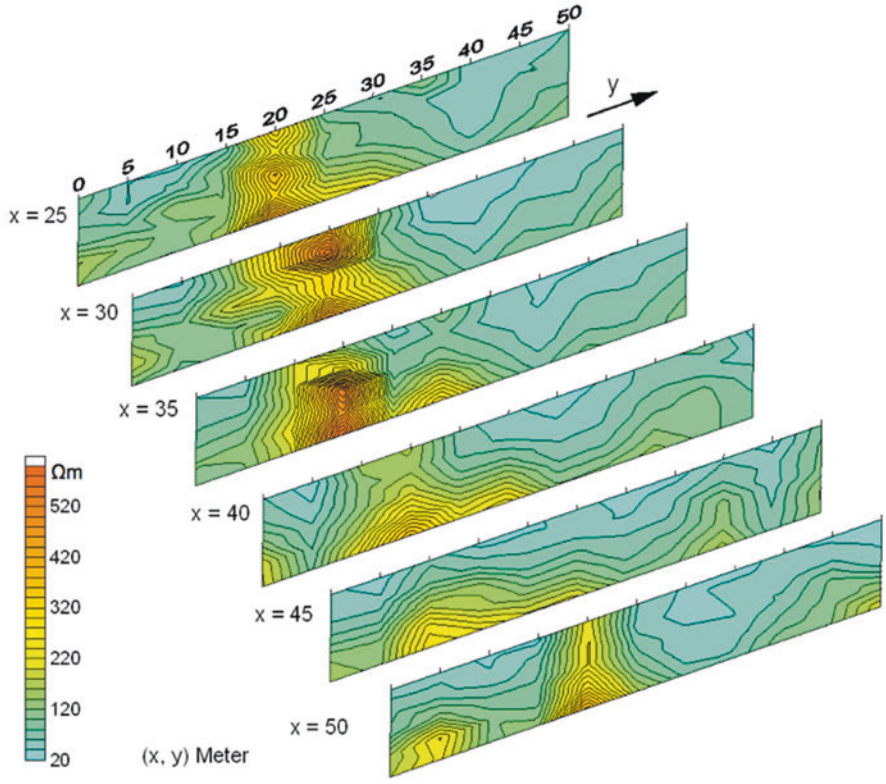


Abb. 3.62 Ausschnitt eines 3D-Electrical-Imaging mit einem 5 m × 5 m-Raster von Pol-Dipol-Einzelsondierungen mit logarithmischer Erderanordnung und Pseudosektionen einer 2D-Messung

1D-Inversion zu merklich besseren Ergebnissen. Wie bei der medizinischen Tomographie können ganz entsprechend auch horizontale Schnitte der Widerstandsverteilung angefertigt werden (Abb. 3.63).

Magnetotellurische Verfahren

Bei der Induktionsgeoelektrik (Elektromagnetik) unterscheidet man vor allem Verfahren, die natürliche elektromagnetische Felder registrieren, und solche, die mit der Geophysik selbst aktiv erzeugt werden. Bei den Verfahren der Magnetotellurik (die eigentliche Magnetotellurik, MT, und die Audiomagnetotellurik, AMT) sind es natürliche elektromagnetische Felder, die, erdumspannend, aus Quellen in der Ionosphäre und in den circumäquatorialen Gewittergürteln der Tropen gespeist werden und bei denen synchron gemessene elektrische und magnetische Feldkomponenten und deren Phasenbeziehungen die Modellierung von Widerstandsverteilungen ermöglichen. Wegen der langperiodischen Schwankungen dieser Felder sind große Eindringtiefen bis tief in die Erdkruste und den oberen Erdmantel erzielbar (Skin-Effekt!). Die kostengünstige Magnetotellurik wird heute

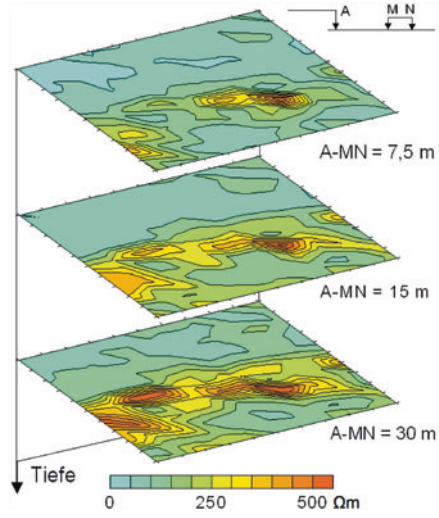


Abb. 3.63 Aus einem Netz von Tiefensondierungen abgeleitete horizontale Schnitte einer 3D-Tomographie für den scheinbaren spezifischen Widerstand für zunehmende Tiefenbereiche; Pol-Dipol-Anordnung. Stark verkarsteter Jurakalkstein

weltweit in allen Bereichen der tieferen geophysikalischen Untergrunderkundung, darunter auch der Tiefen Geothermie, eingesetzt. Gewisse Nachteile dieser unkontrolliert schwankenden natürlichen Felder vermeidet man mit einer Simulation der natürlich ablaufenden Prozesse und der Praktizierung einer aktiven, kontrollierten Magnetotellurik, die unter dem englischen Begriff der CSAMT*, controlled source audio magnetotellurics*, bekannt ist und Tiefenbereiche von mehreren 100 m bis zu einigen Kilometern erreicht. In der Oberflächennahen Geothermie wird man jede Art von Magnetotellurik erst für diesen tieferen Bereich bis zur definierten 400 m-Grenze und darüber hinaus für die mitteltiefe Geothermie in Betracht ziehen.

Impuls- und Frequenzelektromagnetik

Für die eher bei geringeren Untersuchungstiefen eingesetzten aktiven Induktionsverfahren ist letztlich auch die Verteilung der elektrischen Gesteinswiderstände mit ihrer geologischen Interpretation maßgeblich. Das hervorstechendste Merkmal der Wechselstrom-, Induktions- oder EM-Verfahren ist, dass ein elektrisches Feld im Untergrund ohne Kontakt zum Boden aufgebaut und ausgemessen werden kann. Die Vorteile sind offenkundig in Fällen, in denen eine schlechtleitende Deckschicht eine Gleichstromzufuhr sehr erschwert oder sogar unmöglich macht. Messungen über Eis, extrem trockenen Sanden in ariden Gebieten oder anstehendem unverwittertem Kristallin dienen als Beispiele. Ein Spezialfall der nichtleitenden Deckschicht ist bei der Messung vom Hubschrauber oder Flugzeug aus (*airborne EM*) gegeben. Die große Beweglichkeit der Flugvermessung ist auch als Merkmal bei der Bodenvermessung hervorzuheben. Schließlich zeichnet sich die Wechselstrom-Geoelektrik durch eine überaus große Vielfalt an Messmöglichkeiten aus, die eine gute Anpassung an unterschiedliche Aufgabenstellungen erlauben. Grundsätzlich wird dabei zwischen Messungen mit kontinuierlichen Wechselströmen (Frequenz-Elektromagnetik, FEM; Messungen im Frequenzbereich) und Messungen mit

Impulsen (transiente EM, TEM; Messungen im Zeitbereich, auch TDEM für engl. *time domain electromagnetics*) unterschieden. Mit neuen Generationen von Messgeräten hat vor allem die TEM stark zu einer Belebung der Wechselstrom-Geoelektrik beigetragen, was sich auch bei der oberflächennahen Geophysik bemerkbar macht. Viel schwieriger ist die mathematische Behandlung der Wechselstromausbreitung in geologisch geformten elektrischen Leitern. Die Zielsetzung ist aber dieselbe wie bei Gleichstromsondierungen: Es ist die physikalische Widerstandsverteilung zu ermitteln und diese in ein geologisches Bild umzusetzen.

Frequenz-Elektromagnetik (FEM)
Die FEM-Wechselstrommethoden beruhen auf einem gemeinsamen, einfachen Prinzip. Es lässt sich mit einem Modell beschreiben, das aus drei Spulen besteht (Abb. 3.64). In der Sende-Spule (englisch: *transmitter*) fließt ein Wechselstrom, der mit einem Wechselmagnetfeld verknüpft ist. Dieses Primärfeld H_P induziert in der „Spule" des elektrisch leitenden Untergrundes eine Wechselspannung, die Stromfluss in Form von Wirbelströmen zur Folge hat. Sie sind vom sekundären Magnetfeld H_S begleitet, das in der Empfänger-Spule (englisch: *receiver*) eine Spannung induziert. In der „Untergrund-Spule" fließen die induzierten Ströme entsprechend der Widerstandsverteilung, die Gegenstand der FEM-Messung ist. Die Sende-Spule steht stellvertretend für eine Vielzahl sehr unterschiedlicher „Sender", die das Primärfeld erzeugen. Die Empfänger-Spule ist in nahezu allen Fällen tatsächlich eine Induktionsspule, die die Messgrößen registriert. Dieses Drei-Spulen-Modell erlaubt eine Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Feldern nach Gesetzen der Wechselstromlehre, und wer mit der Materie weniger vertraut ist, sei auf die vielen diesbezüglichen Lehrbücher verwiesen.

Vergleicht man das Prinzip dieser Wechselstrom-Geoelektrik mit dem der Gleichstrom-Widerstandsmessung (Abb. 3.56), so drängt sich eine grobe Analogie auf: Die felderzeugende Sende-Spule korrespondiert mit dem Elektrodenpaar A, B, und die

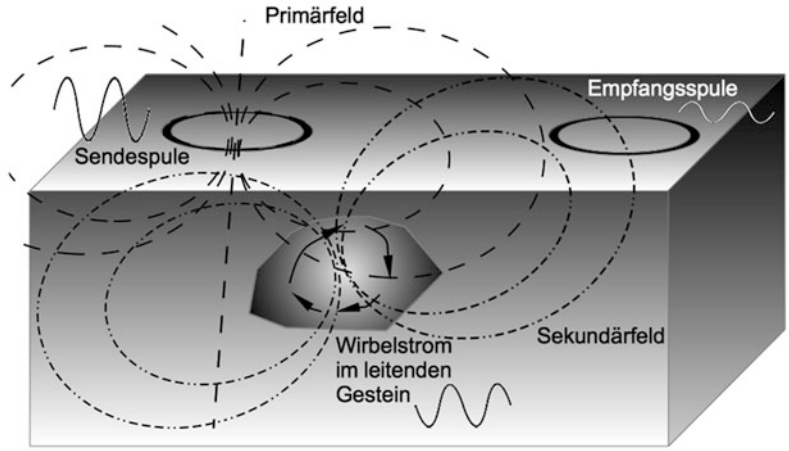


Abb. 3.64 Messprinzip der Frequenz-Elektromagnetik (fEM)

Spannungsmessung mit der Empfänger-Spule steht für die Spannungsmessung mit dem Sondenpaar M, N. Eine zusätzliche Komponente sind aber die Phasenbeziehungen zwischen den elektromagnetischen Feldern, wie sie aus der Elektrotechnik bekannt sind. Bei der FEM liefern sie zusätzliche Informationen über den spezifischen Widerstand des Gesteinsuntergrundes.

Eine wichtige Eigenart von Wechselstrommessungen liegt im physikalischen Prinzip des sogenannten *Skin-Effektes* (Hauteffekt). Vereinfacht ausgedrückt bewirkt er, dass EM-Felder nicht beliebig tief in den Untergrund oder ganz allgemein in einen elektrischen Leiter eindringen können. Der Effekt ist umso ausgeprägter, je höher die Messfrequenz und je niedriger der spezifische Widerstand des Leiters ist, wobei die Schwächung nach einem Exponentialgesetz erfolgt. Als Maß ist die Skin-Tiefe definiert. In dieser Tiefe ist die Stärke des Feldes auf 1/e oder 37 % seiner Oberflächenamplitude zurückgegangen. In der doppelten Skin-Tiefe beträgt es nur noch etwa 15 %. Dieselbe Gesetzmäßigkeit gilt für die Stärke der induzierten Wirbelströme.

Nicht sehr glücklich wird die Skin-Tiefe auch als die Eindringtiefe bei EM-Messungen bezeichnet, ist aber für vergleichende Abschätzungen nützlich. Man berechnet für z. B. einen Tonstein mit einem spezifischen Widerstand von 10 Ωm und eine Messfrequenz von 1000 Hz eine Skin-Tiefe von 50 m. Für unverwittertes Kristallingestein (z. B. 4000 Ωm) und dieselbe Frequenz ergibt sich eine Skin-Tiefe von 1000 m. Bei einer Frequenz von 10 Hz lauten die Zahlen 500 m (Tonstein) und 10 000 m (Kristallingestein), bei 100 kHz entsprechend 5 m und 100 m. Mit diesen Frequenzen ist grob der Bereich abgesteckt, in dem die meisten EM-Sondierungen durchgeführt werden.

Bei näherer Beschäftigung mit der FEM fällt auf, dass wenig vom spezifischen Widerstand die Rede ist. Das liegt daran, dass die behandelten Messgrößen (Amplitude der im Empfänger induzierten Spannung, Phasenverschiebung) nicht so ohne Weiteres in diesen gesteinsphysikalischen Parameter überführt werden können, wie es bei den Gleichstrom-Messungen der Fall ist. Deshalb erfolgt die Auswertung (Darstellung, Berechnungen, Modellkurvenvergleich) meist auf der Ebene der Magnetfeld-Größen. Eine exakte quantitative Behandlung gelingt in der Wechselstrom-Geoelektrik für den horizontal geschichteten Untergrund, der mit der EM-Tiefensondierung untersucht wird. Bei den verschiedenen EM-Horizontalsondierungen versucht man vielfach noch, die lateralen Widerstandsänderungen durch einfache Modelle wie Kugeln, linienförmige Stromkonzentrationen oder blattförmige Leiter zu beschreiben, obgleich eine Computer-Modellierung von komplizierten Strukturen möglich ist.

Die FEM-Verfahren zeichnen sich durch eine nahezu unübersehbare Vielfalt möglicher Messsysteme entsprechend den Sende- und Empfänger-Spulen in Abb. 3.64 aus. Der Sender kann wirklich eine Spule sein (Slingram-Verfahren (z. B. Abb. 3.126)), Zentralinduktionsmethode). Die Durchmesser schwanken dann zwischen Dezimetergröße und mehreren 100 m, wobei die kleinen Spulen in variabler Orientierung verwendet werden. Große Dimensionen erreichen auch die Sender in Form eines kilometerlangen, stromdurchflossenen, isolierten Drahtes (Kompensator-Verfahren, Turam).

Die Umsetzung eines Messsystems in feldtüchtige Messgeräte erfordert andere Überlegungen als bei Gleichstromsondierungen. Der Induktionsprozess zwingt den Konstrukteur zu Kompromissen: Auf der einen Seite sind hohe Messfrequenzen erwünscht, die starke Wirbelströme mit einem kräftigen Sekundärfeld induzieren. Hohe Frequenzen bedeuten aber eine kleine Skintiefe (= kleine Untersuchungstiefe). Große Untersuchungstiefen brauchen im Allgemeinen niedrige Frequenzen, bei denen aber die Induktionswirkung gering ist. Das kann bis zu einem gewissen Grade durch eine höhere Anregungsenergie kompensiert werden. Höhere Energie ist aber zwangsläufig mit größerem Gewicht verknüpft, was sich auf die Mobilität einer Apparatur auswirkt. Der Faktor „Mobilität“ führt zu einer Einteilung in Systeme, bei denen der Sender ortsfest bleibt, und solche mit beweglichem Sender. Ortsfeste Sender sind die großen, im Gelände auf dem Boden ausgelegten Leiterschleifen oder die linienförmigen isolierten Drähte. Bei der Gruppe der beweglichen Sender, die naturgemäß vor allem bei der Horizontalsondierung Verwendung finden, verändert sich die EM-Anregung des Untergrundes von Messpunkt zu Messpunkt. Deshalb sind die so gewonnenen Messkurven viel komplizierter aufgebaut und entsprechend schwieriger zu deuten. Den Sender bilden tragbare Luftspulen oder Ferritkernspulen der Dimension Dezimeter bis Meter.

Verglichen mit der Widerstandstiefensondierung hat die FEM-Tiefensondierung einige Vorzüge aufzuweisen. Ein wesentlicher basiert darauf, dass eine Tiefenwirkung durch Veränderung der Geometrie der Messaufstellung und zusätzlich durch die Veränderung der Messfrequenz erzielt werden kann. Im ersten Fall spricht man von einer geometrischen Sondierung, im zweiten von einer Frequenzsondierung (englisch auch: *parametric sounding*). Die Wirkungsweise der Frequenzsondierung wird durch den Skin-Effekt verständlich: Bei hohen Frequenzen fließen die Wirbelströme oberflächennah und können bei abnehmender Messfrequenz zunehmend tief eindringen. Das kann bei einer festen Sender-Empfänger-Aufstellung geschehen, wobei der methodische Vorteil hervorzuheben ist: Da bei der Frequenzsondierung der Stromfluss im Allgemeinen stark auf das Volumen unter dem Sender am Messpunkt konzentriert ist, verlieren Lateraleffekte an Gewicht. Ein Nachteil ist der messtechnische Aufwand für Sender und Empfänger mit durchstimmbarem Frequenzspektrum. Bei geometrischen Sondierungen genügt eine Festfrequenz. Auch eine Kombination beider Systeme ist gebräuchlich. In jedem Fall stellt sich dieselbe Aufgabe wie bei der Gleichstrom-Tiefensondierung: Ein horizontal geschichteter Untergrund ist hinsichtlich der Anzahl der Schichten, ihrer Mächtigkeiten und spezifischen Widerstände zu untersuchen.

FEM-Horizontalsondierungen gehören zu den ältesten Verfahren der angewandten Geophysik. Sie haben ihre größte Bedeutung in der Erzexploration, und Auswerte- und Interpretationsmethoden sind fast ausschließlich für diesen Einsatz entwickelt und in der Literatur beschrieben worden. In neuerer Zeit ist ihre Verwendung universeller geworden; sie ersetzen vielfach die Horizontalsondierung mit Gleichstrom, da sie raschen Messfortschritt gewährleisten und Personal einsparen. Typische moderne Apparaturen zeigt die Abb. 3.126.

Impuls-Elektromagnetik (TEM, TDEM)

Die Idee der Entwicklung der Impulsverfahren hat einen einfachen Grund, der in Abb. 3.64 für die FEM erklärt wird: Außer der Induktionsspannung des Sekundärfeldes H_S registriert die Empfänger-Spule stets auch mehr oder weniger stark das sich überlagernde Primärfeld H_P. Man kann versuchen, H_P zu kompensieren, aber klug erscheint es, H_S zu registrieren, wenn H_P ausgeschaltet ist. Genau das lässt sich mit Strom*impulsen*, die in die Sendespule geschickt werden, erreichen. Mit dem Ende des Impulses, wenn ein starker Gleichstrom in der Spule abrupt unterbrochen wird, verschwindet das Primärfeld, und gleichzeitig wird ein Wirbelstrom im Untergrund induziert. Nach den Induktionsgesetzen breitet sich dieser Stromwirbel von der Erdoberfläche nach unten aus, wobei dieser Diffusionsprozess nach und nach den ganzen Raum erfasst, was sehr anschaulich mit dem Rauchring-Effekt beschrieben wird (Abb. 3.65, Nabighian & MacNae 1991). Dabei lässt sich berechnen, in welcher Diffusionstiefe zu einem vorgegebenen Zeitpunkt die Stromdichte ein Maximum hat. Umgekehrt kann man berechnen, zu welcher Zeit der Schwerpunkt der Stromdichte eine vorgegebene Tiefe passiert. Hier lohnt eine Gegenüberstellung mit den Verhältnissen bei der Frequenzsondierung (FEM). Für unterschiedlich leitenden Untergrund gilt: Ist die Leitfähigkeit groß, breiten sich die Strom-„Ringe“ mit geringer Geschwindigkeit in die Tiefe aus; zu einer vorgegebenen Zeit liegt der Schwerpunkt der Stromdichte höher als bei schlechter leitendem Untergrund. Im Frequenzbereich mit einer vorgegebenen Frequenz entspricht das einer geringeren Skin-Tiefe im besser leitenden Untergrund. Das bedeutet:

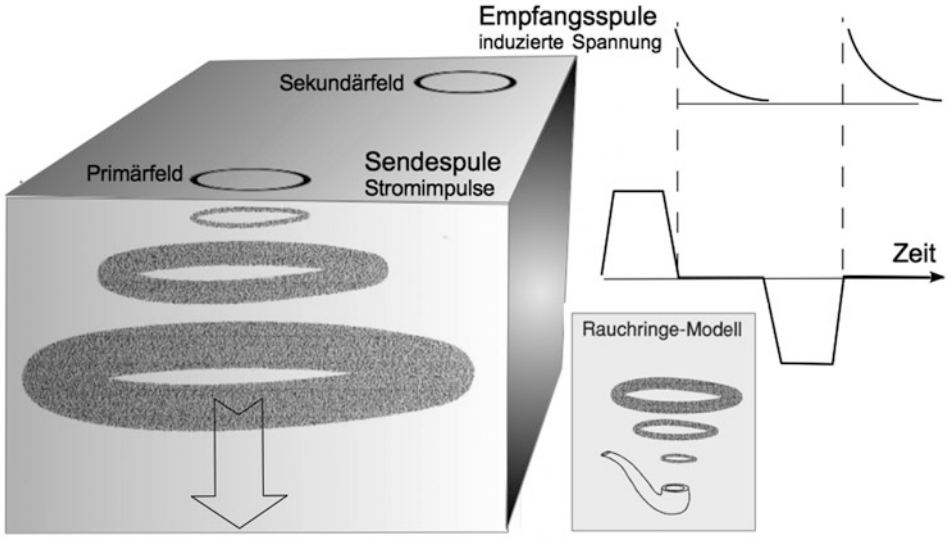


Abb. 3.65 Messprinzip der transienten (Impuls-)Elektromagnetik (TEM). Der Schwerpunkt des Stromdichte-„Rauchrings“ wandert mit einer widerstandsabhängigen Geschwindigkeit nach unten, und das mit ihm verknüpfte Sekundärfeld (Feldlinien nicht gezeichnet) induziert in der Empfangsspule eine mit der Zeit (im Mikro- und Millisekundenbereich) abklingende Spannung, wenn nach Impulsende das Primärfeld Null ist

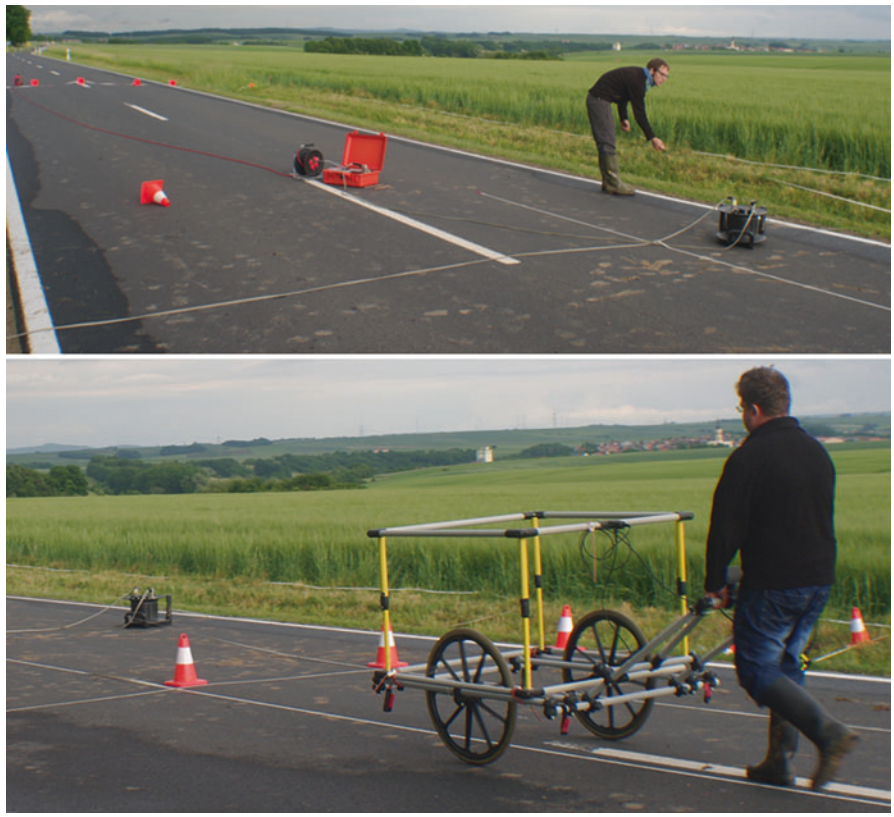


Abb. 3.66 Impuls-Elektromagnetik mit großer Sendeschleife (oben) und beweglichem Empfänger (Fotos Ebinger GmbH)

Eine Tiefensondierung im Zeitbereich (TEM) untersucht an einem festen Ort das Abklingen des Feldes als Funktion der Zeit, d. h. zu späteren Zeiten erhält man Informationen aus größerer Tiefe. Misst man an verschiedenen Orten die Feldkomponenten zu einer festen Zeit nach dem Impulsende, so handelt es sich um eine TEM-Horizontalsondierung. Wie bei Gleichstrom-Widerstandsmessungen und FEM-Messungen lässt sich bei einer Messkampagne (z. B. Abb. 3.66) beides zu einer Tomographie verknüpfen (Abb. 3.67).

Radiowellenmethode (VLF, VLF-R und RMT)

Das VLF-Verfahren ist ein weitverbreitetes Messverfahren, das einfach und kostengünstig in der Ausführung ist. VLF steht für *very low frequency*. Das „sehr niedrig" bezieht sich auf die Trägerfrequenz von Radiosendern, die hier das elektromagnetische Primärfeld liefern. Der VLF-Bereich (Ultralangwellenbereich) schließt an den Langwellenbereich an und überstreicht 10–150 kHz. Für die Zwecke der Geoelektrik sind das sehr hohe Frequenzen. Die Wellen breiten sich wie auch die bei den Blitzentladungen der Magnetotellurik

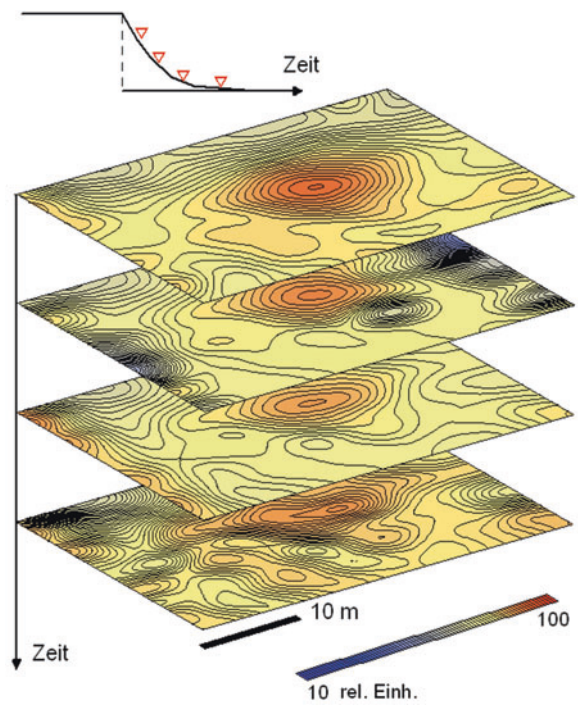


Abb. 3.67 TDEM Tomographie

zwischen Erde und Ionosphäre aus und haben bei starken Sendern Reichweiten von mehreren 1000 km. Meist handelt es sich bei den VLF-Sendern um Sender für technische und kommerzielle Zwecke (U-Boot-Navigation, Zeitzeichen, Nachrichtenagenturen u. a.) Bei VLF-Messungen viel verwendete europäische Sender hoher Leistung sind Moskau (Russland), Bordeaux (Frankreich), Rugby (Großbritannien) und Helgeland (Norwegen). Ihre Frequenzen liegen zwischen 15 und 25 kHz. Für Deutschland ist die Marinefunksendestelle Rhauderfehn in Niedersachsen ein starker Sender mit einer Frequenz von 23,4 kHz.

Abb. 3.68 zeigt ideale Verhältnisse: Der Sender liegt im Streichen einer gut leitenden Zone. Dann erfolgt maximale Induktion, da das Primärfeld H_P horizontal als Tangente an Kreisen mit dem Sendemast als Mittelpunkt schwingt. Die einfachste Version eines Messgerätes besteht aus einem Radioempfänger für den VLF-Bereich und einer externen, rotierbaren Ferritantenne, mit der Störungen des Empfangs durch elektrische Leiter unter und über der Erde (Hochspannungsleitungen!) angezeigt werden. Verschiedene Messgrößen sind registrierbar; eine verbreitete Größe ist der sogenannte *Kippwinkel* der Antenne, die bei ungestörtem Untergrund minimalen Senderempfang im Fall einer vertikal orientierten Antenne hat. Liefern anomale Leitfähigkeitsstrukturen ein überlagerndes Sekundärfeld, muss die Antenne rotiert „gekippt“ werden, bis wieder minimaler Empfang erreicht ist, was der mit der Antenne verbundene Gefällmesser als Messgröße in

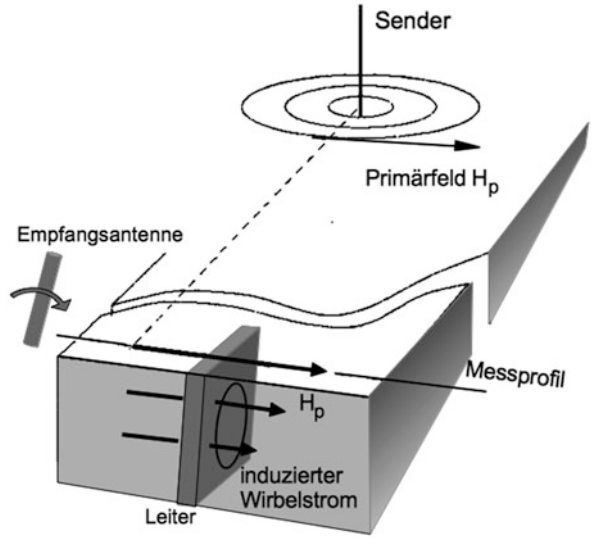


Abb. 3.68 Messprinzip der Radiowellenmethode (VLF)

Abb. 3.69 VLF-Messgerät mit fest eingebautem Antennensystem

Winkelgrad anzeigt. Andere kommerzielle Geräte (z. B. Abb. 3.69) ersetzen die rotierbare Antenne durch ein fest orthogonal installiertes Antennenpaar.

VLF-Messungen erfolgen in aller Regel auf Profilen senkrecht zum Streichen der interessierenden Strukturen. Nach Abb. 3.68 wäre ein Sender genau im Streichen optimal, was eher selten der Fall ist. Bei unbekanntem Streichen empfehlen sich orthogonale Profilraster mit zwei entsprechend orientierten Sendern. Kippwinkelprofile schräg zum Strukturstreichen können zu unsymmetrischen VLF-Kurven führen und bei Nichtbeachtung ein Einfallen vortäuschen. Der gegenseitige Abstand der VLF-Profile sollte eher enger als zu weit gewählt werden. Bei kleinräumigen Untersuchungen können 20 m sinnvoll sein, um korrelierbare Anomalien aufzuzeigen. Auf den Profilen sind Messpunktabstände zwischen 5 m und 20 m üblich. Die kleinen Abstände sollten gewählt werden, wenn die Daten kurzwellige Schwankungen durch geologisches „Rauschen“ (Abschn. 3.4.4) aufweisen. Übertrifft der Messpunktabstand die Wellenlänge des Rauschens, so ist leicht die

Zeichnung von Scheinanomalien die Folge, wie es bei vielen anderen geophysikalischen Messungen der Fall ist (vgl. Abb. 3.123). Auch der Wunsch nach einer präzisen Lokation für einen Bohransatzpunkt kann kleine Messpunktabstände notwendig machen.

Obgleich mittlerweile Auswertematerial in größerer Menge vorliegt und Computerprogramme vertrieben werden, orientiert sich die Deutung von VLF-Messungen meist an einfachen Leifähigkeitsstrukturen. Die wichtigsten sind nach wie vor die mehr oder weniger steil einfallenden Zonen erhöhter Leitfähigkeit, für die modellhaft auf Abb. 3.70 und mit zwei Beispielen aus der Praxis auf Abb. 3.99 und 3.106 verwiesen wird.

Zusätzliche Informationen gewinnt man über die gleichzeitige Messung des elektrischen Feldes mit einer kurzen Elektrodenstrecke, deren Wechselspannung man dem Eingangsverstärker des VLF-Empfängers zuführt. Ähnlich wie beim Verfahren der Magnetotellurik können die Messwerte des magnetischen (H) und des elektrischen Feldes (E) in einen scheinbaren spezifischen Widerstand überführt werden (*resistivity*, daher auch der Name VLF-R[*esistivity*]); als weitere Messgröße wird die Phasenverschiebung zwischen H und E ermittelt. Kommerzielle Geräte sehen diese Ergänzungsmessung vor.

Noch weiter geht eine Messgeräteentwicklung, die eine VLF-Frequenzsondierung ermöglicht. Rechnergesteuert werden nacheinander VLF-Sender unterschiedlicher Frequenzen und darüber hinaus Sender aus dem Lang- und Mittelwellenbereich geschaltet und ihre E- und H-Feldkomponenten gemessen, die in scheinbare spezifische Widerstände

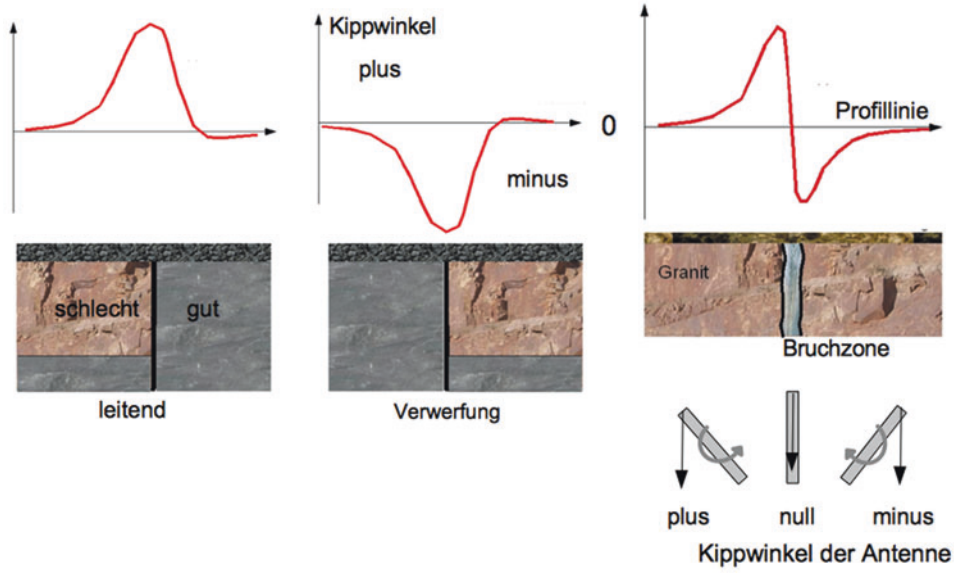


Abb. 3.70 Typische VLF-Anomalien über einer Verwerfung und einer schmalen, gangförmigen Leitfähigkeitsstruktur mit den zugehörigen charakteristischen Plus-Minus-Anomalien der Antennen-Kippwinkel.

überführt werden. Konstruktion und Auswertung von Sondierungskurven und Pseudosektionen sind bei dieser Radio-Magnetotellurik (RMT) (oder *low-frequency resistivity,* LF-R) möglich.

Bei den üblichen kommerziellen VLF-Geräten werden die Antennen entweder freihändig gehalten und rotiert oder als Gürtel- bzw. Rucksackkonstruktionen getragen. Dabei sind unerwünschte seitliche Kippungen der Antennen oder auch Schwankungen des Gefällmessers unvermeidlich, was günstigstenfalls Ablesegenauigkeiten von 2–3° beim Kippwinkel erlaubt. Eine um eine Größenordnung bessere Auflösung erzielt man mit einer Stativmontierung der sorgfältig zu justierenden Antenne. Eine solche MIKRO-VLF-Messung, die verständlicherweise aufwendiger ist, gestattet die Aufnahme von Anomalien mit Amplituden von nur 1–2° (Abb. 3.46). Schließlich soll auch auf die elegante Möglichkeit aufmerksam gemacht werden, mit der VLF-Messung rasch künstliche Leiter im Untergrund aufzuspüren, wenn der Verdacht auf gestörte geoelektrische Sondierungen mit anderen Methoden besteht.

Eigenpotential-Methode

Verbindet man zwei beliebige Punkte der Erdoberfläche mit einem Voltmeter, so wird es in aller Regel eine Gleichspannung der Größenordnung einige Millivolt bis einige 100 mV anzeigen. Diese Spannungen dokumentieren im Untergrund fließende Ströme; man nennt sie Eigenpotentiale (englisch: *self potential, spontaneous potential* (SP); französisch: *potentiel spontané* (PS)). Sie können sehr unterschiedliche Ursachen haben; in vielen Fällen ist der in den Gesteinen enthaltene Porenelektrolyt beteiligt. Man unterscheidet thermische Potentiale, Mineralisations-, Diffusions-, Membranpotentiale (elektrochemische Potentiale) sowie elektrokinetische Potentiale. *Thermische Potentiale* sind mit Wärmefluss (Abschn. 3.3.7) im Gestein verbunden. Ihre Messung wird im Zusammenhang mit der Exploration auf geothermale Energie betrieben. *Mineralisationspotentiale* entstehen im Bereich von sulfidischen und oxidischen Erzkörpern oder Graphitvorkommen durch Oxidations- und Reduktionsvorgänge im umgebenden Gestein. Die Spannungen können einige 100 mV erreichen; ihre Messung begründet ein einfaches Prospektionsverfahren. *Diffusionspotentiale* treten auf, wenn im Gestein Porenelektrolyten unterschiedlicher Konzentration aneinandergrenzen. Da sich verschiedene Ionen im Konzentrationsgefälle nicht gleich schnell fortbewegen (z. B. Na^+ langsamer als Cl^-), kommt es zu einer Ladungstrennung, die als Diffusionspotential gemessen wird. Die Höhe der Spannung hängt wesentlich vom Konzentrationsverhältnis und den beteiligten Ionen ab und erreicht selten mehr als 10 mV.

Höhere Spannungen (einige 10 mV) werden in Form der *Membranpotentiale* gemessen. Sie entstehen in tonhaltigen Gesteinen durch die Fähigkeit der Tonminerale, Anionen (z. B. Cl^-) anzulagern, Kationen (z. B. Na^+) aber bei einem Konzentrationsgefälle passieren zu lassen. Diffusions- und Membranpotentiale spielen eine wichtige Rolle bei bohrlochgeophysikalischen Messungen in Form des SP-Logs.

Für hydrogeologische und hydraulische Untersuchungen sind die *elektrokinetischen Potentiale* (auch: *Filtrationspotentiale, Strömungspotentiale*) die wichtigsten

Eigenpotentiale. Sie entstehen durch Wasserbewegungen im Gestein. Eine Ladungstrennung erfolgt dadurch, dass sich im Kontaktbereich Gesteinsmatrix – fluide Phase eine elektrisch geladene Doppelschicht (Helmholtzsche Doppelschicht) ausbildet. Sie lagert Ionen eines bestimmten Vorzeichens an, während die anders geladenen Ionen bevorzugt mit dem fließenden Wasser transportiert werden. Gewöhnlich ist das Potential der Doppelschicht (Zeta-Potential) derart ausgebildet, dass Kationen bewegt werden: In Richtung des fließenden Wassers baut sich ein positives Potential auf. Die Größe der elektrokinetischen Potentiale hängt vom Betrag des Zeta-Potentials, vom spezifischen Widerstand, von der Viskosität und von der Dielektrizitätskonstanten des Porenelektrolyten sowie vom Druckgefälle ab. Statt des Druckgefälles können auch die Permeabilität und die Fließgeschwindigkeit betrachtet werden.

Das Strömungspotential ist der Druckdifferenz und dem spezifischen Widerstand des Porenelektrolyten direkt proportional; Viskosität und Dielektrizitätskonstante haben eher untergeordnete Bedeutung. Erfahrungsgemäß können die Strömungspotentiale gut messbar einige 100 mV erreichen.

Die Messung von Eigenpotentialen ist – technisch gesehen – sehr einfach (Abb. 3.71). Die Ausrüstung benötigt ein elektronisches Millivoltmeter mit hochohmigem Eingang. Für den Spannungsabgriff an der Erdoberfläche sind unpolarisierbare Sonden unverzichtbar. Die Verbindung zum Messgerät erfolgt mit gut isoliertem, einadrigem Kabel.

Eigenpotential-Messungen sind Relativmessungen, da keinem Punkt der Erdoberfläche ein absoluter Potentialwert zugeordnet werden kann. Es werden nur Spannungsänderungen registriert, die man auf einen festen Punkt, die Basis, bezieht. Gemessen wird netzförmig (Abb. 3.109) oder – bei langgestreckten geologischen Strukturen – auf Profilen senkrecht zum vermuteten Streichen (Beispiele in Abb. 3.110). Der Messpunktabstand variiert je nach Fragestellung zwischen 1 m und wenigen Dekametern. In jüngerer Zeit werden auch aufwendige SP-Arrays eingesetzt, in denen die Spannungswerte von einigen 100 vorab installierten Sonden innerhalb kurzer Zeit rechnergesteuert abzurufen sind.

Wenn auch das rein Messtechnische der SP-Methode wenig anspruchsvoll ist, so sind viele Einflussfaktoren wie tellurische Ströme (Abb. 3.43), Bodenfeuchte, pH-Wert im Bereich der Erdungspunkte, Sondendrift durch Temperaturänderungen, elektrische Felder

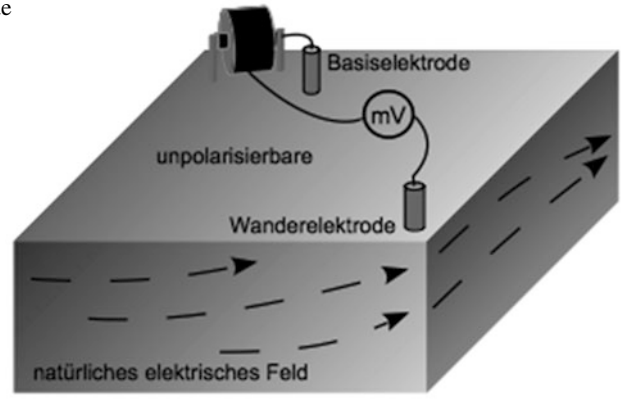


Abb. 3.71 Eigenpotentialmethode

von Industrieanlagen und Bahnen und anderes zu beachten. Wie bei anderen geoelektrischen Verfahren ist das Messen in der Nähe künstlicher Erder zu vermeiden. Mitunter wird man eine starke Vegetationsabhängigkeit der Messwerte beobachten. Direktes Kontaktieren von Pflanzenwurzeln mit der Sonde kann negative Potentiale von über 100 mV erzeugen. Auch in der Nähe von Baumwurzeln können hohe Werte gemessen werden, die vermutlich auf transpirationsbedingte Strömungspotentiale im Boden zurückzuführen sind. Auf eine starke zeitliche Veränderung von Eigenpotentialen in Verbindung mit meteorologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten haben Ernstson & Scherer (1986) hingewiesen.

Die Auswertung und Deutung von Eigenpotential-Messungen ist meist qualitativer Natur. Ansätze einer quantitativen Behandlung betrachten einfache geometrische Ladungsträger-Modelle wie Punktquellen, Dipole, linienförmige Quellen, Kugeln oder Zylinder. Aufwendigere analytische Techniken, Modellkurven-Berechnungen und Computerprogramme insbesondere zur Behandlung von Strömungsvorgängen haben stark an Bedeutung gewonnen. Hier ist der bemerkenswerte Zusammenhang mit der mathematischen Ähnlichkeit zwischen den hydraulischen und den zugehörigen elektrischen Potentialen hervorzuheben. Probleme resultieren aus dem Umstand, dass viele Aspekte der Strömungspotentiale noch ungenügend oder gar nicht untersucht sind. Das betrifft vor allem Mehrstoffsysteme bei Gesteinsmatrix und Porenelektrolyt sowie Ionen-Adsorptionsprozesse. Oft wird auch vergessen, dass die Potentialverteilung an der Erdoberfläche erheblich durch die spezifischen Widerstände im Untergrund beeinflusst wird.

Methode des geladenen Körpers (mise-à-la-masse-Methode)

Die *mise-à-la-masse*-Methode wurde in den Anfängen der geoelektrischen Erzexploration eingesetzt, geriet in Vergessenheit und erfuhr in neuerer Zeit eine Wiederentdeckung. Bei einigen hydrogeologischen Fragestellungen verspricht sie brauchbare Ergebnisse. Methodisch ist sie zwischen Widerstandssondierung und Eigenpotential-Messung angesiedelt: Mit geerdeten Elektroden wird ein elektrisches Feld erzeugt, das mit der Technik des SP-Verfahrens (siehe zuvor) ausgemessen wird. Praktisch wird eine Art Halbwenner-Anordnung mit fester Elektrode A und wandernder Sonde M aufgebaut. Die zweite Stromelektrode B und die Bezugsbasis N der Spannungsmessung werden in große Entfernung (theoretisch: ins Unendliche) gerückt. Ist der Untergrund homogen, so werden die Äquipotentialflächen bzw. -linien durch konzentrische Halbkugeln bzw. Kreise mit dem Mittelpunkt der Elektrode A dargestellt (Abb. 3.72, links.). Gutleitende Einlagerungen verzerren jedoch das Feld und stören im Allgemeinen die Symmetrie. Dieser Effekt ist besonders groß, wenn die Elektrode den eingelagerten Körper kontaktiert. Das wird bei der *mise-à-la-masse*-Methode angestrebt. Streicht der Körper nicht aus, muss er angebohrt werden. Man kann sagen, dass er als verlängerte Elektrode dient, deren Form und Lage sich im Potentialfeld an der Erdoberfläche abzeichnet (Abb. 3.72, rechts).

Die Messungen können mit Apparaturen für die Widerstandssondierung (z. B. Abb. 3.59) durchgeführt werden. Man beachte, dass der zugeführte Strom konstante Stärke besitzt. Fehlt eine Reguliermöglichkeit, bildet man zur Normierung den Quotienten

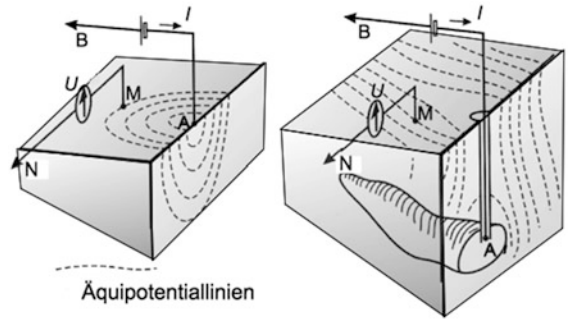


Abb. 3.72 Methode mise-á-la-masse

aus Spannung und Strom. Ein natürliches Eigenpotential-Feld ist gegebenenfalls zu berücksichtigen.

3.6.2 Seismik

Überblick

Die Seismik steht in Verwandtschaft zu Radar-Messungen (Abschn. 3.6.4), zum Echolot-Verfahren und zur Erdbebenkunde (Seismologie). In allen Fällen wird die Laufzeit von wellen- oder impulsförmigen elektrischen oder mechanischen Signalen gemessen, die ein Medium (gasförmig, flüssig, fest) durchlaufen. Kennt man die Geschwindigkeit der Signalfortpflanzung, sind Schlüsse auf den zurückgelegten Weg möglich. In der Seismologie führen diese Wege durch den gesamten Erdkörper, und die Signale sind die Erschütterungswellen, die beim Erdbeben ausgelöst werden. In der Seismik löst der Mensch durch künstliche Erschütterungen Wellen aus, die, entsprechend der geringeren Energie, vielfach nur den obersten Teil der Erdkruste durchdringen. In der Oberflächennahen Geothermie sind selten mehr als 100–200 m Untersuchungstiefe von Interesse; der Übergang zur mitteltiefen und Tiefen Geothermie bezüglich Geländearbeiten, Datenverarbeitung und Interpretation ist fließend, und Ausführungen hin zur tieferen Geothermie studiert man besser im entsprechenden *Handbuch Tiefe Geothermie* (Bißmann und Kahnt 2014). Die zu erkundenden Wege betreffen sehr oft einen geschichteten Untergrund, der die seismischen Wellen durch Reflexion an den Schichtgrenzen zurückführt (Reflexionsseismik, Abb. 3.73). Beim Radar sehr selten und beim Echolot gar nicht genutzte Wellenwege entlang von Schichtgrenzen begründen den anderen Hauptzweig der Explorationsseismik, die Refraktionsseismik (Abb. 3.73). Beide Wellenwege können miteinander korrespondieren (Abb. 3.74), und in jüngerer Zeit wird gerade bei flachgründigen Untersuchungen beides verknüpft, wozu sich auch der spezielle Weg der Ausbreitung von Oberflächenwellen entlang der Erdoberfläche gesellt. Der methodische Unterschied von Reflexions- und Refraktionsseismik ist ursprünglich historisch bedingt und lässt sich an der Graphik der Abb. 3.73 ablesen. Im frühen „Durcheinander" der verschiedenen Welleneinsätze war es in der Seismik zunächst kaum möglich, verlässliche Reflexionen zu indizieren. Erst

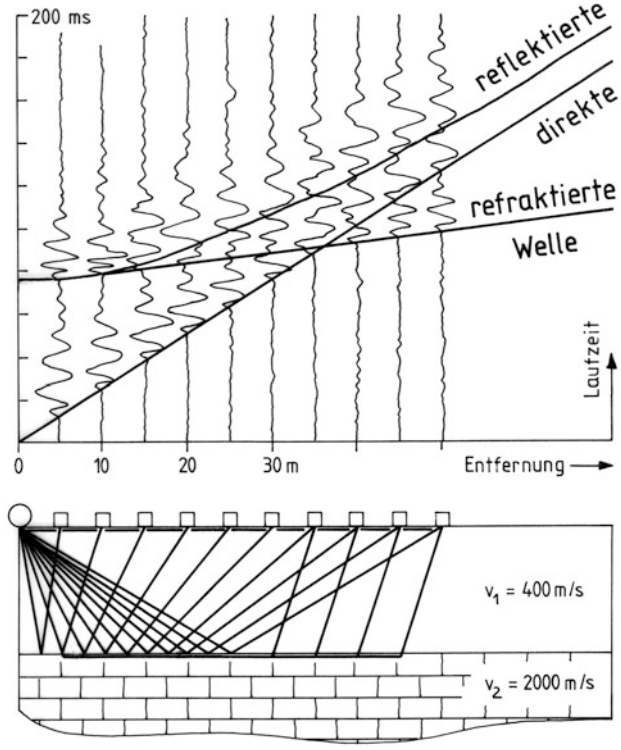


Abb. 3.73 Allereinfachste Laufwege (unten) und Laufzeitkurven (oben) seismischer Signale bei einem Zweischichtenfall und die darauf beruhende Unterscheidung von Refraktions- und Reflexionsseismik. Im Bereich kurzer Registrierentfernungen und Laufzeiten kommt es zu starker Überlagerung der Schwingungen, die eine Identifizierung der zugehörigen Laufwege schwierig machen kann. Insbesondere die direkte, an der Erdoberfläche gelaufene Welle (die nicht mit den Oberflächenwellen verwechselt werden darf; siehe weiter unten) trägt dazu bei. Ab einer bestimmten Entfernung kommt unmissverständlich die refraktierte Welle als erste am Geophon an

mit der Entwicklung der moderneren Seismik verlor dieses Handicap immer mehr an Bedeutung, und heute gelingt es routinemäßig, Reflexionsseismik auch für geringe Untersuchungstiefen zu praktizieren (Beispiel Abb. 3.82). Trotzdem hat die Refraktionsseismik nicht an Bedeutung verloren, da es ihr im Allgemeinen viel besser als mit der Reflexionsseismik gelingt, die Verteilung der seismischen Geschwindigkeiten als signifikanten Gesteinsparameter im Untergrund zu erfassen (Abb. 3.85).

Die generelle Unterscheidung über die unterschiedlichen Laufwege ist auch an ganz besondere Bedingungen der seismischen Geschwindigkeiten in den geologischen Schichtfolgen gebunden, was Abb. 3.75 in einfacher Form vermittelt.

Aus mehreren Gründen stellt die Seismik im Bereich der oberflächennahen Geophysik für hydrogeologische und hydraulische Zwecke eine wichtige Ergänzung zu der Geoelektrik dar. An erster Stelle wird das allgemein höhere Auflösungsvermögen genannt. Ferner

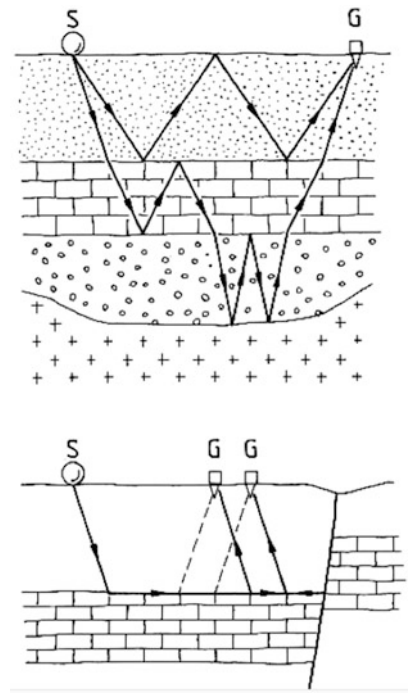


Abb. 3.74 Komplexere Laufwege seismischer Wellen: Multiple Reflexionen (oben) und an einer Verwerfung reflektierte Refraktion

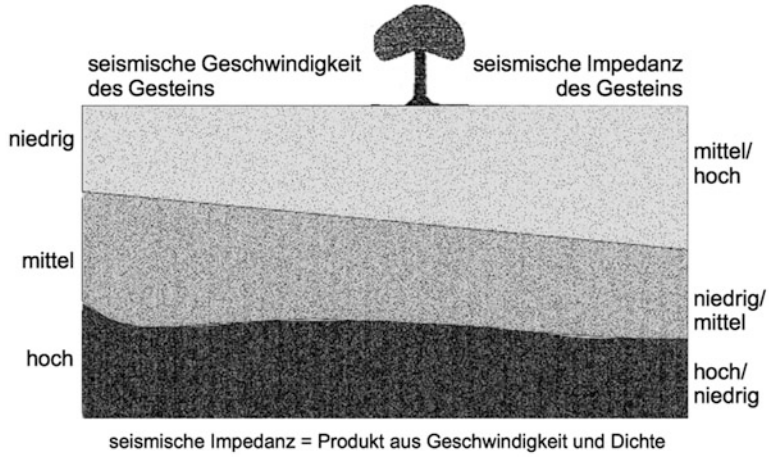


Abb. 3.75 Modell für seismische Refraktions- (links) und Reflexionsmessungen (rechts). Die Refraktionsmessung verlangt zunehmende Geschwindigkeit, während bei der Reflexionsseismik die Impedanzen beliebig niedrig, mittel oder hoch sein können

hat es die Geoelektrik in besiedelten, vor allem industrialisierten Regionen immer schwerer, von künstlichen elektrischen Leitern unbeeinflusst zu bleiben. Die Seismik ist von entsprechenden Störeffekten viel weniger betroffen. Eine verfeinerte Mess- und Auswertetechnik erlaubt zunehmend Analysen des lithofaziell bestimmten Geschwindigkeitsverhaltens sowie der lithofaziell bedingten Schwächung (Absorption) der seismischen Wellen. In diesem Zusammenhang ist der Begriff der seismischen Stratigraphie geprägt worden. Seismische Messungen in Bohrungen und – gemischt – Bohrloch-Oberflächen-Messungen gehen mit dieser Entwicklung einher.

Seismische Wellen werden auf sehr unterschiedliche Art und Weise im Gelände erzeugt. Stichwortartig sind es die Gesichtspunkte:

- Untersuchungstiefe,
- Ankopplung der Energie an den Boden,
- Unterdrückung bzw. Verstärkung bestimmter Wellenarten,
- Geländetauglichkeit,
- Schadenverursachung,
- Kosten,

die maßgeblich die Wahl der seismischen Quelle bestimmen. Vielfach wird noch zwischen Sprengstoff- und sprengstofflosen Verfahren unterschieden. Mit Sprengstoff, der gewöhnlich in Bohrungen gezündet wird, können sehr hohe Energiedichten freigesetzt und auf den Untergrund übertragen werden. Sprengstofflose Verfahren sind inzwischen die Regel, wobei die Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionen einen beachtlichen Erfindungsreichtum offenbart. Druckwellen von elektrischen Entladungen oder Gasexplosionen werden über Membranen auf den Boden übertragen, Stempel durch Pressluft oder mechanische Federn gegen die Erdoberfläche geschnellt oder die Schwingungen von Vibratoren dem Untergrund aufgeprägt (z. B. Vibroseis; vor allem für die Tiefenseismik). Der Luftpulser (*airgun*) findet bei Messungen auf See in großem Maße Verwendung, kann aber auch bei Landmessungen eingesetzt werden, wenn kleine Seen, Teiche oder wassergefüllte Bohrlöcher zur Verfügung stehen. Der seismische Impuls wird durch plötzlich ins Wasser freigesetzte hochkomprimierte Luft erzeugt. Zum Einsatz kommen Gewehre (*rifle*), aus denen Projektile gegen Platten im Boden geschossen werden, und einfache Zünder, die in kleinen Bohrlöchern zur Detonation gebracht werden. Eine vielfach benutzte, apparativ wenig aufwendige sprengstofflose Quelle ist das Fallgewicht, das bei Massen von einigen 100 kg (manchmal bis zu drei Tonnen) von einem Kfz-montierten Gerüst aus einer Höhe von 2–4 m freigesetzt wird (Abb. 3.76). Eine in der Ingenieurgeologie noch immer weitverbreitete seismische Quelle ist der Vorschlaghammer mit 4–5 kg Masse, der auf eine Aluminiumplatte geschlagen wird (Abb. 3.76). Ein sehr wichtiges Kriterium aller Quellen ist ihre seismische Effektivität, die die maximale Untersuchungsteufe mitbestimmt. Allen sprengstofflosen Quellen ist dabei gemeinsam, dass die Energieankopplung an den Untergrund viel schlechter ist als bei der Sprengung in abgeteuften, verdämmten Bohrlöchern. Starke Absorption in der häufig lockeren Verwitterungsschicht und merkliche Reflexion

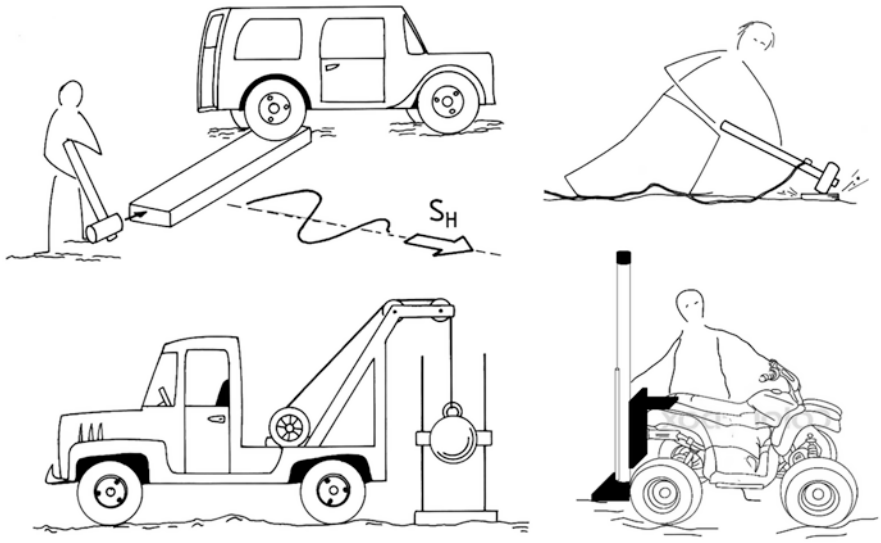


Abb. 3.76 Prinzip einfacher seismischer Signalerzeugung: Hammerschlag (horizontale Scherwellen- und vertikale Anregung), Fallgewicht, hydraulische Anregung

der seismischen Energie an ihrer Unterkante als Ursache sind vor allem zu nennen. Bis zu einem gewissen Grade kann dieser Nachteil durch die Möglichkeit kompensiert werden, die sprengstofflosen Quellen wiederholt in kurzen zeitlichen Abständen zu aktivieren und die am Empfangsort ankommenden Signale zu speichern und aufzuaddieren. Dieser Stapeln genannte Prozess (Abschn. 3.4.4, Abb. 3.42) ist übliche seismische Praxis und schließt beispielsweise eine 100-fache Fallgewichtsauslösung ein. Verbleibt man mit dem Stapeln in einem wirtschaftlichen Rahmen, so werden mit Fallgewichtsapparaturen Eindringtiefen von größenordnungsmäßig 100–200 m erreicht, mit der Hammerschlagseismik auch bei günstigen Umständen selten mehr als 30 m. Besondere Überlegungen verlangt die bevorzugte Erzeugung von Scherwellen. Sie entstehen gewöhnlich zusammen mit den Kompressionswellen, verstärkt aber dann, wenn bei der Anregung bewusst Unsymmetrien hergestellt werden (Abb. 3.76).

Eine besondere Klasse von seismischen Quellen stellen Vibratoren dar (Abb. 3.77), die dem Untergrund kontinuierliche Schwingungen aufprägen und, da der scharfe Einsatz der Anregung fehlt, besondere Überlegungen und Prozeduren zur Laufzeitmessung und Auswertung erfordern. Für mehr Einzelheiten wird vor allem auf das Stichwort *Vibroseis* verwiesen.

Mit einer ganz anderen Klasse seismischer Quellen muss jeder Seismiker notgedrungen leben: mit den Störwellen der seismischen Bodenunruhe (manchmal auch Mikroseismik genannt; englisch: *noise*). Wetter (Wind, Niederschläge), Industrie (laufende Maschinen) und Verkehr (Straßen- und Schienenfahrzeuge, Landmaschinen, Schallwellen von Flugzeugen und Hubschraubern) halten den Boden in einem permanenten

Abb. 3.77 Seismische Vibrator-Quelle (Elvis III) für Scherwellen- und vertikale Anregung. (Foto G. Druivenga GEOSYM GmbH)

Schwingungszustand. Ein wichtiger Komplex aller seismischen Messungen ist, den Einfluss dieser Störsignale klein und die sogenannte Nutzenergie groß zu machen (Abschn. 3.4.4).

Die Seismographen der Erdbebenkunde haben ihr Äquivalent in den Geophonen oder Aufnehmern der angewandten Seismik. Es handelt sich um grob faustgroße, mit Dorn oder Dreifuß versehene kräftige Metallgehäuse (Abb. 3.78), die das elektrodynamische Messsystem enthalten. Je nach ihrer Konstruktion können Geophone für sehr unterschiedliche Frequenzbereiche besonders empfindlich sein, und die Bedeutung der Auswahl geeigneter Aufnehmer für bestimmte Aufgabenstellungen ist nicht zu unterschätzen. Moderne Messsysteme setzen mittlerweile bewegliche, bis zu rund 100 m lange Geophonketten ein, die bei geeignetem Untergrund, der einen guten Kontakt zum Boden ermöglicht (versiegelte Böden, gefrorener und verschneiter Untergrund), von einem Fahrzeug gezogen werden können.

Abb. 3.78 Etwa faustgroßer seismischer Aufnehmer: Geophon

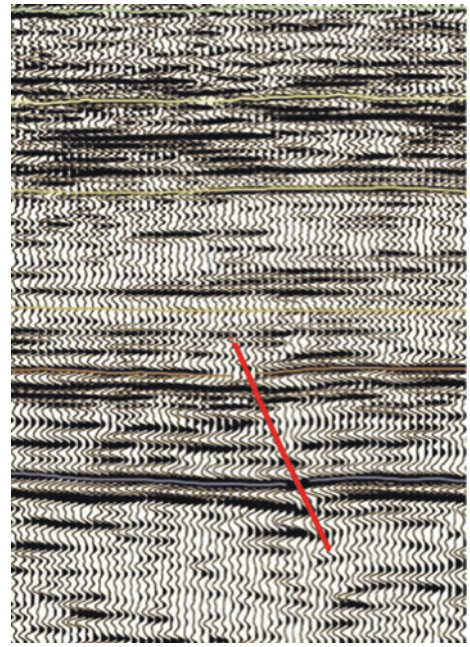


Abb. 3.79 Ausschnitt aus einem Reflexionsseismogramm mit Schichtgrenzen und interpretierter Verwerfung

Die Weiterverarbeitung der Wechselspannungen am Ausgang der Geophone erfolgt in Apparaturen sehr unterschiedlicher Arbeitsweise und Konstruktion. Entsprechend sind einfache tragbare Koffergeräte bis hin zu sehr aufwendigen, in einem Messwagen installierte Anlagen auf dem Markt. Am Ende der Erzeugung und Registrierung seismischer Wellen steht dann das Ergebnis der Zusammenstellung der einzelnen Geophonspuren in einer Seismogramm-Montage als Basis weiterer Auswertung und Interpretation (Abb. 3.79).

Refraktionsseismik

In ihrer einfachsten Form versucht die Refraktionsseismik, die Mächtigkeiten und Geschwindigkeiten für einen geschichteten Untergrund zu bestimmen (Abb. 3.73). Statt der Mächtigkeiten können auch die Tiefenlagen der Refraktoren angegeben werden. Refraktoren sind nur solche Grenzflächen, an denen die seismischen Wellen auf Material höherer Geschwindigkeit treffen (Abb. 3.75). Nur hier bildet sich die refraktierte Welle, die Energie nach oben zum Geophon führt (Abb. 3.73). Andere Horizonte bleiben unerkannt. Das gilt in der Regel auch für Refraktoren unterhalb einer Schicht mit hoher Geschwindigkeit, die dann die maximale Untersuchungsteufe festlegt. Der Anwendung der Refraktionsseismik kommt entgegen, dass mit wachsender Teufe die Geschwindigkeiten im Großen und Ganzen zunehmen. Anders als bei der geoelektrischen Widerstands-Tiefensondierung (Abschn. 3.6.1) geht man bei der Seismik aber von vornherein davon aus, dass die Schichtflächen beliebig einfallen oder gekrümmt sein können, und man geht auch davon aus, das signifikante laterale Geschwindigkeitsänderungen möglich sind.

Refraktionsseismische Messungen werden ganz allgemein auf Profilstrecken durchgeführt. Im günstigsten Fall ist das Schichtstreichen bekannt und das Profil im Fallen orientiert. Andernfalls erhält man zunächst scheinbare Einfallswinkel und „Teufen“ in einer Ebene, die vom seismischen Profil und der Normalen auf den Refraktor aufgespannt wird. Seine eindeutige räumliche Lage legt ein zweites – am einfachsten orthogonal geführtes – Profil fest. Für sehr detaillierte Untersuchungen kann eine Vergitterung von Profilen notwendig werden.

Die maximale Geophonauslage hängt von der Teufe der Refraktoren, aber auch von den Geschwindigkeitskontrasten ab. Geringe Unterschiede – dem Autofahrer ist es vom Überholvorgang geläufig – führen zu langen Überholstrecken, bis der Knickpunkte der Ablösung der refraktierten von der direkten Welle erreicht ist (Abb. 3.73, 3.80). Eine ganz grobe Abschätzung für den Horizontalschichtfall sagt, dass 3 ein vernünftiger Multiplikator ist, um von der Refraktortiefe die zu erwartende Knickpunktentfernung abzuleiten.

Die Auswertung orientiert sich an den gemessenen Laufzeitkurven primär über die Markierung der Ersteinsätze (Abb. 3.80, oben). Die seismischen Geschwindigkeiten v stecken in der Steigung der Laufzeitäste nach v = Weg/Zeit, wie es in Abb. 3.80 mit dem schwarzen Dreieck markiert ist, und die Knickpunktentfernung, in der die refraktierte Welle mit der höheren Geschwindigkeit die direkte Welle überholt, kann bezüglich der Schichtmächtigkeit ausgewertet werden. Ein einfaches Beispiel konventioneller

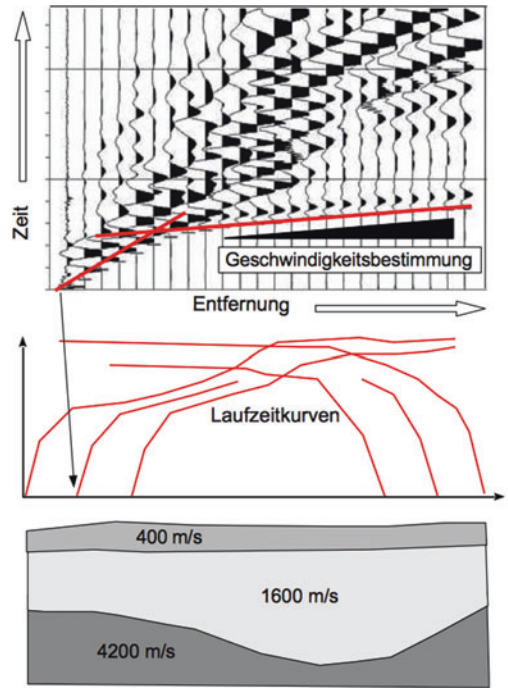


Abb. 3.80 Grundlage der Auswertung seismischer Refraktionsmessungen. Oben: Seismogramm mit markierten Laufzeitästen für einen einfachen Zweischichtenfall. Unten: Komplexere Lagerungsverhältnisse verlangen auch komplexere Aufstellungen im Gelände und aufwendige Auswerteprozeduren (schematisch)

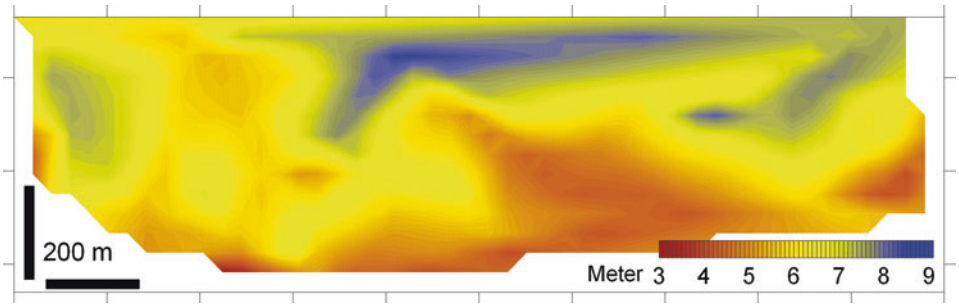


Abb. 3.81 Ergebnis einfacher refraktionsseismischer Messungen (Hammerschlagseismik) mit „Schuss“ und „Gegenschuss“ auf einzelnen kurzen Profilstrecken: Mächtigkeit sandig-kiesiger Talsedimente über Muschelkalk-Festgestein

Refraktionsseismik zeigt Abb. 3.81. Im Allgemeinen ist die Auswertung komplizierter, wenn mehrere Schichten und dazu noch mit unregelmäßigen Verläufen auftreten (Abb. 3.80, unten). Dann muss bereits bei der Aufstellung im Gelände dafür gesorgt werden, dass für „Schuss“ und „Gegenschuss“ (Namen, die sich noch auf die ältere Sprengseismik beziehen) die Struktur mit Geophonen überdeckt wird. Diese Überdeckung mit eng platzierten „Schüssen“ und Geophonen kann nahezu beliebig weit getrieben werden, wobei die Laufzeitkurven in Abb. 3.80 (unten) dann mehr oder weniger das ganze Diagramm füllen können. Eine dann im Rahmen einer *refraktionsseismischen Tomographie* erfolgte Auswertung kann dann zu sehr detaillierten Bildern der Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund führen (Abb. 3.85).

Für die Auswertung auch komplexer refraktionsseismischer Messungen existieren einleuchtenderweise verschiedene Computerprogramme, die aber grundsätzliche Probleme nicht aus der Welt schaffen. Schichten geringer Geschwindigkeit (*low-velocity layer*) betreffen den Fall, dass die seismischen Geschwindigkeiten nicht immer mit der Tiefe zunehmen. An Grenzflächen mit abnehmender Geschwindigkeit entsteht nach den Brechungsgesetzen keine refraktierte Welle. Solche Schichten bleiben unerkannt. Als weitere Konsequenz wird die Teufe darunterliegender Refraktoren falsch berechnet, wobei der Fehler beträchtlich sein kann; ein Weg, ihn refraktionsseismisch zu vermeiden, existiert nicht. In der Praxis ist der Fall gar nicht so selten, und der Seismiker ist auch in scheinbaren Standardsituationen vor Überraschungen nicht gefeit. Zementierte quartäre “Locker"gesteine“ (z. B. betonartig verbackene Konglomerate im Alpenvorland, Nagelfluh) können ohne weiteres sehr viel höhere Geschwindigkeiten als locker gebundene “Fest"gesteine“ im Liegenden haben. Auch bei einer Geophonauslage auf befestigten Wegstrecken ist dieser Effekt in Erinnerung zu behalten: Durch die Bodenverdichtung und Fremdmaterial kann die liegende Schicht zum *low-velocity layer* werden. Eine aufschlagnahe, kurze Geophonstrecke abseits des Weges gibt rasch Aufschluss und kann gegebenenfalls Korrekturen veranlassen.

Schichten geringer Mächtigkeit (die „überschossene“ Schicht; *blind zone, hidden layer*) bereiten ähnlich wie bei der geoelektrischen Tiefensondierung (Abschn. 3.6.1) Probleme.

Die Refraktionseinsätze existieren im Gegensatz zum vorhergehenden Fall, nur treten sie im Seismogramm nicht als Ersteinsätze, sondern erst etwas später auf. Statt eines Dreischichtenfalls „sehen“ die Ersteinsätze nur einen Zweischichtfall, und der Auswerter berechnet eine falsche Lösung. Aber der Fall liegt insgesamt günstiger als zuvor: Die zugehörigen Einsätze existieren im Seismogramm, und man kann versuchen, sie als spätere Einsätze sichtbar zu machen. Das ist nicht einfach, da Überlagerungen mit anderen korrelierbaren Einsätzen von Scherwellen und reflektierten Wellen zu erwarten sind.

Die Effekte der blinden Zone und ganz besonders der Schichten niedriger Geschwindigkeit machen deutlich, dass die Refraktionsseismik unter ähnlichen Einschränkungen wie die Tiefensondierung der Geoelektrik zu leiden hat. In einem unbekannten Gebiet können nicht unbedingt genaue Teufenangaben erwartet werden. Das gilt besonders für einfache Profilstrecken mit einfacher Signalanregung – ein Verfahren, das bei Flachgrundmessungen noch viel praktiziert wird (Abb. 3.81). Kontinuierliches Profilieren mit einer Vergitterung der Messstrecken ist grundsätzlich anzuraten und erlaubt bei einiger seismischer Erfahrung häufig erstaunlich detaillierte Angaben. Werden zusätzlich die Erfahrungen und Kenntnisse beim geologischen Kartieren, Daten aus benachbarten Bohrungen und von ergänzenden geophysikalischen Messungen (z. B. Geoelektrik, Gravimetrie) in die Auswertung und Interpretation einbezogen, bestätigt eine nachfolgende, gezielt niedergebrachte Bohrung nicht selten recht präzise die seismische Voraussage.

Reflexionsseismik

Die Reflexionsseismik ist sicherlich das eindrucksvollste Werkzeug in der Geophysik. Das Auflösungsvermögen für komplizierte Strukturen auch in großer Teufe wird von keiner anderen Methode auch nur annähernd erreicht. Ohne jede Diskussion werden alle Tiefbohrungen der Kohlenwasserstoff-Exploration und der Tiefen Geothermie erst nach ausgiebigen reflexionsseismischen Untersuchungen niedergebracht. Auch in tektonisch komplizierten Gebieten der Steinkohleförderung aus der Tiefe ist die Reflexionsseismik zu einem wertvollen Helfer geworden. Nur bei flachgründigen Untersuchungen hat sie aus Gründen, die zuvor aufgezeigt wurden, erst in jüngerer Zeit zur Refraktionsseismik aufgeholt. Und hier ist Reflexionsseismik im Allgemeinen nur praktizierbar mit einem aufwendigen Instrumentarium, komplizierter Messaufstellung sowie einer ausgefeilten Auswertemethodik unter routinemäßigem Einsatz der Digitaltechnik. Bei günstigen Bedingungen gelingt es inzwischen damit, Reflexionen aus dem Teufenbereich der Größenordnung 10 m zu nutzen, und es bleibt festzustellen, dass die Reflexionsseismik auch bei flachgründigen Untersuchungen kommerzieller Alltag geworden ist (Abb. 3.82).

Mit Blick auf Abb. 3.75 wird deutlich, dass die Reflexionsseismik nicht der Einschränkung der Refraktionsseismik mit Geschwindigkeitszunahme unterliegt. Reflexionen gibt es auch bei Geschwindigkeitsabnahme an der Grenzfläche, wobei außer der seismischen Geschwindigkeit auch die Dichteänderung eine Rolle spielt. Das Produkt heißt akustische Impedanz und definiert einen Reflexionskoeffizienten als das Verhältnis der Amplituden von reflektierter und einfallender Welle. Reflexionen gibt es immer dann, wenn sich die Impedanz an der Schichtgrenze ändert, d. h. auch bei Dichteänderungen und

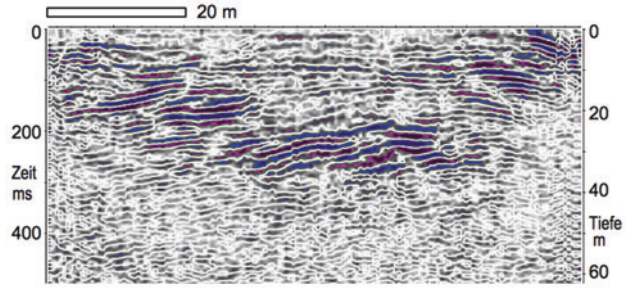


Abb. 3.82 Seismogramm mit Reflexionen aus geringerer Tiefe. Mit Geschwindigkeitsinformationen gelingt die Migration der Zeitsektion (Maßstab links) in eine Tiefensektion (Maßstab rechts). (Quelle: Geotomographie GmbH)

gleichbleibender Geschwindigkeit. Der Reflexionskoeffizient macht klar, dass beim Einfall einer seismischen Welle je nach Impedanzkontrast nur ein mehr oder weniger großer Teil der Energie reflektiert wird, der andere Teil weiter nach unten wandert und für Reflexionen an tieferen Horizonten zur Verfügung steht. Das macht die Reflexionsseismik mit der zeitlichen Abfolge der Reflektoren im Seismogramm so anschaulich (Abb. 3.82, 3.83).

Praktische Reflexionsseismik wird vom Wunsch nach einer kontinuierlichen Verfolgung der Reflexionshorizonte und dem Bestreben nach einem hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis (englisch: *signal-to-noise ratio;* Abschn. 3.4.4) beherrscht. Letzteres heißt:

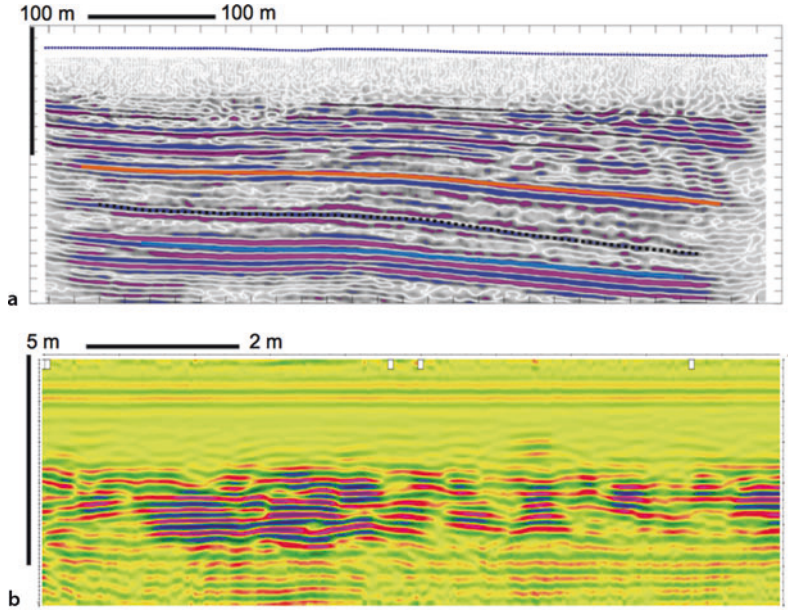


Abb. 3.83 **a** Reflexionsseismogramm von einem wohlgeschichteten, ungestörten Untergrund mit drei markierten stratigraphischen Bezugshorizonten (Quelle: Geofact GmbH). **b** ein Radargramm (s. Abschn. 3.6.3), das gerade einmal 6 m Tiefe überdeckt und dabei die prinzipiell starke Ähnlichkeit der beiden Laufzeitverfahren deutlich macht (Quelle: J. Poßekel)

Verstärkung und optimale Sichtbarmachung der Reflexionseinsätze – Unterdrückung aller anderen Einsätze und der seismischen Bodenunruhe. Der Aufwand dafür kann für den Laien eine unvorstellbare Größe erreichen. Stichworte sind „multiples Schießen“, „Geophon-Arrays“ und „Mehrfachüberdeckung (horizontales Stapeln) “. Bei flachgründigen Untersuchungen ist mitunter schnell der Punkt erreicht, wo das alleinige Bohren auf dem Reflexionsprofil kostengünstiger ist – sofern es nicht auf zerstörungsfreie Untersuchungen ankommt. Das heute in der Reflexionsseismik „Machbare“ ist für Aufgabenstellungen im Bereich der oberflächennahen Geophysik (und Geothermie!) selten einmal in Betracht zu ziehen.

Weitaus kritischer als bei der Ersteinsatz-Refraktionsseismik sind bei allen reflexionsseismischen Messungen Störschwingungen der unterschiedlichsten Art, die sich im Seismogramm zu korrelierbaren Einsätzen zusammenfügen und echte Reflexionen vortäuschen können. Mechanische (Maschinen, Flugzeuge) und elektrische (50-Hz-Versorgungsleitungen) Störungen kommen gleichermaßen in Betracht, wenngleich vorgeschaltete Filter in den Registrierapparaturen vielfach Abhilfe schaffen. Eine besondere Störquelle kann der an den Boden gekoppelte Luftschall sein, der bei der Signalerzeugung entsteht und direkt oder über Echos die Geophone anregt. Bei ungünstig, vor allem zu groß gewählten Geophonabständen kommt es mitunter zu einem örtlichen Aliasing. Ganz allgemein versteht man darunter das Entstehen von Scheinschwingungen bzw. Scheinanomalien durch zu große Messpunktabstände, wenn z. B. die Wellenlänge des Luftschalls mit dem Geophonabstand korrespondiert und ein kohärentes Signal im Seismogramm entsteht.

Planung und Durchführung reflexionsseismischer Messungen – insbesondere bei flachgründigen Untersuchungen in der Hydrogeologie, im Bereich der Umwelt- und Ingenieurgeologie – verlangen viel Erfahrung und bei fast allen neuen Problemstellungen ein ausgiebiges Versuchsprogramm. Erfolg oder Misserfolg hängen meist weniger von den geologischen Bedingungen als von der Wahl geeigneter Registrierparameter (Apparatur, Einstellung der Apparatur, Art der Anregung und Art der Geophone) ab.

Die Beschränkung auf einige wesentliche Merkmale der Auswertung wird hier beibehalten und darüber hinaus auf die einschlägige Literatur verwiesen. Den Großteil der Auswertung, weitgehend automatisiert, erledigt heute der Rechner, wobei kommerziell vertriebene, sehr komfortable Programme auf üblichen Computern laufen. Die Hand (und der Verstand) des Auswerters sind vor allem noch in zwei Bereichen gefragt: bei der Identifizierung und dem Anreißen von Reflexionen und der Beurteilung der Signifikanz von Korrelationen sowie bei der Festlegung struktureller Merkmale in den Seismogrammen wie Verwerfungen oder Faltenachsen. Als vorbereitende Maßnahmen werden Korrekturen an den Seismogramm-Spuren wie statische und dynamische Korrektur angebracht, wobei Letztere die Möglichkeit der Geschwindigkeitsbestimmung zulässt. Um die Lesbarkeit von Seismogrammen weiter zu steigern, werden variantenreiche Methoden der Filterung (siehe Abschn. 3.5.1) eingesetzt. Damit lassen sich bestimmte Merkmale im Frequenzspektrum der Seismogramme unterdrücken oder verstärken. Durch die Dekonvolution

(eine Art Umkehrung eines Filterprozesses) wird angestrebt, das Nachschwingen von Einsätzen zu reduzieren, um die seismischen Einsätze zeitlich schärfer hervortreten zu lassen. Vielfach stören Beugungsmuster (Diffraktionen), die der Prozess der Migration beseitigen hilft. Störend sind vor allem auch multiple Reflexionen als Folge des Hin- und Herpendelns der seismischen Signale zwischen Horizonten mit stärkeren Impedanzkontrasten und der Erdoberfläche (siehe Abb. 3.74), die erkannt und von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden müssen.

Das Anreißen (= Markieren) und Verfolgen von korrelierbaren Reflexionen in der Seismogramm-Sektion erfolgt am besten mit verschiedenen Farben. In diesem Stadium können bereits strukturelle Merkmale wie z. B. Verwerfungen mit Einfallsrichtung und Bewegungssinn markiert werden. Im Idealfall kennt man die Geschwindigkeitsverteilung, mit der das Zeitprofil in ein teufen- und lagegerechtes Seismogrammprofil umgerechnet wird (Abb. 3.82). Nicht zu verhindern ist, dass bei einzelnen Reflexionsprofilen einer 2D-Seismik noch – zum Teil erhebliche – Verzerrungen enthalten sind, da seitlich gelegene Reflexionselemente vertikal unter den Geophonen abgebildet werden. Bei seismischen Messungen der Tiefengeophysik (Kohlenwasserstoff-Exploration, Tiefe Geothermie), bei der es auf eine höchst präzise Lagebestimmung struktureller Elemente ankommt, kann man dieser Schwäche nur mit einer sehr aufwendigen und kostspieligen 3D-Seismik und einer engen Vergitterung von Reflexionsprofilen begegnen.

Werden schließlich noch farbige Abspielungen mit Frequenz- und Amplitudeninformationen gewählt, so ist kaum noch zu vermuten, dass die Seismogramm-Sektion weiterhin aus vielen parallelen Spuren mit einem von den Geophonen gelieferten Schwingungsbild besteht (Abb. 3.83).

Die Auswertung seismischer Messungen und die profilmäßige Darstellung der Ergebnisse (z. B. Abb. 3.83) führen zu Belangen der Stratigraphie. Da Reflexionen zunächst rein physikalisch bedingt sind, ist nicht unbedingt zu erwarten, dass seismische Horizonte stratigraphisch benennbar sind. Häufig sieht man im Reflexionsprofil eine Abfolge besonders kompetenter Bänke innerhalb einer stratigraphischen Einheit. Für das Ansetzen einer Bohrung kann es dann bereits hilfreich sein, wenn dieser seismostratigraphische Horizont Verwerfungen oder das Tiefste einer Mulde anzeigt. Eine Einordnung in eine geläufige stratigraphische Abfolge und Nomenklatur kann in einem unbekannten Gebiet aber allein eine Bohrung bringen, in der sinnvollerweise ein seismisches Geschwindigkeitslog gefahren wird oder ein vertikales seismisches Profilieren (VSP; siehe weiter unten) erfolgt. Darüber hinaus ist der Begriff der Stratigraphie in der Seismik zum Begriff der seismischen Stratigraphie (ursprünglich englisch: *seismic stratigraphy*) erweitert worden. Man versteht darunter die Analyse und Darstellung der in den Seismogrammen enthaltenen Geschwindigkeits-, Amplituden- und Frequenzinformationen mit dem Ziel der Ansprache der Fazies und ihrer vertikalen und horizontalen Veränderung. Es kommen die in Abschn. 3.5.2 mitgeteilten Zusammenhänge zum Tragen, die auch in den Bereichen oberflächennahe Geophysik (Geothermie), Hydrogeologie/Umweltgeologie immer bedeutsamer werden.

Seismische Spezialverfahren – seismische Tomographie

Seismische Tomographie ist ein etwas unscharfer Begriff, da er sehr unterschiedliche Vorgehensweisen einbezieht. Grundsätzlich geht es um die Ermittlung einer 2D- oder 3D-Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund, die dann strukturell, lithofaziell oder bodenmechanisch zu interpretieren ist.

Oberflächenwellen-Seismik und Scherwellen-Seismik

Seismische Oberflächenwellen (z. B. Rayleigh-Wellen, Love-Wellen) breiten sich, wie der Name nahelegt, an der Erdoberfläche aus und sind wegen ihrer großen Amplituden ein unerwünschter Störfaktor in der „normalen" Reflexions- und Refraktionsseismik mit ihrer Raumwellen-Ausbreitung von Longitudinal- und Transversal-(Scher-)Wellen. Aber genau diese Oberflächenwellen-Ausbreitung wird genutzt, um die Verteilung der Scherwellen-Geschwindigkeit des Untergrundes zu ermitteln, da die Geschwindigkeit der Oberflächenwellen im Wesentlichen von der Scherwellen-Geschwindigkeit des Gesteins bestimmt wird. Das gilt vor allem für einen Tiefenbereich von einem Viertel der Wellenlänge, wobei die Oberflächenwellen eine sogenannte normale Dispersion zeigen. Das bedeutet, dass – anders als bei den Raumwellen – ihre Geschwindigkeit in (positiver) Korrelation von der Wellenlänge abhängt. Eine Analyse der Dispersion bei einer im Prinzip gewöhnlichen Seismik mit Signalerzeugung und -registrierung mit Geophonen erlaubt es dann, die Scherwellengeschwindigkeit als Funktion der Tiefe in einer Art Tomographie zu ermitteln, darzustellen und zu interpretieren (Abb. 3.84).

Im Prinzip ist die Methode seit über 40 Jahren gängige Praxis in der größerräumigen Untersuchung der Erdkruste und erst in jüngerer Zeit für die oberflächennahe Geophysik praktikabel geworden (Socco et al. 2010). Hintergrund ist vor allem die gerade im oberflächennahen Bereich wichtige Scherwellen-Geschwindigkeit in ihrer Bedeutung für bodenmechanische Kennziffern (Schermodul) und auch für die Hydrogeologie, da sich wassergefüllter Porenraum und Wassersättigung, aber auch das Gesteinsgefüge über die Elastizitätskonstanten stark auf das Geschwindigkeitsverhalten von Scherwellen und vor allem auf das Geschwindigkeitsverhältnis V_P/V_S auswirken. Von Interesse und zusätzlich

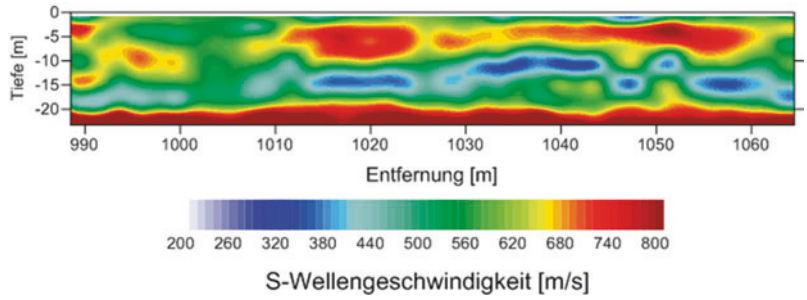


Abb. 3.84 Oberflächenwellen-Seismik: Scherwellen-Tomogramm über Kalkstein mit einer stark entfestigten Zone niedriger Geschwindigkeit zwischen 10 und 20 m Tiefe. (Quelle: Geotomographie GmbH)

anzumerken ist, dass auch die Oberflächenwellen der sonst allgemein als seismischer „Lärm“ (*seismic noise*) betrachteten Signalquellen wie Verkehrs- und Maschinenlärm oder meteorologischen Effekten sehr erfolgreich für dasselbe Konzept der Scherwellen-Geschwindigkeitstomographie genutzt werden und Untersuchungstiefen bis zu 100 m erreicht werden können (z. B. Louie 2001).

Refraktionsseismische Tomographie

Die refraktionsseismische Tomographie übernimmt das Ersteinsatz-Konzept der normalen Refraktionsseismik (siehe Abb. 3.80), wobei Signalerzeugung und Geophon-Empfänger in einer sehr engen Überdeckung der zu erkundenden Strukturen platziert werden. Eine Inversion der Ersteinsatz-Laufzeiten in eine Geschwindigkeitsverteilung resultiert dann in Bildern, wie es Abb. 3.85 beispielhaft zeigt.

Crosshole Tomographie

Stehen Bohrlöcher zur Verfügung oder werden sie gezielt abgeteuft, dann ist man mit einer Bohrloch-zu-Bohrloch-Tomographie (*crosshole*) dem zu erkundenden Gesteinsuntergrund auch für größere Tiefen viel näher, mit entsprechend höherer Auflösung (Abb. 3.86).

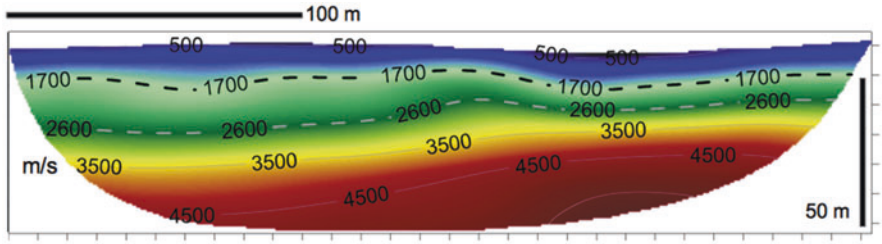


Abb. 3.85 Refraktionsseismische Tomographie: Lockergestein und Übergang zu verwittertem Festgestein etwa im Bereich der 1700-m/s-Geschwindigkeitslinie. (Bildquelle: Terrana Geophysik/Geotomographie GmbH)

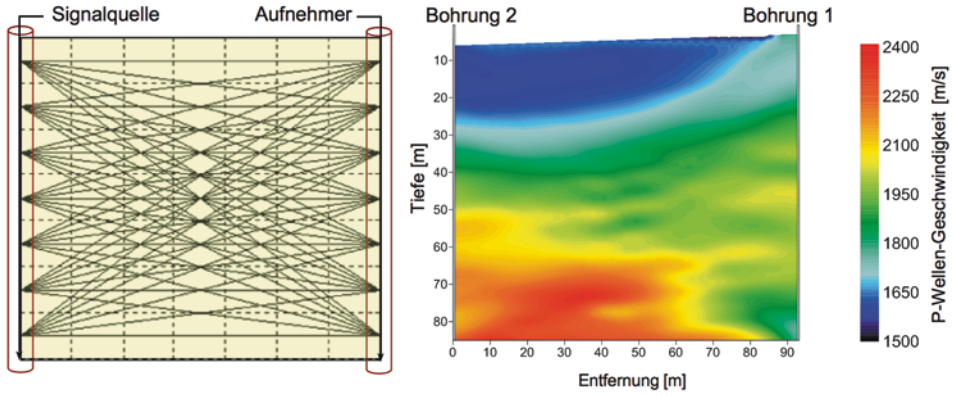


Abb. 3.86 Seismische Tomographie Bohrloch-zu-Bohrloch (crosshole). (Bildquelle (rechts): Geotomographie GmbH)

VSP

Eine Mischung aus seismischer Bohrloch-Tomographie und Geländemessung ist das vertikale seismische Profilieren (*vertical seismic profiling*, VSP), das im Allgemeinen als Ergänzung zur tiefen Reflexionsseismik und in variabler Technik praktiziert wird. Meist wird eine Kette von Aufnehmern in das Bohrloch gehängt, während die Signalquelle, in der Regel ein Vibroseis-Truck, auf von der Bohrung weglaufenden Profilen anregt. Es kann aber auch umgekehrt eine Signalquelle im Bohrloch geführt und Geophone an der Oberfläche platziert werden. Bei dichterer Überdeckung mit Bohrungen und Oberflächen-Auslagen kann auch eine echte Tomographie mit einem 3D-Strukturbild resultieren. Für die tiefe Geothermie haben Brenner und Rübel (2014) ausführlicher zum VSP geschrieben.

3.6.3 Bodenradar

Bodenradar, Georadar, gelegentlich auch elektromagnetisches Reflexionsverfahren (EMR) genannt, nutzt sehr kurzwellige elektromagnetische Wellen zur Ortung und Abtastung von Objekten, die die Wellen reflektieren. Bekannt ist Radar aus der Schifffahrt, aus der Meteorologie (Wolkenbeobachtung) und der Fernerkundung von Planetenoberflächen, die Erde eingeschlossen. Im Rahmen der angewandten Geophysik ist das Bodenradar (*ground penetrating radar*, GPR) ein Verfahren, das sehr enge Verwandtschaft zur Seismik zeigt. Vieles aus dem vorhergehenden Abschnitt kann unmittelbar übertragen werden.

Wie in der Seismik elastische Wellen werden beim Bodenradar elektromagnetische Wellen über Antennen in den Untergrund geschickt. Vom Sender breiten sie sich mit gesteinsspezifischen Geschwindigkeiten aus, werden an Diskontinuitäten reflektiert und können zu einer Empfänger-Antenne gelangen (Abb. 3.87). Wie in der Seismik werden die Laufzeiten zwischen Sendung und Empfang gemessen; kennt man die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, können Wegstrecken ermittelt werden. In Luft breiten sich Radarwellen mit nahezu der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit von $c \sim 300000\,\mathrm{km/s} = 0{,}3\,\mathrm{m/ns}$ (ns = Nanosekunde = 10^{-9} s) aus. Im Gestein reduziert sich die Geschwindigkeit v gemäß der dort geltenden relativen Dielektrizitätszahl; einige Zahlen bringt Abschn. 3.5.3, wo bereits auf den starken Einfluss des Wassers hingewiesen wurde, der für alle Bodenradarmessungen grundlegend ist. Ebenso wichtig bei Radarmessungen ist die Schwächung der von der Antenne abgestrahlten Energie durch Ankopplung an den Boden und durch Absorption in den Gesteinen. Während die Ankopplung vordringlich von technischen Gegebenheiten bestimmt wird, ist die Absorption, von der die Untersuchungstiefe abhängt, vor allem materialbedingt. In nichtmagnetischen Gesteinen kontrolliert insbesondere die elektrische Leitfähigkeit (bzw. der spezifische Widerstand) die Reichweite der Radarwellen. Über den wichtigen Einfluss der abgestrahlten Signalfrequenz bezüglich Eindringtiefe und Auflösungsvermögen steht einiges in Abschn. 3.4.2 und 3.4.3.

Moderne Radarapparaturen (Abb. 3.88) bestehen aus den Antennen, einer Kontrolleinheit mit Sender- und Empfängerelektronik sowie einer Wiedergabeeinheit mit Bildschirm und Drucker. Gewöhnlich sind sie unmittelbar an die Betriebssysteme von Computern

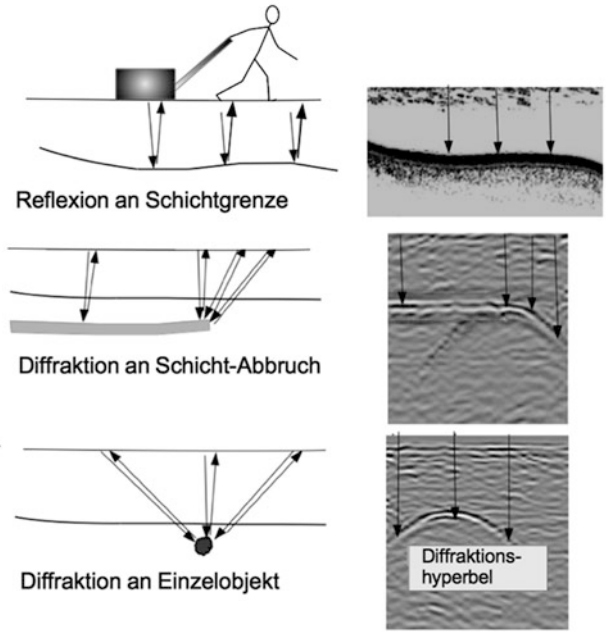


Abb. 3.87 Modelle für Bodenradar-Anwendungen mit charakteristischen Radargrammen

angepasst. Die Antennen sind oft in schlitten- oder handwagenähnlichen Behältern untergebracht, die entlang von Messprofillinien, vorzugsweise senkrecht zu einem vorgegebenen Streichen, gezogen oder gefahren werden. Messgeschwindigkeiten bewegen sich grob zwischen einigen Dezimetern und einigen Metern in der Sekunde; aber auch punktförmiges Messen ist gebräuchlich. Sende- und Empfangsantenne können in einer Einheit identisch sein (monostatisches System) oder in zwei Einheiten räumlich getrennt werden (bistatisches System). Das gilt auch für Bohrlochantennen, die ihrerseits mit Oberflächenantennen kombiniert werden können. Im Bereich geologischer Anwendungen werden Antennen für eher niedrigere Frequenzen (20–400 MHz) eingesetzt, was nach einer sehr groben Faustformel Untersuchungstiefen von 2–30 m bei einer räumlichen Auflösung von jeweils ganz grob 10–20 % dieser Tiefen erlaubt. Mit neueren Hochleistungsapparaturen

Abb. 3.88 Georadar-Messungen mit bistatischer 25-MHz-Antenne für große Eindringtiefen und monostatischer 200-MHz-Antenne. In freiem Gelände kann bei kontinuierlicher Messung ein enormes Messpensum abgearbeitet werden. (Foto links: Georadar RTG Tengler)

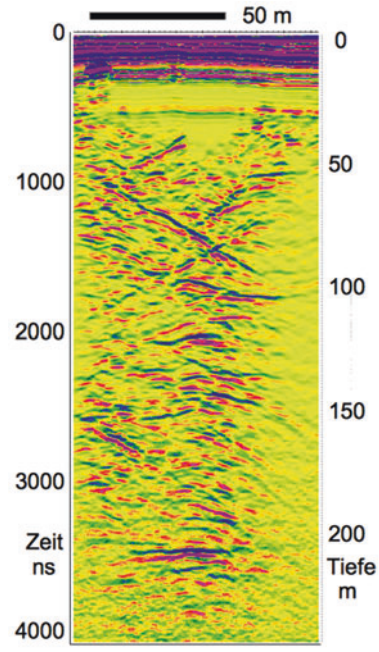


Abb. 3.89 Radargramm-Ausschnitt: Große Eindringtiefen mit Hochleistungsradar bei 25 MHz. Reelle Reflexionen aus 200 m Tiefe sind nur im elektrisch schlecht leitenden Kalksteingebirge möglich. (Bildquelle: Georadar RTG Tengler)

(Abb. 3.88, links) werden aber mittlerweile auch noch deutlich größere Untersuchungstiefen erzielt (Abb. 3.89; siehe auch Abb. 3.124), was in manchen Bereichen zu einer interessanten Konkurrenz zur Seismik werden kann. Häufig ist es sinnvoll, bei einer Aufgabe mit Antennen unterschiedlicher Frequenzen zu arbeiten und Profile nacheinander abzugehen oder abzufahren, um die jeweiligen Vorzüge bezüglich Eindringtiefe und Auflösungsvermögen bei der Auswertung und Interpretation zu kombinieren.

Probleme können Radarmessungen in der Nähe von Radiosendern oder ausgedehnten Metallkonstruktionen bekommen.

Radargramme unterscheiden sich nicht wesentlich von Seismogrammen (Abb. 3.83), und ohne Beschriftung (stark unterschiedliche Laufzeiten!) sind sie nicht unbedingt auseinanderzuhalten. Vielfach sind es ausgeprägte Beugungsbilder (Diffraktionen) von Reflexionen an punkt- oder linienförmigen Objekten (Abb. 3.87), die ein Radargramm charakterisieren. Sie stellen ein wichtiges Hilfsmittel zur Geschwindigkeitsermittlung dar.

Die weitere Auswertung von Radargrammen, Überführung von Zeitsektionen in Tiefensektionen, Tiefenschnitte (Abb. 3.90), Filterverfahren, erfolgt ganz entsprechend dem Vorgehen bei der Reflexionsseismik (Abschn. 3.6.2), und vielfach können dieselben Programme der Datenverarbeitung übernommen werden.

3.6.4 Gravimetrie

Die Gravimetrie gehört zu den klassischen Verfahren der angewandten Geophysik, und sie war bereits in den ersten Dekaden des letzten Jahrhunderts – damals noch in Form

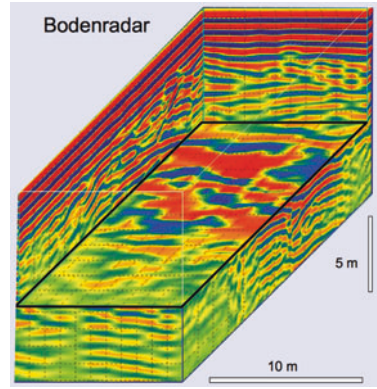


Abb. 3.90 Wie in der 3D-Reflexionsseismik lassen sich auch beim Georadar aus einer engen Vergitterung von Messprofilen räumliche Darstellungen mit speziell ausgewählten Tiefenschnitten konstruieren. (Bildquelle Georadar RTG Tengler)

der Drehwaagemessungen – sehr erfolgreich beim Aufsuchen von Salzstöcken als Träger von Erdöllagerstätten. Sie hat später nie die Popularität der seismischen und geoelektrischen Verfahren, auch nicht der Geomagnetik, erreicht, was in der praktischen Anwendung sicherlich damit zusammenhängt, dass die Messungen zeitraubend sind und geologische Strukturen vielfach erst nach einem aufwendigen Auswerteprozess sichtbar werden – ganz anders als in der Seismik, in der vielfach bereits die Rohdaten der Seismogramme echte geologische Strukturen erkennen lassen. In keinem Fall sollte die Gravimetrie gering geschätzt werden, da bei bestimmten Fragestellungen allein sie Lösungsmöglichkeiten anbietet und – anders als Seismik, Geoelektrik und Geomagnetik – praktisch unbeeinflusst von Bebauung, Versorgungsleitungen und Verkehr ist (Abb. 3.93).

Grundsätzlich anders als die Seismik ist die Gravimetrie ein sogenanntes Potentialverfahren, was sich auf den physikalischen Begriff des Gravitationspotentials der klassischen Mechanik bezieht. In der Geophysik lässt sich mit seiner Hilfe das Gravitations- oder Schwerefeld der Erde beschreiben, in dem ein Probekörper beschleunigt wird. In der Gravimetrie befindet sich der Probekörper in einem dafür geeigneten Messinstrument, dem Gravimeter, das in der meist angewandten Form im Prinzip eine extrem empfindliche Federwaage ist (Abb. 3.91).

Für das Weitere ist es zweckmäßig, Massen durch ihr Volumen und die Dichte zu ersetzen. Das Volumen wird durch geometrische Größen eines Körpers definiert; die Dichte (Einheit: kg/m^3, meist auch immer noch g/cm^3 im cgs-System) ist der interessierende petrophysikalische Parameter. Typische Störkörper (englisch: *causative body*), die Schwereanomalien erzeugen können, sind Erzkörper (hohe Dichte) oder Salzstöcke (relativ geringe Dichte). Charakteristische Anomalien können über tektonischen Strukturen (Horste, Gräben, allgemein Verwerfungen) beobachtet werden oder lithofaziell bezogen auftreten (Abb. 3.92). Eine Zusammenstellung von einigen typischen Gesteinsdichten bringt der Abschn. 3.5.4. Die Schwankungen rühren außer vom Mineralbestand mit den variierenden Dichten vor allem vom unterschiedlichen Porenraum und vom Grad der Porenfüllung her.

Gemessen werden Schwerkraft- bzw. Schwereänderungen, die die Dichteverteilung im Untergrund widerspiegeln. Die Messungen werden flächenmäßig oder – bei

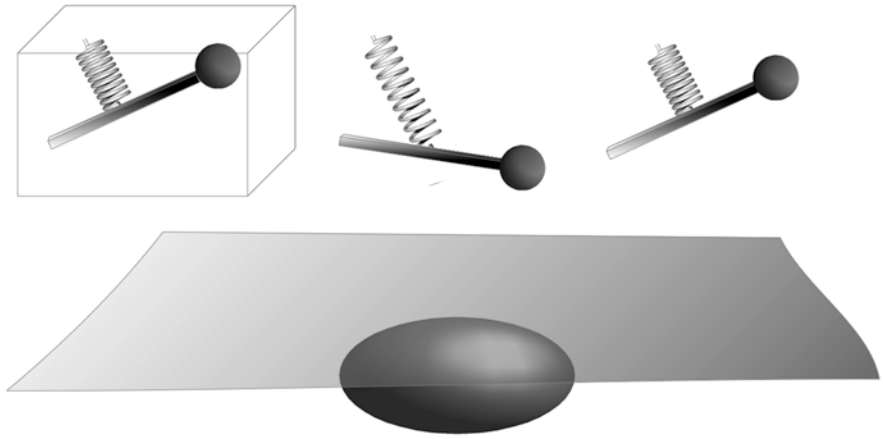


Abb. 3.91 Modell für Gravimetrie und Gravimeter. Die tatsächlichen Auslenkungen der kleinen Masse liegen im Mikrometerbereich.

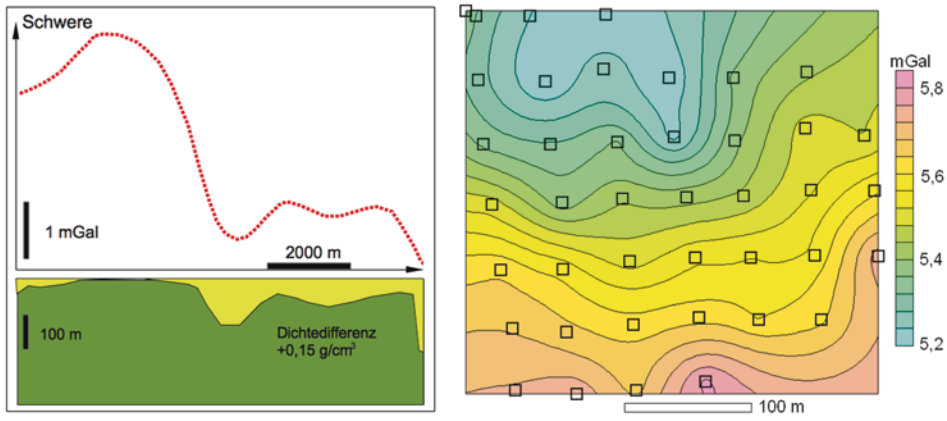


Abb. 3.92 Charakteristische Schwerekurve über tektonisch gestörtem Untergrund (links) und Bouguer-Schwerekarte einer relativ kleinräumigen Schwerevermessung; Grenze Lockergestein – Festgestein. Bei den Zahlen der Schwereverteilung handelt es sich immer um Relativwerte

langgestreckten geologischen Strukturen – sehr häufig auf Profilen senkrecht zum Streichen durchgeführt. Ausdehnung und Tiefenlage der Störkörper bestimmen den Messpunktabstand. Bei den eher flachgründigen Untersuchungen der oberflächennahen Geophysik sind 10–50 m ein roher Anhaltspunkt (Abb. 3.92). Die Messung an einem Gravimeterpunkt erfordert einige Minuten. Zeitaufwendiger kann das Nivellement zur Ermittlung der Stationshöhen sein. Um die Messgenauigkeit des Gravimeters voll auszunutzen, muss – je nach Gerätetyp – die Höhe jedes Gravimeterpunktes millimeter-

Abb. 3.93 Gravimetrie kann praktisch überall durchgeführt werden. Links ein Gravimeter älteren, rechts ein Gravimeter neueren Typs

bis zentimetergenau bekannt sein. Auch die unregelmäßige Geländegestalt muss ermittelt werden, damit ihre Gravitationswirkung berechnet und in Abzug gebracht werden kann. Weitere zu korrigierende Einflüsse sind die geographische Breite der Messstation (Wirkung der Erdrotation und der Abplattung der Erde) sowie zeitliche Änderungen (Erdgezeiten: Wirkung von Mond und Sonne). Diese Reduktionen haben je nach Umfang Namen wie Freiluft- oder wie in der Praxis üblich Bouguer-Reduktion mit der zu interpretierenden Bouguer-Schwere. Die geophysikalisch gebräuchliche Einheit ist das Milligal (100 Gal = 1 m/s^2; 1 mGal entspricht rund 10^{-6} der mittleren Erdschwere von 9,81 m/s^2); die empfindlichsten Gravimeter (Abb. 3.93) besitzen eine Auflösung von 0,001 mGal = 1 μGal.

Sind die zugehörigen Reduktionen abgeschlossen, werden die Schwerewerte in Form von Profilen dargestellt oder in die Landkartenebene gezeichnet (Abb. 3.92). Dort konstruiert man Linien gleicher Schwereanomalien, die sogenannten Isogammen (weitere Beispiele für Schwerekarten in Abb. 3.49, 3.50, 3.105, 3.119).

Die physikalische Auswertung der gemessenen Schwereverteilung, von der man gegebenenfalls noch Trendfelder abgezogen hat (vergl. Abb. 3.50), besteht im Auffinden einer Dichteverteilung im Untergrund, die die gemessene Schwereanomalie erzeugt. Der Zusammenhang ist durch das Gravitationsgesetz gegeben, das für die gewöhnlich unregelmäßig geformten Massen in einer Integralform anzuwenden ist. Computerprogramme erlauben es, die Schwereanomalie beliebig geformter Massen zu berechnen. Mehr über die Mehrdeutigkeit dieser physikalischen Modellierung steht im Abschn. 3.4.6.

Bisher wenig praktiziert, aber für die oberflächennahe Geophysik und Hydrogeologie nicht ganz uninteressant, sind Massenveränderungen im Untergrund, die zeitveränderliche messbare Schwereanomalien verursachen. Die Wirkung kann leicht an einer ausgedehnten 1 m dicken Wasserschicht deutlich gemacht werden, die ein gravimetrisches Signal von etwa 40 μGal erzeugt, was mit hochempfindlichen Mikrogravimetern gemessen werden

kann. Die Literatur berichtet z. B. über Wiederholungsmessungen über Karst-Aquiferen mit jahreszeitlich sich änderndem Speichervermögen (Jacob et al. 2010).

3.6.5 Geomagnetik

Vermessungen des Erdmagnetfeldes in der angewandten Geophysik haben große Ähnlichkeit mit Schweremessungen, sodass vieles übernommen werden kann. Ein besonderes Merkmal ist der geringe Aufwand von Magnetfeld-Messungen. Sie gehören mit der SP-Methode (Abschn. 3.6.1), dem VLF-Verfahren (Abschn. 3.6.1) und der Radiometrie (Abschn. 3.6.6) zu den kostengünstigsten Verfahren und werden deshalb bei vielfältigen Fragestellungen eingesetzt. Das gilt auch für die Belange der oberflächennahen Geophysik mit Beziehungen zur Oberflächennahen Geothermie.

Grundlage der Geomagnetik ist die Beobachtung, dass dem großräumigen Magnetfeld der Erde kleinräumige Magnetfelder magnetisierter Gesteine als Anomalien überlagert sind (Abb. 3.94). Die Magnetisierung ist der zur Dichte korrespondierende physikalische Parameter, der aber, anders als die Dichte, ein Vektor ist. Damit hängt zusammen, dass man es in der Gravimetrie nur mit anziehenden, in der Magnetik aber mit anziehenden und abstoßenden Kräften (Nord- und Südpole!) zu tun hat. Der Magnetisierungsvektor kann beliebige räumliche Orientierung im Gestein haben. Deshalb existieren für geometrisch identische Gesteinslagerungen ganz unterschiedliche Störfelder (= Anomalien). Zwei Gegebenheiten sind zu beachten: die Lage des Störkörpers in unterschiedlichen Breiten und eine remanente Magnetisierung. Im ersten Fall ist die induzierte Magnetisierung zu erörtern. Sie ist allen Gesteinen eigen, da sie sich im induzierenden Erdmagnetfeld befinden. Deshalb ist die Magnetisierung auch keine Materialkonstante. Eine solche ist die magnetische Suszeptibilität k, die eine proportionale Verknüpfung zwischen dem induzierenden Feld und der Magnetisierung herstellt. Stark vereinfacht kann man sagen, dass die

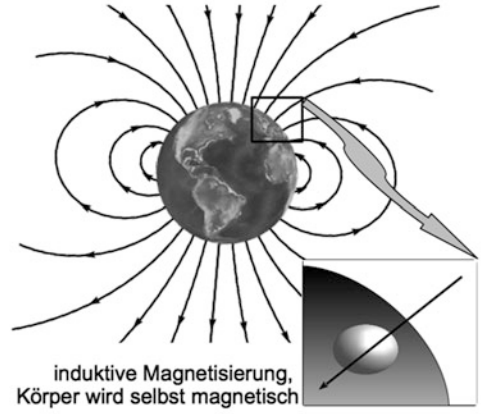


Abb. 3.94 Das Erdmagnetfeld – Grundlage der Geomagnetik und der Messung mit Magnetometern

Suszeptibilität ein Maß für die Menge magnetischer Partikel pro Volumeneinheit ist. Sie kann positiv oder negativ sein und ist dimensionslos; pauschale Werte für Gesteine bringt der Abschn. 3.5.5.

In vielen Fällen reicht die Suszeptibilität nicht aus, das magnetische Verhalten eines Gesteinskörpers zu beschreiben. Enthält er bestimmte Minerale (z. B. Magnetit), so kann er die Eigenschaft der remanenten Magnetisierung (permanente, bleibende Magnetisierung, Remanenz) besitzen, die ebenfalls ein Vektor ist und sich der induzierten Magnetisierung vektoriell überlagert. Eine Remanenz erwirbt ein Gestein im Laufe seiner Geschichte durch sehr unterschiedliche Prozesse (Abkühlung heißer Gesteine, Umkristallisation, Blitzschlag, chemische Veränderungen u. a.), die hier nicht weiter diskutiert werden. Überwiegt die remanente Magnetisierung und bleibt sie bei der Auswertung und Deutung einer Anomalie unberücksichtigt, so kann das zu beachtlichen Fehlern führen.

Magnetfeldmessungen in der üblichen Einheit Nanotesla (nT) werden mit Magnetometern durchgeführt, deren Funktionsweise auf sehr unterschiedlichen physikalischen Prozessen beruhen kann. Dazu gehören Saturationskern- oder Fluxgate-Magnetometer („Förster"-Sonden) (Abb. 3.95), Protonenpräzessionsmagnetometer (kurz: Protonenmagnetometer, Abb. 3.95) oder optisch gepumpte Magnetometer (z. B. Cäsium-Magnetometer). Im Zusammenhang mit umweltgeologischen Fragestellungen, bei denen oberflächennahe Störkörper und Magnetisierungsverteilungen interessieren, hat es die Entwicklung von Instrumenten zur Gradienten-Messung gegeben (Abb. 3.93). Moderne Magnetometer besitzen im Allgemeinen die Möglichkeit der kontinuierlichen Registrierung

Abb. 3.95 Links und Mitte: Einfache Fluxgate-Magnetometer-Gradiometer für Altlasten und Kampfmittelortung (Oberfläche und Bohrung). (Fotos: Ebinger GmbH. Rechts: Protonenpräzessionsmagnetometer)

Abb. 3.96 Messgerät für die magnetische Suszeptibilität SM30 (ZH Instruments).

im Fußgängertempo. Die Suszeptibilität kann im Gelände am anstehenden Gestein oder an größeren Handstücken mit tragbaren, handlichen Instrumenten unmittelbar gemessen werden (Abb. 3.96).

Obwohl eine enge Verwandtschaft zur Gravimetrie besteht, sind Magnetfeldmessungen durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet. Vergleichbar sind Überlegungen zur Anlage von Messpunktnetzen oder Profilen und zum Messpunktabstand. Magnetfeldmessungen werden aber viel häufiger über kleinräumigen Strukturen durchgeführt, sodass Messpunktabstände im Meterbereich (bei Digitalaufnahme im Dezimeter- und Zentimeterbereich) nicht selten sind. Die hohe Empfindlichkeit von Magnetometern macht es ratsam, einen hinreichend großen Abstand zu allen Eisenkonstruktionen (Masten, Zäune, Schienen, Landmaschinen, Kraftfahrzeuge, Versorgungsleitungen, Stahlbeton) einzuhalten. Das Störfeld von Kraftfahrzeugen ist noch in einigen 10 m, das von Hochspannungsmasten noch in einigen 100 m mit einer Amplitude von einigen nT zu messen. Ziegelsteinbauten und ganz allgemein gebrannte Keramik sind in der Regel messbar magnetisch und manchmal extrem stark magnetisiert.

Verglichen mit der Gravimetrie ist der Aufwand sehr gering. Ein geübter Beobachter kann pro Tag mit einem Protonenmagnetometer in nicht zu schwierigem Gelände Messwerte an einigen 100 Punkten gewinnen. Kontinuierliche Gradiometer-Messungen liefern am Tag mehrere Kilometer Profilstrecke.

Das Ziel der Auswertung von Magnetfeldmessungen wird analog zur Gravimetrie formuliert: Es sind Magnetisierungsverteilungen im Untergrund zu finden, die die gemessenen Anomalien zu erklären vermögen. Häufig wird man dabei an geometrisch begrenzte magnetisierte Körper, an abrupte Magnetisierungsänderungen an tektonischen Störungen oder an faziesbezogene Magnetisierungsverteilungen denken. Typische Messkonstellationen in der oberflächennahen Geophysik vermittelt die Abb. 3.97. Wie in der Gravimetrie können alle magnetischen Felder mathematischen Prozeduren wie Feldfortsetzungen oder allgemein Filterverfahren unterzogen werden (Abschn. 3.4.5). Beispiele

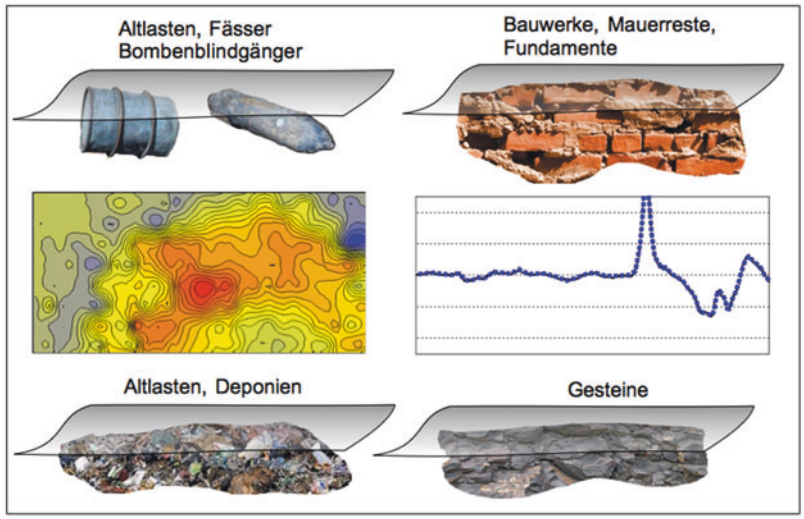


Abb. 3.97 Anwendungen von Magnetfeldmessungen in der oberflächennahen Geophysik; Flächen- und Profilmessungen mit deutlichen magnetischen Anomalien

aus der Messpraxis finden sich an anderen Stellen des Beitrags (Abb. 3.2, 3.51, 3.117, 3.127, 3.129).

3.6.6 Radiometrie

Grundlage der Radiometrie ist die natürliche Radioaktivität, also die spontane Umwandlung von bestimmten Isotopen chemischer Elemente in Isotope anderer Kernladungszahl. Die Atomumwandlung geht mit dem Abstoßen eines Heliumkerns (= Alphateilchen; Alphastrahlung, Alphazerfall) oder dem Aussenden eines negativ geladenen Elektrons e^- (= Betateilchen; Betastrahlung, Betazerfall) oder dem Einfangen eines solchen Elektrons (K-Einfang) einher. Die Prozesse der Umwandlung können von einer hochenergetischen elektromagnetischen Strahlung begleitet sein. Diese Gammastrahlung ist bei Messungen der Radioaktivität im Gelände oder in Bohrlöchern die wichtigste physikalische Größe.

Die Wechselwirkung radioaktiver Strahlung mit Materie begründet die Konstruktion von Nachweis- und Messgeräten. Zählrohre und vor allem Szintillationszähler spielen bei geophysikalischen Untersuchungen die wichtigste Rolle. Szintillationszähler in der Größe eines Fotoapparates haben für Gammastrahlen bereits ein hohes Ansprechvermögen, sodass rasche Messungen mit hinreichender statistischer Sicherheit möglich sind. Die graphische oder tabellarische Wiedergabe von Gammaintensitäten als Funktion der Strahlungsenergie heißt Gammaspektrum. Da die Energiebeträge und Intensitäten gut bekannt sind, können Gammaspektren von Gesteinsproben Auskunft über Art und Gehalt radioaktiver Bestandteile geben. Die Messung von Alphastrahlung des gasförmigen Radons

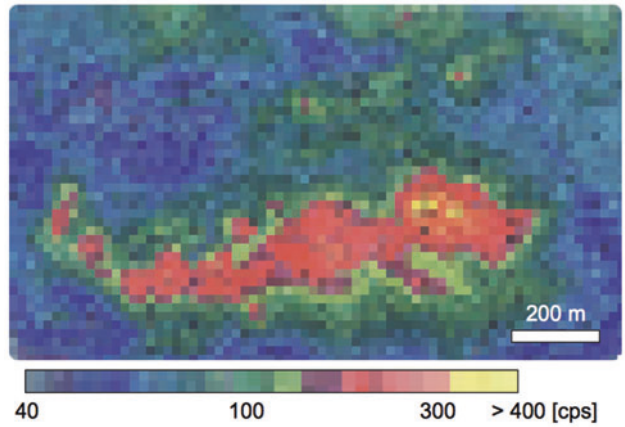


Abb. 3.98 Gammastrahlen-Radiometrie: deutliche Anomalien über monazithaltigen Kreide-Sandsteinen. (Verändert nach Feld 1985)

erfolgt durch Ionisation oder Szintillation in Messkammern, in die abgesaugte Bodenluft geführt wird, oder mit eingegrabenen Festkörper-Spurdetektoren.

Messungen der Radiometrie werden im Gelände auf Profilen oder in einem Punktraster durchgeführt. Im letzteren Fall wird man die Messdaten in Form von Isolinien oder Isoflächen (Isoradenpläne) darstellen (Abb. 3.98); vielfach interessieren nur die relativen Zählraten (*counts per second*, cps). Für die Deutung ist der Hinweis wichtig, dass bei Oberflächenmessungen der Radioaktivität – anders als bei sonstigen geophysikalischen Messungen – die Informationen wegen der starken Absorption der Strahlung allein aus den obersten Dezimetern des Untergrundes stammen. Nur beim durch das Gestein diffundierenden Radongas trifft das nicht zu.

Geht es nicht um eine Prospektion auf Rohstoffe, dienen Messungen der Radioaktivität gewöhnlich als Hilfsmittel der geologischen Kartierung (Abb. 3.98) mit der Klärung lithostratigraphischer und struktureller Verhältnisse. Die Auswertung und Interpretation ist qualitativer Natur und zielt auf das Erkennen von Gesteinsgrenzen und tektonischen Störungen.

Bei Radon-Messungen ergibt sich der hydrogeologische Bezug mit dem Ziel, (z. T. tiefreichende) wasserführende Spaltensysteme aufzufinden. Folgendes ist dabei gesichertes physikalisches Wissen: Radon ist ein radioaktives Gas, das beim Zerfall des Radiums, eines Zwischengliedes der Zerfallsreihen des Uran und Thorium, freigesetzt wird. Es gibt drei natürliche Radonisotope mit Halbwertszeit von maximal 3,83 Tagen. Diese verhältnismäßig kurze Zeit spielt bei geologischen Radon-Messungen eine wichtige Rolle. Die Folgeprodukte dieser Radonisotope sind das Element Polonium; beim Zerfall entsteht Alphastrahlung, die von Gammastrahlung begleitet wird. Mit beiden kann Radon messtechnisch nachgewiesen werden; in aller Regel nutzt man die Alphastrahlung. In Bezug auf Gesundheitsgefahren durch das Radongas ist das Festkörper-Folgeprodukt Polonium das eigentliche Problem, das im Zusammenhang mit der Installation von Anlagen der Oberflächennahen Geothermie diskutiert, allerdings als sehr gering eingeschätzt wird.

Die Verbreitung von Radon in Bodenschichten ist komplex, und vieles wird auch noch nicht richtig verstanden. Wichtige Faktoren sind die Lithologie der liegenden Gesteine, tektonische Merkmale wie Verwerfungen und Klüftung, aber auch das geochemische Verhalten der radioaktiven Elemente, Bodenphysik und Bodenchemie, Radonfreisetzungs- und -Transportmechanismen, Veränderungen von Bodenfeuchte und Grundwasserständen, sowie Einflüsse von Topographie und Wetter.

3.6.7 Geothermie

Geothermie als Messverfahren spielt im Rahmen der angewandten Geophysik eine eher stiefmütterliche Rolle, und sogar in neueren Lehrbüchern über angewandte Geophysik findet sie nicht einmal Erwähnung. Vielleicht hängt es damit zusammen, dass es die Geothermie bisher nicht leicht gemacht hat, an viele Messdaten zu gelangen und über Modellrechnungen zu quantitativen Aussagen zu gelangen. Computerprogramme für Auswertung und Interpretation sind erst in neuerer Zeit erhältlich. Aber es deutet sich an, dass neuere Techniken für flache Sondierungen und insbesondere die Etablierung der Infrarotmessung die Geothermik attraktiver machen werden. Gerade für Belange der Hydrogeologie und Hydraulik im Rahmen der Oberflächennahen Geothermie ist das bedeutsam, spielen doch das Wasser und seine Bewegungen eine ganz wesentliche Rolle für das Temperaturfeld im Untergrund.

Die wesentlichen Grundlagen der Geothermie mit den vier elementaren Begriffen Temperatur, Wärme, Wärmespeicherung und Wärmetransport sind bereits im Abschn. 3.5.7 bei der Besprechung der petrophysikalischen Parameter vorweggenommen, was hier nicht im Einzelnen wiederholt werden soll. Nach einem hinlänglich bekannten Befund in Tiefbohrungen und Bergwerken steigt die Temperatur mit zunehmender Tiefe. Der Gradient $\mathrm{d}T/\mathrm{d}z$ beträgt für viele Gebiete näherungsweise 0,03 K/m, kann auf stabilen, alten Schilden sehr viel niedriger und in geodynamisch aktiven Regionen sehr viel höher sein. Die Temperaturzunahme bedeutet einen gegen die Erdoberfläche gerichteten Wärmetransport, der in der Geothermie die Bezeichnung Wärmestrom als vertikale Komponente der Wärmestromdichte hat. Als Mittelwert für die gesamte Erde erhält man für den Wärmestrom $q_\mathrm{E} = 0,063\,\mathrm{W/m^2}$. Das ist sehr wenig im Vergleich zur Energie, die durch die Sonneneinstrahlung J_E zur Erdoberfläche gebracht wird: $J_\mathrm{E} = 625\,\mathrm{W/m^2}$. Es leuchtet deshalb ein, dass Untersuchungen zum Wärmestrom und zum Temperaturfeld in den Gesteinen den Einfluss der im Wesentlichen periodisch (jährlich, täglich) wirkenden Einstrahlung beachten müssen. Anders als beim stationären Wärmestrom bewirkt die Einstrahlung einen instationären Prozess der Wärmeleitung, bei dem die Temperaturleitfähigkeit der bestimmende gesteinsphysikalische Parameter ist. Maßgeblich prägt die Periode der Temperaturänderung die Ausbreitung im Untergrund, wobei eine Phasenverschiebung und eine Amplitudenabnahme auftreten (Abb. 3.99, 3.100). Man stellt fest, dass ein mittägliches Temperaturmaximum an der Erdoberfläche bis Mitternacht in eine Tiefe von etwa 0,5 m gewandert ist und dort nur noch 1/20 der Oberflächenamplitude besitzt

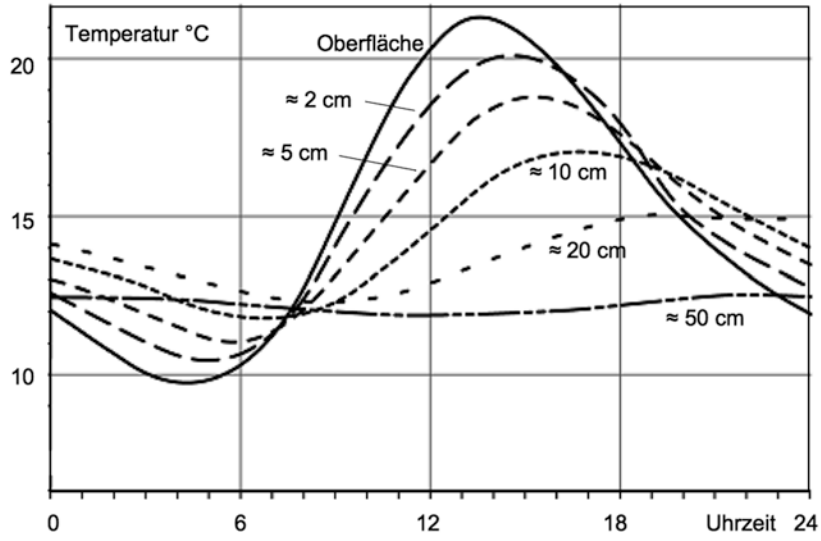


Abb. 3.99 Tagesgang der in den Untergrund eindringenden Temperaturwelle

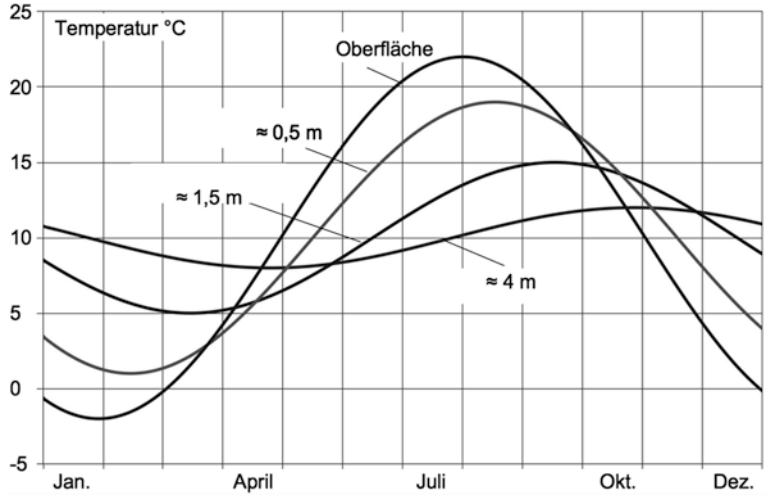


Abb. 3.100 Jahresgang der in den Untergrund eindringenden Temperaturwelle

(Abb. 3.99). Das Sommermaximum der einjährigen Temperaturperiode erleidet in dieser Tiefe nur eine geringe Amplitudenverringerung (Abb. 3.100) und fällt erst in etwa 10 m Tiefe auf 1/20 der Oberflächenamplitude ab. Dort hat die Temperatur etwa zur Winterzeit ihr, wenn auch bescheidenes, Maximum. Für Überlegungen zu Temperaturmessungen nahe der Erdoberfläche und im Zusammenhang mit der Oberflächennahen Geothermie haben diese Zusammenhänge grundlegende Bedeutung.

Messungen zum aktuellen Wärmestrom, zur Wärme- und Temperaturleitfähigkeit beruhen letztlich auf Temperaturmessungen z. B. in Bohrungen oder an Bohrkernen. Die klassischen Quecksilberthermometer sind durch elektrische Widerstandsthermometer verdrängt worden. Bei ihnen wird ausgenutzt, dass sich der Widerstand von Metallen und Halbleitern mit der Temperatur ändert, und die Temperaturmessung wird auf eine Widerstandsmessung zurückgeführt. Meist werden Thermistoren mit einem negativen Temperaturkoeffizienten (NTC-Widerstände) eingesetzt, mit denen Auflösungen von weniger als 0,01 K erreicht werden. Solche Temperaturfühler werden sehr kleindimensioniert hergestellt, sodass sie über ein Kabel auch in sehr enge Bohrlöcher (Schlitzsondierungen) eingebracht werden können. Bei speziellen Rammsonden sind sie in die Spitzen eingearbeitet. Mehrere Temperaturfühler können auch zu einer Sensorkette zusammengefügt und in ein in den Boden gerammtes Hohlgestänge eingeführt werden. Bei Messungen in Grundwasserbohrungen befindet sich der Temperaturfühler meist in einer Sonde, die gleichzeitig die Registrierung von elektrischer Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotential und Sauerstoffgehalt erlaubt (siehe dazu Kap. 18).

Während die Messung mit Widerstandsthermometern (Abb. 3.101) die Wärmeleitung nutzt, hat man es bei der Infrarot(IR)-Oberflächenerkundung mit einer berührungslosen Temperaturmessung unter Ausnutzung der Wärmestrahlung zu tun (Abb. 3.101). Messgeräte nutzen thermische Strahlungsempfänger wie Thermosäulen (aus hintereinandergeschalteten Thermoelementen) oder Bolometer (Messung der Widerstandsänderung von Drähten oder Blechen als Folge der Temperaturänderung bei Zuführung von Strahlungswärme). Eine bis zum Faktor 100 höhere Empfindlichkeit haben Photodetektoren, die zudem eine praktisch trägheitsfreie Messung erlauben. Man nutzt sie in Wärmebildkameras und Temperaturscannern.

Während geothermische Infrarotmessungen meist an der Erdoberfläche bleiben (Untertagemessungen sind bekannt geworden), sind Thermometermessungen in aller Regel nur in hinreichend tiefen Bohrlöchern sinnvoll. Das „hinreichend“ bezieht sich vor allen Dingen auf die Eindringtiefe der Temperaturwellen mit täglicher und jährlicher Periode

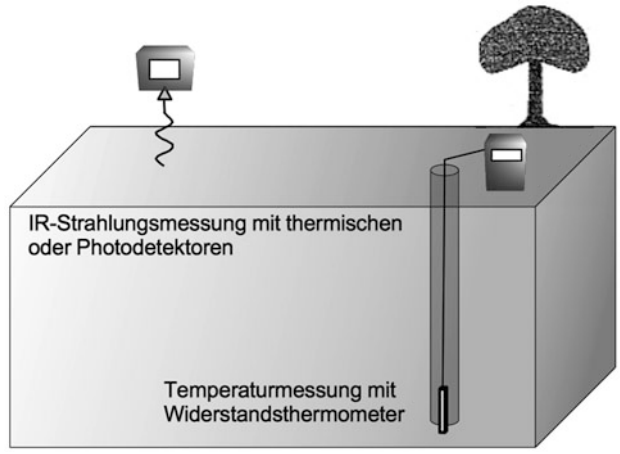


Abb. 3.101 Berührungslose und Kontakt-Temperaturmessung

und die Stärke (Amplitude) geothermischer Anomalien. Signifikante Temperaturanomalien von weniger als 1 K sind nicht ungewöhnlich. Eine Mindesttiefe von 1 m sollte deshalb bei Temperaturmessungen angestrebt werden; besser sind 2–4 m. Wie bei anderen geophysikalischen Messungen wird man Messraster anlegen oder – bei langgestreckten (sogenannten zweidimensionalen) Strukturen – auf Profilen messen. IR-Messungen werden wegen der dann fehlenden Einstrahlung vorzugsweise in der Nacht durchgeführt, in der aber die periodische Temperaturänderung weiterwirkt. Da die IR-Strahlung allein von der Oberfläche ausgeht, haben Unterschiede in ihrer Beschaffenheit (Belag, Feuchtigkeit, Bewuchs) einen wesentlichen Einfluss auf die gemessenen Temperaturwerte.

Gemessene Temperaturen werden flächenhaft als Pläne von Isolinien (Geoisothermen, Abb. 3.102) dargestellt oder in Profilform gezeichnet. Dabei kann sich die Anwendung von Filtern empfehlen, wie sie auch bei anderen geophysikalischen Feldern (z. B. solchen der Gravimetrie oder Geomagnetik) üblich ist (Abschn. 3.4.5). Eine Auswertung von Temperaturmessungen erschöpft sich in vielen Fällen in der Feststellung, dass bei Geoisothermen Zentren bzw. auf Profilen Abschnitte erhöhter oder erniedrigter Temperatur als Anomalien auftreten. Können oberflächige Störeffekte ausgeschlossen werden, wird die Interpretation Modelle zur Wärmeleitung, zur Konvektion oder Mischmodelle betrachten. Im letzten Fall ist z. B. an unterirdische Hohlräume als thermische Störkörper im irdischen Wärmestrom zu denken, die – luft- oder wassergefüllt – eine anomale Wärmeleitfähigkeit besitzen, in denen aber auch Konvektion stattfinden kann. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass Konvektion eine weitaus größere Rolle bei messbaren Störungen im oberflächennahen Temperaturfeld spielt, was für die Belange der Oberflächennahen Geothermie eine wichtige Rolle spielen kann. Aber auch Körper mit abweichender Temperaturleitfähigkeit können zu geothermischen Anomalien führen, sofern sie sich im Einflussbereich der von

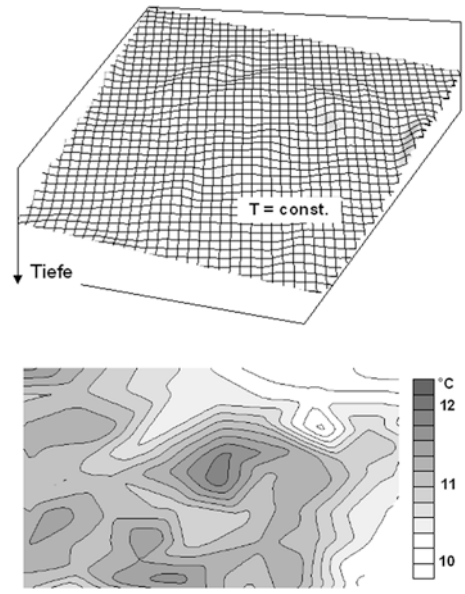


Abb. 3.102 Temperaturverteilungen als Isothermenfelder: Isothermen räumlich konstanter Temperatur (oben) und Isothermen in einer ausgewählten Tiefe

der Erdoberfläche eindringenden Temperaturwellen befinden. Dazu können z. B. Aquifere in geringer Tiefe gehören, die mit ihrer geringen Temperaturleitfähigkeit einen solchen geothermischen Störkörper darstellen können.

3.6.8 Neuentwicklungen

NMR-Verfahren

Der Effekt der Kernspinresonanz (auch: magnetische Kernresonanz oder kernmagnetische Resonanz; engl. *nuclear magnetic resonance, NMR*) ist als bildgebendes Verfahren seit etwa den 70er Jahren vor allem für medizinische Diagnosen bekannt geworden. In der Geophysik ist dieses relativ neue Verfahren (Yaramance und Hertrich 2006; Everett 2013) eine Großumsetzung des Protonenpräzessionsmagnetometers (siehe Abschn. 3.6.5, Abb. 3.93) für das Gelände. Beim (kurz) Protonenmagnetometer befindet sich eine protonenreiche Flüssigkeit (z. B. Wasser, meist aber eine organische Flüssigkeit) in einem abgeschlossenen Sondenbehälter, der von einer Spule umwickelt ist. Da sich die Protonen im Erdmagnetfeld befinden, richtet sich ihr magnetischer Spin in Richtung des Feldvektors aus. Wird ein starker Strom für kurze Zeit durch die Spule geschickt, wird durch dessen Magnetfeld der Protonenspin angeregt und aus der Ruhelage gekippt. Endet der auslenkende Stromimpuls, so kehren die Protonen mit einer Kreisel-(Präzessions-)Bewegung in den Ruhzustand zurück, wobei sie in einer „Empfangsspule“ eine abklingende Wechselspannung induzieren. Diese hängt nur von der primär ausrichtenden Erdmagnetfeldstärke ab und ist damit ein Maß für die erdmagnetische Totalintensität.

Genau das passiert auch bei der geophysikalischen NMR (engl. auch sNMR für *surface nuclear magnetic resonance*), wobei der Behälter der Magnetometer-Sonde durch den wasserhaltigen protonenreichen Untergrund, insbesondere eines Aquifers, ersetzt zu denken ist und die Stromanregung durch eine im Gelände ausgelegte Stromschleife mit einem Radius zwischen 10 und 100 m erfolgt, während eine weitere Schleife das induzierte Empfangssignal misst. Der entscheidende Unterschied: Im Protonenmagnetometer existiert immer exakt dieselbe Flüssigkeit, und vom Abklingsignal interessiert nur die Amplitude als Maß für die Totalintensität. Beim NMR ist das gering schwankende Erdmagnetfeld uninteressant, dafür beeinflussen die wechselnden Untergrundverhältnisse mit dem sich verändernden Wassergehalt nachhaltig das Abklingverhalten der Protonen, das zu analysieren ist. Und dementsprechend ist die NMR insbesondere für Wassergehaltsbestimmungen und hydraulische Eigenschaften von Aquiferen bis in Tiefen von etwa 150 m ausgelegt, also gerade auch für den Bereich, der für Anlagen der Oberflächennahen Geothermie wichtig ist. Zu einer routinemäßigen Anwendung hat es die Methode bisher noch nicht geschafft.

Seismoelektrik

Ein neues Verfahren, bisher ohne merkliche praktische Anwendung, aber durchaus mit Potential für die Erfassung hydraulischer Parameter wie Porosität und Transmissivität,

hat Beziehungen zum altbekannten Effekt der elektrokinetischen Potentiale bei der Eigenpotentialmethode (Abschn. 3.6.1). Die Beobachtung lehrt, dass eine Umwandlung von seismischer Energie von Wellen, die ein poröses Medium durchlaufen, in elektromagnetische Energie erfolgt. Außer dem elektrokinetischen Effekt spielen offenbar auch andere Effekte, darunter piezoelektrische Phänomene und Widerstandänderungen eine Rolle (z. B. Everett 2013). Erst in den 1990er Jahre hat man begonnen, die Zusammenhänge besser zu verstehen, und einige wenige neuere Anwendungen zielen darauf ab, die Möglichkeiten für oberflächennahe Aquifere zu testen (z. B. Dupuis et al. 2007). Allerneueste Untersuchungen (Jouniaux und Zyserman 2015) unterscheiden darüber hinaus Seismoelektrik, Elektroseismik und Seismomagnetik für eine Untergrunderkundung, wenn es um die Bewegung von Wasser, Öl und Gas sowie um Porositäten, Permeabilitäten und Gesteinsklüftung geht.

3.6.9 Bohrlochgeophysik

Mit zunehmender Entfernung der geophysikalischen Messung vom geologischen Untersuchungsobjekt nehmen Auflösungsvermögen und generell Aussagekraft ab, bei einigen Verfahren rascher, bei anderen langsamer. Die Bohrlochgeophysik, die in der Geophysik einen besonderen, um nicht zu sagen eigenständigen Komplex darstellt, überkommt dieses Manko und ergänzt die Oberflächengeophysik, indem sie mit ihrem Instrumentarium in der Bohrung in die Tiefe wandert und Strukturen, Gefüge, Lithologie und generell die Fazies im unmittelbaren Kontakt zum Bohrloch untersucht. Das ist der eine wichtige Teil der Bohrlochgeophysik. Ein anderer Teil betrifft die Untersuchung des Bohrloches selbst, seines Zustandes, mit der Aufnahme bohrtechnischer Daten sowie seiner Überwachung. Bohrlochmessungen, bei denen die meisten der Verfahren der Oberflächengeophysik in spezifisch abgewandelter Form zum Einsatz kommen können, dienen dazu, Bohrprofile zu dokumentieren, Größen wie Porosität, Sättigung, hydrogeologische und hydraulische Parameter zu ermitteln, kleinräumige Gefüge (z. B. Klüftung) aufzuzeichnen und in grundwassergefüllten Bohrungen die einschlägig wichtigen Parameter des Fluids zu messen. In vielen Fällen können sie auch eine wichtige Ergänzung zur Oberflächengeophysik darstellen. In der Oberflächennahen Geothermie mit der Einrichtung von Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden in Bohrungen spielen Messungen der Bohrlochgeophysik eine sehr wichtige Rolle, deren Besonderheiten Kap. 18 gewidmet ist.

3.7 Geophysik und der Aquifer

Ein Großteil der Oberflächennahen Geothermie ist nahezu untrennbar mit einem Grundwasserreservoir, also dem hydrothermalen Speicher und seinen hydraulischen Parametern verknüpft. Hier geht es um die Speichergesteine und diejenigen Parameter und Zusammenhänge, die eine Bedeutung im Zusammenhang mit der Geophysik und den

petrophysikalischen Parametern haben. Es sind dies vor allem die *Porosiät* Φ in Form der Poren- und Kluftporosität sowie die *Permeabilität K* bzw. die hydraulische Leitfähigkeit (*Durchlässigkeitsbeiwert* k_f). Die daraus abgeleitete *Transmissivität T* eines Speichergesteins kann ebenfalls in Beziehung zu geophysikalischen Messgrößen (Seismik, Geoelektrik) gesetzt werden, was nachfolgend näher erörtert wird. Im Rahmen der Oberflächennahen Geothermie einschlägig bedeutsam sind ferner die Wassersättigung mit dem Grundwasserspiegel und der vadosen Zone mit dem Kapillarsaum, sowie grundlegend die Bewegung des Grundwassers.

3.7.1 Porosität

Wichtige Zusammenhänge zwischen geophysikalischen Messgrößen und der Porosität wurden bereits in den vorangehenden Abschnitten aufgeführt, wobei die signifikantesten Beziehungen zu den seismischen Geschwindigkeiten, den spezifischen Widerständen und den Dichten der Gesteine bestehen. In der Bohrlochgeophysik (siehe Kap. 18), vor allem bei der Kohlenwasserstoff-Exploration, spricht man von sich ergänzenden Porositätslogs oder auch Dichtelogs, aus denen dann die Porosität abgeleitet wird. Dazu gehören die Sonic Logs seismischer Bohrlochmessungen, die Electric Logs verschiedener Widerstandsmessmethoden sowie kernphysikalische Logs mit künstlichen radioaktiven Quellen (Gammastrahlung, Neutronenstrahlung). Charakteristische Unterschiede mit den verschiedenen Porositätslogs können darüber hinaus lithologisch interpretiert werden. In neuer Zeit sind Messungen der NMR (*nuclear magnetic resonance*) hinzugekommen. So unverzichtbar solche quantitativen Messungen in Bohrungen sind, Messungen von der Erdoberfläche aus zur Quantifizierung der Porosität beispielsweise in Aquiferen haben praktisch keine Erfolge gezeitigt. Einzelprojekte (z. B. Niwas und Celik 2012) mit geoelektrischen Tiefensondierungen zur Abschätzung von Porosität und hydraulischer Leitfähigkeit aus modellierten spezifischen Widerständen haben eine Korrelation zu Daten aus Pumpversuchen ergeben, aber die ohnehin schwierige Auswertung von Tiefensondierungen mit all ihren Fallstricken wie Äquivalenzprinzip, Prinzip der relativen Mächtigkeit, Ersatzmächtigkeiten und Ersatzwiderständen sowie der Makro- und Mikroanisotropie (Abschn. 3.6.1) lassen es als aussichtslos erscheinen, auf diese Weise zu auch nur einigermaßen akzeptablen Aussagen über Porositäten zu gelangen.

3.7.2 Permeabilität/Transmissivität

Geophysik und Permeabilität bzw. hydraulische Leitfähigkeit ist ein schwieriges Kapitel. Einfache Zusammenhänge wie zwischen Porosität und seismischer Geschwindigkeit oder Porosität und spezifischem Widerstand gibt es nicht und schon gar keine Standardverfahren der Geophysik zur Ermittlung von z. B. k_f-Werten aus geophysikalischen Messungen, obgleich unzählige Untersuchungen und Fallstudien publiziert wurden (z. B. Abb. 3.103; siehe auch Zusammenstellung z. B. bei Kirsch und Yaramanci 2006). Teilweise völlig

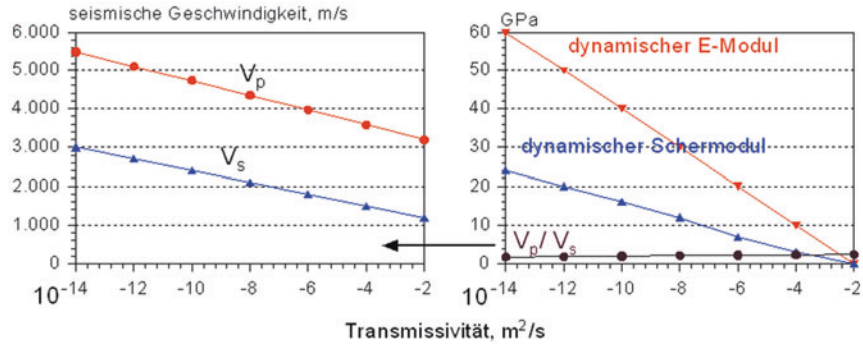


Abb. 3.103 Transmissivität und seismische Parameter aus Bohrlochmessungen in Mergelsteinen; gezeichnet nach Daten in Barton (2007). Eine praktische Bedeutung haben solche Untersuchungen bisher nicht erlangt

entgegengesetzte Resultate (sowohl positive als auch negative Korrelation mit dem geoelektrischen Formationsfaktor F und auch mit der seismischen P-Wellengeschwindigkeit) spiegeln eigentlich nur wieder, dass die hydraulische Leitfähigkeit von so vielen verschiedenen Größen wie Porosität, effektiver Porosität, Korngrößenverteilung sowie Verteilung, Form und Geometrie der Poren abhängt, die ihrerseits wieder miteinander verknüpft sind.

Neuere unkonventionelle Methoden wie die spektrale induzierte Polarisation (SIP) der komplexen Widerstandsgeoelektrik bieten vielversprechende Ansätze zur Abschätzung hydraulischer Leitfähigkeiten (Hördt 2006; Hördt et al. 2007; Attwa et al. 2013). Während die Methode der Nuklearen Magnetischen Resonanz (NMR) bisher in der Kohlenwasserstoff-Exploration und bei Bohrlochmessungen erhebliche Bedeutung für Porositäts- und Permeabilitätsbestimmungen bekommen hat, sind Feldergebnisse bisher nur spärlich bekannt geworden (Legchenko et al. 2002). Gerade für den Schwerpunkt der erreichbaren Untersuchungstiefen von größenordnungsmäßig 100 m wären NMR-Messungen in der Oberflächennahen Geothermie ein willkommenes Hilfsmittel. In klüftigen Festgesteinen könnten Abschätzungen zu Transmissivitäten und spezifischer Ergiebigkeit Zukunft haben (Vouillamoz et al. 2014).

Die Möglichkeit, Transmissivitäten aus geoelektrischen Widerstandstiefensondierungen abzuleiten, wird bereits seit mehr als 30 Jahren erörtert und praktiziert (Frohlich und Kelly 1985; Nivas und Singhal 1981) und findet auch in neuerer Zeit regelmäßige Anwendung (z. B. Salem 1999; Oborie und Udom 2014; MacDonald et al. 1999; Sattar et al. 2014, und andere).

Meist werden empirische Zusammenhänge bemüht, die davon ausgehen, dass in einem sandig-kiesigen Aquifer die hydraulische Leitfähigkeit maßgeblich vom Tongehalt bestimmt wird, der wiederum den spezifischen Widerstand dahingehend entscheidend beeinflusst, dass mit zunehmendem Tongehalt der spezifische Widerstand sinkt. Die einfache Überlegung, mit der Tiefensondierung den spezifischen Widerstand zu ermitteln und ihn zur hydraulischen Leitfähigkeit in Beziehung zu setzen sowie mit der aus der Tiefensondierung bestimmten Aquifermächtigkeit die Transmissivität abzuleiten, funktioniert nicht. Das verhindert das Äquivalenzprinzip mit der Aussage, dass nur in

Ausnahmefällen großer Schichtmächtigkeiten spezifischer Widerstand ρ und Mächtigkeit *m* unabhängig aus der Modellierung der gemessenen Sondierungskurve zu gewinnen sind. Eindeutig zu modellieren ist aber das Produkt $T_Q = \rho \cdot m$ mit dem Namen *Querwiderstand* (engl. *transverse resistivity*) des Aquifers, das eine empirische Korrelation zwischen der Transmissivität $T = K \cdot m$ und dem Querwiderstand $T_Q = \rho \cdot m$ begründet. Zahlenwerte sind nicht aus diesem Zusammenhang und schon gar nicht aus geoelektrischen Einzelsondierungen zu beziehen, aber bei flächiger Anlage von Tiefensondierungen und ihrer Modellierung bezüglich des Querwiderstandes zeichnen sich bei sandig-kiesigen Aquiferen mit faziellen Änderungen durch schwankende Tongehalte relative Änderungen der Transmissivität meist recht gut ab, was für eine Platzierung von Brunnenbohrungen eine erhebliche Hilfe sein kann. Abb. 3.104 zeigt ein Beispiel von vielen ähnlichen Messkampagnen, bei dem das Ergebnis der geophysikalischen Voraussage mit nachfolgenden Bohrungen und hydraulischen Tests bestätigt wurde.

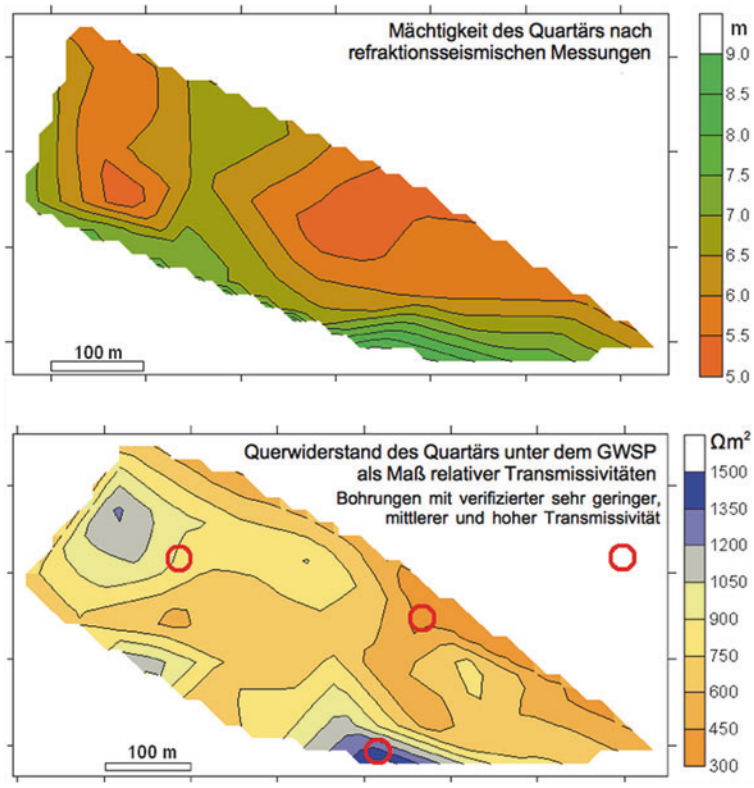


Abb. 3.104 Ermittlung relativer Transmissivitäten im kiesigen Quartär aus geoelektrischen Widerstandstiefensondierungen in Verbindung mit einer Refraktionsseismik. Da in diesem Fall an der Basis des Aquifers paläozoische Schiefer ebenfalls mit hohen Widerständen als Grundwassergeringleiter fungierten, muss auch die seismisch ermittelte Quartärmächtigkeit (oben) für die Modellierung des geoelektrischen Querwiderstandes eingebracht werden. Es zeigt sich, dass die Aquifertransmissivität keineswegs nur der Aquifermächtigkeit folgt

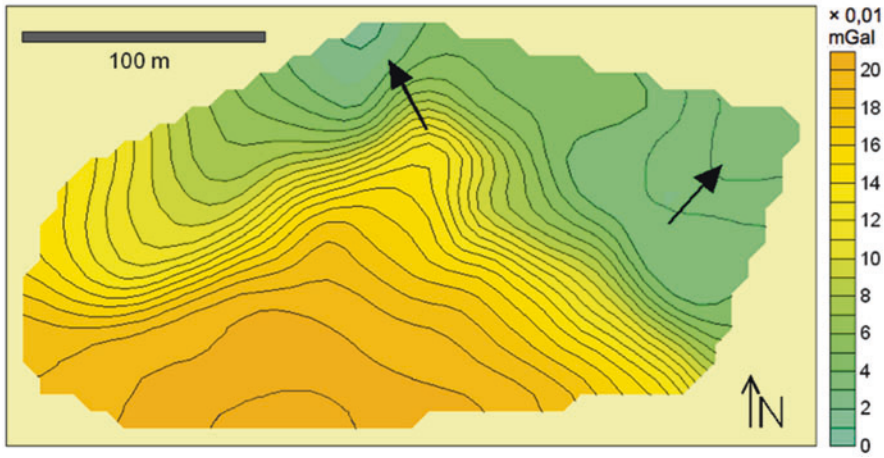


Abb. 3.105 Transmissivität und Gravimetrie: Schwereanomalien über Aquifer in Rheinkiesen mit Nagelfluh-Einschaltungen. Die Zonen relativ niedriger Schwere (Pfeile) markieren niedrige Dichten gut durchströmter Rheinkiese mit erhöhter Mächtigkeit

Einen völlig anderen Ansatzpunkt zur Beurteilung der Transmissivitätsverteilung in einem Aquifer mit Hilfe der Geophysik vermittelt Abb. 3.105. Bei der Standortsuche für einen Brunnen möglichst hoher Ergiebigkeit konnten weder Geoelektrik noch Seismik die gewünschten Informationen geben, aber die sonst kaum bekannte Gravimetrie optimale Ergebnisse liefern. Im gezeigten Beispiel geht es um eine Brunnenanlage in Rheinkiesen, in die z. T. mächtige, durch Kalk dicht verkittete Bänke (Nagelfluh) einschaltet sind, die zum Wasserfluss nicht beitragen. Die Geoelektrik „sieht" die Bänke nicht bzw. kann diese in ihren Mächtigkeiten nicht auflösen, und für die Seismik bildet die allererste Bank eine harte Barriere, die sie nicht von den Kalksteinen des Muschelkalk in der Tiefe unter den Kiesen unterscheiden kann. Die Gravimetrie reagiert hier primär auf die grundwassererfüllten und -durchflossenen unverfestigten Kiese geringer Dichte und zeigt im Messgebiet mit den stärksten negativen Schwereanomalien, wo sich die Orte mit den größten Transmissivitäten befinden.

3.7.3 Kluftporosität und Permeabilität/Transmissivität im Festgestein

Auf einer etwas anderen Ebene liegen Fragen zur Kluftporosität und hydraulischen Leitfähigkeit in Festgesteinen, die im Allgemeinen einen völlig anderen Charakter als die Parameter bei Matrixporosität haben und vielfach das hydraulische Geschehen in einem Aquifer bestimmen. Ein relativ einfacher Zugang mit der Oberflächengeophysik ist gegeben, wenn in tektonischen Auflockerungszonen stärker geklüftete Gesteine zu erhöhter Kluftporosität führen. Die seismischen Geschwindigkeiten reagieren mit deutlicher Geschwindigkeitsabnahme, die sich gut in Laufzeitkurven der Refraktionsseismik abzeichnen können. Geoelektrische Sondierungen, im Prinzip mit allen Methoden, reagieren ebenfalls

mit z. T. stark erniedrigten spezifischen Widerständen bei Wasserführung und vielfach durch Einspülung von Verwitterungslehmen. Stärkere Verwitterung in Kluftzonen von feldspatreichen Gesteinen (Kristallingesteine, Arkosen) kann zu erheblicher Kaolinitisierung und stärkeren Effekten bei Messungen der Induzierten Polarisation (IP) führen. Das wiederum kann ein geophysikalisches Signal für eher reduzierte Permeabilitäten selbst auf Bruchzonen sein, und selbst wasserarme Kluftzonen können durch solche Effekte zu guten elektrischen Leitern werden (Abb. 3.106).

Spezielle Messungen der Geoelektrik zur Kluftporosität basieren auf der Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit, die im Allgemeinen größer parallel zur Klüftung als senkrecht dazu ist, wobei eine vertikale Klüftung in einer Vorzugsrichtung zugrunde gelegt wird. Solche Messungen werden seit Ende der achtziger Jahre genutzt; ein neueres Beispiel zur Oberflächennahen Geothermie bringen Utama und Putra (2012). Die einfachste Umsetzung besteht in einer Drehsondierung (Azimuthal-Sondierung) mit einer Schlumberger- oder Dipolsondierung an einem festen Punkt und der Konstruktion einer Richtungsrose für den scheinbaren spezifischen Widerstand (Abb. 3.107). Bei einer Klüftungsanisotropie lassen sich eine Hauptachse und eine Nebenachse für größten

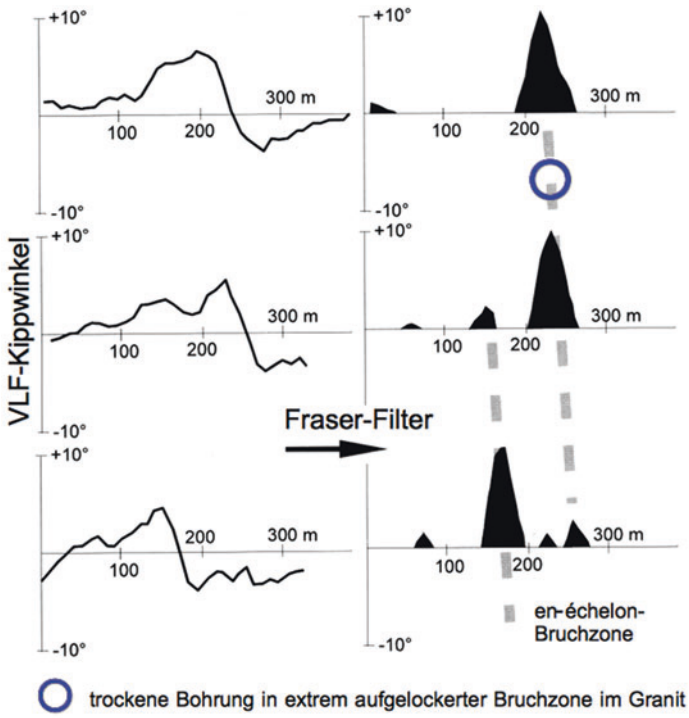


Abb. 3.106 VLF-Messung über Bruchzone im Granit. Die deutlichen und charakteristischen Plus-Minus-Anomalien signalisieren eine langgestreckte, elektrisch gut leitende Bruchzone im Kristallin. Die Bohrung durchteuft extrem aufgelockerten Granit mit Hohlräumen, bleibt aber trocken. Das Fraser-Filter überführt die originale VLF-Kippwinkelkurve in besser „lesbare“ Anomalien

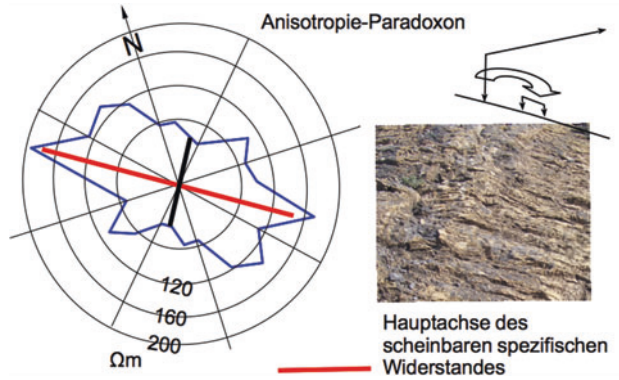


Abb. 3.107 Kluftporosität und geoelektrische Widerstandsdrehsondierung in Pol-Dipol-Anordnung. Der größte scheinbare spezifische Widerstand wird in Richtung der Klüftung gemessen (Anisotropie-Paradoxon)

und kleinsten scheinbaren spezifischen Widerstand definieren. Dabei ist ein überraschender Zusammenhang zu beachten, der als das *Anisotropie-Paradoxon* bezeichnet wird. Danach misst man den größten *scheinbaren* spezifischen Widerstand genau in Richtung des kleinsten *wahren* spezifischen Widerstandes, also in Richtung der vorausgesetzten Hauptkluftrichtung (Abb. 3.107). Selbst Geophysiker(innen), die eine solche Drehsondierung praktizieren, kennen dieses Paradoxon nicht unbedingt, die dann fälschlich eine um 90° gedrehte Klüftungsrichtung präsentieren. Eine Erweiterung zur geophysikalischen Ermittlung von Kluftporositäten und Klüftungsanisotropien stellt das weit aufwendigere *Square-Array*-Verfahren dar, bei dem die Elektroden A, B und M, N in den Eckpunkten eines Quadrats angeordnet werden, das an jedem Messpunkt um 45° rotiert. Dabei wird jeweils der scheinbare spezifische Widerstand gemessen. Aus den Messwerten kann graphisch oder analytisch die Streichrichtung der Klüftung bestimmt werden und mit einer komplizierten Formel über die Widerstandsanisotropie sogar die Kluftporosität berechnet werden. Mehr dazu steht bei Ernstson und Kirsch (2006), die betonen, dass allenfalls grobe Abschätzungen möglich sind und dass insbesondere Tonanteile im Gestein und Kluftverlehmungen zu falschen Ergebnissen führen.

Mit den geschilderten Möglichkeiten, Klüftungsporositäten und Klüftungsanisotropien geoelektrisch abzuschätzen, ist auch der einzige Weg aufgezeigt, hydraulische Leitfähigkeit und Transmissivität im geklüfteten Gestein grob qualitativ zu beurteilen, was keiner weiteren Erläuterung bedarf. Außer vielversprechenden Ansätzen mit dem Verfahren der nuklearen magnetischen Resonanz (NMR) (z. B. Kirsch und Yaramanci 2006) kann die Geophysik hier kaum mehr dazu beisteuern.

3.7.4 Grundwasserspiegel

Die Tiefe des Grundwasserspiegels und seine örtlichen und zeitlichen Schwankungen haben zweifellos eine große Bedeutung für die Oberflächennahe Geothermie. und stellen die Frage an die Geophysik, ob und in welchem Maße sie eine Alternative und/oder Ergänzung zu Bohrungen und Grundwassermessstellen und bei der Erstellung von Grundwassergleichenkarten bieten kann. Zunächst fraglos wichtig, aber in der Regel auch nicht

in Ansätzen in Erwägung gezogen, ist eine rasche und kostengünstige geophysikalische Vorerkundung für eine sinnvolle und aussagekräftige Platzierung von Grundwassermessstellen und Beobachtungsbrunnen. Mit Blick auf die geologische Karte und die allgemeine hydrogeologische Situation nach stark vereinfachenden hydrogeologischen Karten (siehe Abschn. 3.3.1) wird meist relativ willkürlich ein topographisch passender Ort ausgewählt, ohne die Möglichkeit einer geologischen und hydraulischen Singularität in Betracht zu ziehen, worauf eindringlich bereits im Abschn. 3.3.6 hingewiesen wurde. Hier soll es darüber hinaus um den Grundwasserspiegel selbst gehen. Es leuchtet ein, dass nur Verfahren der Seismik, der Geoelektrik und des Bodenradar infrage kommen, die einen geschichteten Untergrund untersuchen können.

Seismik

Die Möglichkeit, mit der Refraktionsseismik wegen der Zunahme der Geschwindigkeit beim Übergang von der ungesättigten in die gesättigte Zone die Tiefe des Grundwasserspiegels zu ermitteln, gehört seit Dekaden zum Lernstoff elementarer Seismik, vor allem in den Zeiten, als eine Reflexionsseismik nahe der Erdoberfläche noch nicht realisierbar war. Heute gehören gemeinsamer Einsatz von Refraktions- und Reflexionsseismik mit den ihnen jeweils eigenen Charakteristika sowie die Scherwellen-Seismik eher schon zum Standard und zielen auch auf verbesserte Methoden zur Bestimmung des Grundwasserspiegels (z. B. Grelle und Guadagno 2009). Fragt man nach den Erfolgsaussichten und der Präzision einer Seismik bei dieser Aufgabe, so gibt es deutlich mehr Einschränkungen als positive Aspekte. Im Festgestein mit den *a priori* höheren und höchsten seismischen Geschwindigkeiten und häufig komplexer Kluftporosität ergibt eine Seismik meist wenig Sinn. Aber auch im Lockergestein gibt es dann Probleme, wenn Zonen stärkerer Zementation (z. B. Nagelfluh in den Konglomeraten des Alpenvorlandes) über dem Grundwasserspiegel auftreten oder Tone und Geschiebemergel gleichhohe oder höhere Geschwindigkeiten als die wassergesättigten sandig-kiesigen Schichten besitzen. Grundsätzliche Probleme der Auswertung refraktionsseismischer Messungen wie die sogenannte überschossene Schicht (*hidden layer*) oder eingeschaltete Schichten erniedrigter Geschwindigkeit (*low-velocity layer*) können leicht zu erheblichen Tiefenfehlern führen, sofern nicht eine Eichbohrung zur Kontrolle vorliegt. Mit der Reflexionsseismik und der Teufengenauigkeit sieht es nicht viel besser aus. Bei oberflächennahen Grundwasserspiegeln sind die Geophonauslagen meist kurz und die Geschwindigkeitsbestimmungen aus Laufzeitkrümmungen und mithin Tiefenbestimmungen ungenau. Zusammengefasst und mit Blick auf hydraulische Belange von Grundwasserbewegung, Grundwasserspiegel und Grundwassergleichenplänen können keine großen Erwartungen an die Seismik gestellt werden.

Geoelektrische Widerstandsmessungen

Gemäß den Formeln aus dem Abschn. 3.5.1

$$\rho_G = (a/\Phi^m) \cdot \rho_w \cdot (1/{S_w}^n)$$

$$\rho_G = F \cdot \rho_w$$

$$\rho_G - F \cdot \rho_w \cdot 1/{S_w}^n$$

nimmt der spezifische Widerstand eines sandig-kiesigen Grundwasserleiters bei einem Exponenten $n = 2$ für die Wassersättigung S_w mit dem Quadrat eben dieser Wassersättigung ab. Abgesehen von dem theoretischen Fall von $S_w = 0$ einer praktisch nichtleitenden Gesteinsmatrix, reduziert sich der Gesteinswiderstand ρ_G drastisch von z. B. 10 000 $\Omega \cdot$ m bei 20 % Wassersättigung ($S_w = 0,2$) auf 400 $\Omega \cdot$ m bei vollständiger Sättigung ($S_w = 1$) und sonst gleichbleibenden Werten von beispielsweise $F = 8$ (Formationsfaktor) und $\rho_w = 50\,\Omega \cdot$ m (spezifischer Widerstand des Porenwassers). Tatsächlich ist bei Messungen im Gelände ein erheblicher Rückgang des Widerstandes festzustellen, wenn bei geoelektrischen Tiefensondierungen der Grundwasserspiegel erreicht wird, obgleich die genannten modellhaften Verhältnisse in dieser Einfachheit nie gegeben sind. Und daraus resultiert die einfache Feststellung: Auch wenn der Widerstandsrückgang am Computer mit Dezimeterangabe modelliert werden kann, ist die geoelektrische Tiefensondierung praktisch nie in der Lage, die Tiefe des Grundwasserspiegels auch nur mit annähernd hinreichender Genauigkeit zu ermitteln. Die Fehler der Tiefenbestimmung können im Bereich vieler Meter liegen, und daraus abgeleitete Grundwassergleichen sind reine Fantasieprodukte. Das hängt mit den stark wechselnden und damit unbekannten Widerständen in der ungesättigten Zone zusammen, was über das Äquivalenzprinzip (Abschn. 3.6.1) zu praktisch beliebigen Lösungen führt. Unglücklicherweise werden trotzdem solche Messungen angeboten, und selbst Regelwerke zur geotechnischen Standortuntersuchung (z. B. DIN 4020, *E* 1 – 3) führen in ihren Empfehlungen bei geoelektrischen Messungen unsinnigerweise den Grundwasserspiegel als Untersuchungsziel an. Bezeichnend für viele Missverständnisse und Fehlentwicklungen zwischen Geologie und Geophysik ist auch die Aussage eines erstaunten Geologen gegenüber dem Verfasser, dass überhaupt das Einzige, was er von seinem Studium an Erkenntnissen zur Geophysik behalten hat, die Grundwasserspiegel-Ermittlung mit der Geoelektrik sei.

Induzierte Polarisation

Bei komplexen Widerstandstiefensondierungen mit der Erfassung der induzierten Polarisation (IP) kann sich häufig der Grundwasserspiegel mit einem plötzlich einsetzenden Sprung der IP-Werte bemerkbar machen. Das überrascht nicht, da der IP-Effekt erst durch das Wasser im Porenraum entsteht und in der vadosen Zone offensichtlich eine geringere Rolle spielt. Abb. 3.108 zeigt ein solches Beispiel, das weitaus schärfer als der synchron gemessene scheinbare spezifische Widerstand auflöst. Für eine hinreichend genaue quantitative Auswertung fehlen zurzeit noch die Erfahrungen, aber hydraulische Zusammenhänge werden sichtbar. So scheint es hier ein generelles Schichtfallen mit vermuteten tektonischen Versätzen gegeben, dem der Grundwasserspiegel ebenfalls mit Versätzen folgt. Dem Widerstandsbild können vergleichbare Informationen nicht entnommen werden. Ein leicht zu interpretierendes Standardverfahren zur besseren Beurteilung hydraulischer Verhältnisse kann gegenwärtig damit nicht angeboten werden.

Bodenradar (Georadar, GPR)

In manchen Fällen erweist sich das Bodenradar in der Lage, den Grundwasserspiegel als einen relativ scharfen Reflektor aufzuzeigen,und vor allem in schluffarmen Kiesen

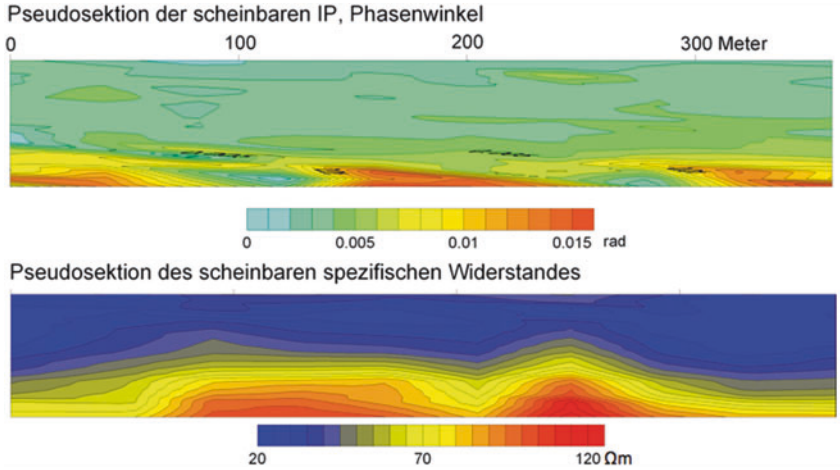


Abb. 3.108 Komplexe Widerstandsmessung (Electrical Imaging mit Schlumberger-Anordnung) über einer Wechselfolge des Unteren Keuper. In der Pseudosektion der IP scheint sich der Verlauf des Grundwasserspiegels relativ scharf abzuzeichnen

und Sanden kann es durchaus gute Ergebnisse zeitigen (Tronicke et al. 1999; Doolittle et al. 2006). Das hohe Auflösungsvermögen des Bodenradars im Bereich weniger Dezimeter kommt aber in vielen Fällen rasch an die Grenze zu geringer Eindringtiefe (siehe Abschn. 3.6.3). Das ist auch ein Handicap neu entwickelter Radar-Hochleistungsapparaturen, dass sie teilweise mehrere Dekameter Untersuchungstiefen erreichen, bei den dann niedrigen Antennenfrequenzen (Center Frequenzen) von nur 20–30 MHz aber ein hohes Auflösungsvermögen einbüßen. Ob mit solchen Hochleistungssystemen tiefere Grundwasserspiegel beispielsweise im Karst erreicht und aufgezeichnet werden können, muss abgewartet werden.

3.7.5 Grundwasserfließrichtung und Fließgeschwindigkeit

Grundwasserbewegungen sind grundsätzlich wichtig für alle Speichervorhaben der Oberflächennahen Geothermie, aber auch für Aquifere mit konkurrierender Nutzung für Geothermie und beispielsweise Trinkwassererschließung und -förderung. Nicht zuletzt hängt mit ihnen ein möglicher Transport von Kontaminationen zusammen. Bekannt sind verschiedene Markierungsverfahren mit Farbstoffen, radioaktiven Tracern, Sporen, Salzen, nicht pathogenen Bakterien und andere. Keines dieser Verfahren ist grundsätzlich unproblematisch. Nicht ganz unproblematisch ist auch das übliche Erstellen von Grundwassergleichenplänen aus Bohrungen in hydrologischen Dreiecken, worauf im Abschn. 3.3.6 hingewiesen wurde. Während alle Tracerverfahren und hydrologische Dreiecke den unmittelbaren Zugang zum Aquifer haben müssen, können sich Bewegungen des Grundwassers direkt physikalisch an der Erdoberfläche widerspiegeln, was in der Hydrogeologie so

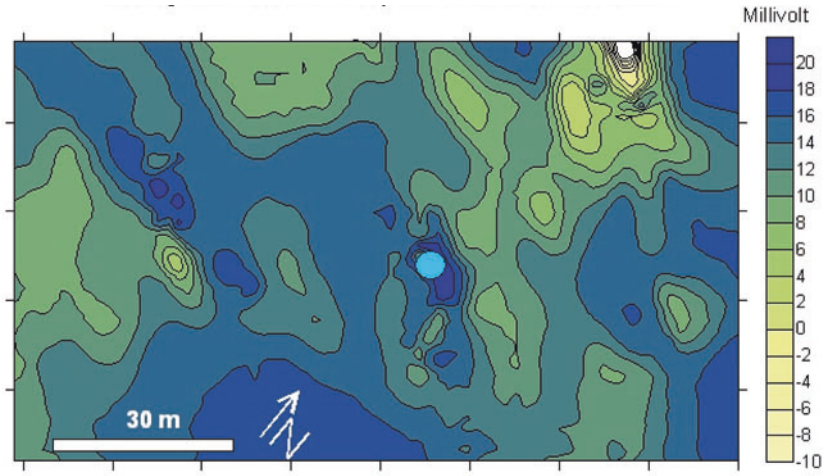


Abb. 3.109 Relativ positive Eigenpotential-Anomalien in Verbindung mit Grundwasser-Aufstiegszonen – bestätigt von der in der Bildmitte markierten Bohrung

gut wie unbekannt ist. Der Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Potential und dem elektrischen Potential von wasserdurchströmtem Porenraum (Matrixporosität, Kluftporosität) begründet das geoelektrische Eigenpotentialverfahren (SP-Verfahren), das im Abschn. 3.6.1 erläutert wird, moderne Weiterentwicklungen der Datenverarbeitung erfährt (Jardani et al. 2007) und durchaus vielfältige praktische Anwendung findet (z. B. Fagerlund und Heinson 2003; Jardani et al. 2006).

Solche Beispiele aus der Grundwassererkundung mit charakteristischen negativen und positiven SP-Anomalien für Infiltration, aufsteigende Wässer und normale Grundwasserströmungen zeigen Abb. 3.109 und 3.110.

Näher bei den Tracerverfahren angesiedelt sind aktive Messungen mit der *mise-à-la-masse*-Methode (Abschn. 3.6.1) oder generell mit geoelektrischen Widerstandsmessungen (White 2005; Pant 2004; Nimmer und Osiensky 2002). Voraussetzung ist, dass aktiv die Widerstandverhältnisse im Untergrund verändert werden, was meist dadurch geschieht, dass größere Mengen Salz oder Salzwasser über eine Bohrung oder über einen direkten Zugang (z. B. ein Ponor im Karst) dem Aquifer zugeführt werden. Flächig um die Eingabestelle mit der kontaktierenden Elektrode angeordnete Sonden registrieren dann die durch den Grundwasserstrom gerichtete Ausbreitung und die zeitliche Veränderung des neu initiierten Potentialfeldes.

3.7.6 Generelle Grundwasserbewegungen – indirekter Zugang

Vielfach gelingt es, kleinräumige Grundwasserbewegungen, die in der Oberflächennahen Geothermie von erheblicher Bedeutung sein können, indirekt mit der Geophysik

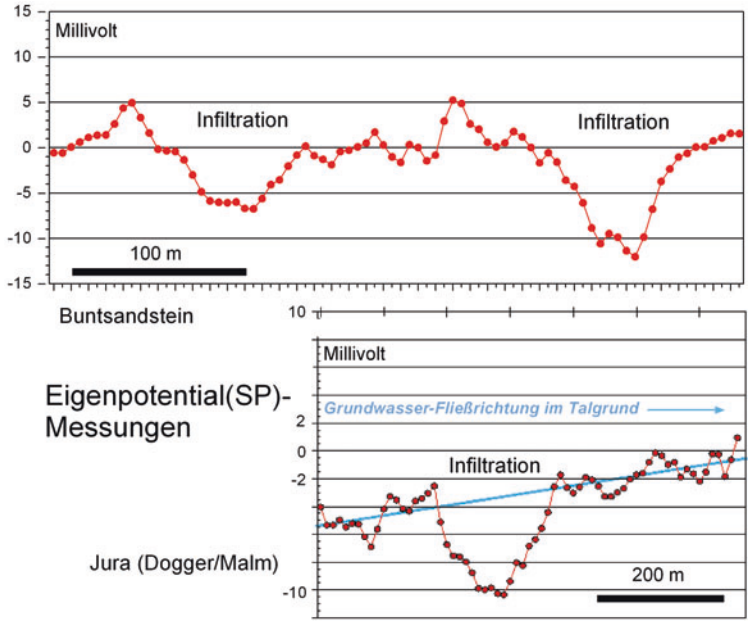


Abb. 3.110 Negative SP-Anomalien über Festgestein mit Grundwasserinfiltration in die Tiefe. Im unteren Beispiel zeigt sich zudem der überlagernde SP-Einfluss der normalen Grundwasserfließrichtung im Talgrund

aufzuzeigen, wenn nicht direkt das Wasser erfasst wird, sondern bevorzugte Wegsamkeiten gefunden werden. Im Beispiel der Abb. 3.111 zeichnet sich eine Rinne grundwasserführender quartärer Kiese, die in tertiäre Tone eingetieft ist, sehr scharf und detailliert in Widerstandsmessungen des Electrical Imaging ab. Sind solche Rinnen in ein Festgestein mit höheren spezifischen Widerständen als Grundwassergeringleiter eingetieft, ist meist eine einfache Refraktionsseismik besser geeignet.

3.8 Geophysik und geologisch-geotechnische Risiken bei der Oberflächennahen Geothermie

3.8.1 Tektonik

Die Tektonik gehört mit zu den verbreitetsten Risiken der Oberflächennahen Geothermie, was vor allem indirekt dahingehend zu verstehen ist, dass nicht unbedingt aktive Tektonik in ein Vorhaben der Geothermie eingreift (was z. B. beim Fall Staufen diskutiert wird, s. Abschn. 3.3.7), sondern dass eine Tektonik nicht erkannt wird, weil sie durch ein Raster weitabständiger Bohrungen fällt oder gar Einzelbohrungen zu sehr vertraut wird. Das kann im Hoch- und Tiefbau schon mal die Baukosten um eine Million Euro erhöhen

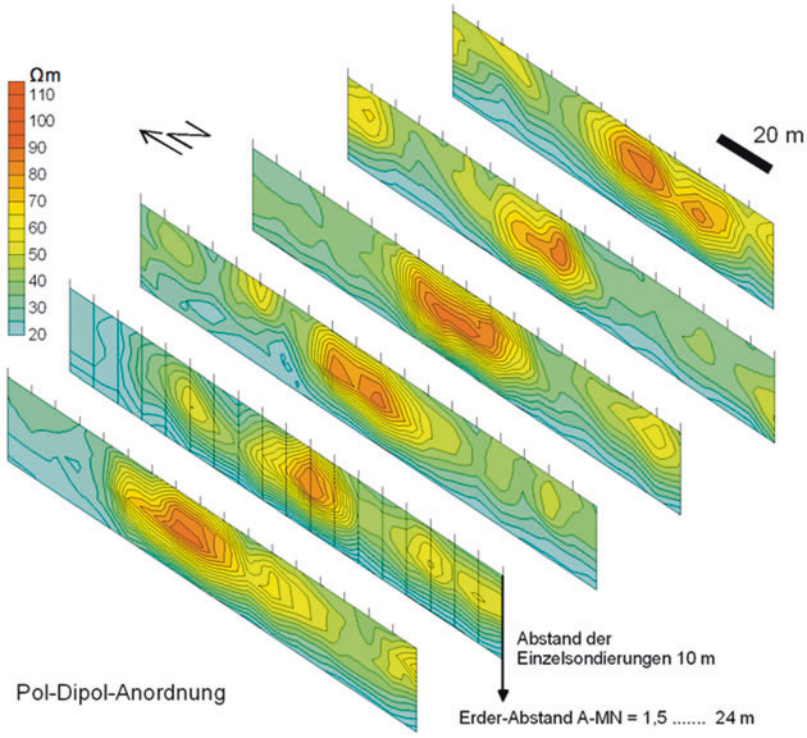


Abb. 3.111 Eine grundwasserführende Rinne aus quartären Kiesen mit hohen Widerständen ist in tertiäre Tone mit niedrigen Widerständen eingetieft. Die geoelektrischen Widerstandsmessungen vermitteln deutlich eine Kanalisierung der Grundwasserbewegung, die in diesem speziellen Fall auch einen Schadstofftransport nachweisen konnte

(wie im Abschn. 3.9.5 als instruktives Beispiel angeführt) und im Bereich der Oberflächennahen Geothermie vielfältige Auswirkungen haben, worauf bereits an mehreren Stellen hingewiesen wurde. Dazu gehören eine falsche Beurteilung hydraulischer Verhältnisse, Platzierung von Grundwassermessstellen und Beobachtungsbrunnen auf oder nahe bei tektonischen Singularitäten, unzulässige Extrapolationen von GRT-Bohrungen (Geothermal Response Test) und vieles mehr. Dabei ist es in den meisten Fällen ziemlich einfach, mit einer raschen Geophysik zumindest die gröbsten Irrtümer aufzudecken, die man im alleinigen Vertrauen auf Bohrungen zu begehen gedenkt. Das muss nicht immer eine anspruchsvolle Reflexionsseismik sein (Abb. 3.112), sondern kann z. B. auch in einer einfachen Anwendung der Radiowellen-Methode (VLF) bestehen (Abb. 3.113).

Wenn bei Oberflächennaher Bruchtektonik, mit der die Geothermie konfrontiert werden kann, im Allgemeinen an Verwerfungen im Festgestein gedacht wird, so wird vergessen, dass in geologisch jungen, aktiven Regionen mit z. T. mächtigen jungtertiären und quartären Lockergesteinsablagerungen, wie im Bereich der ungefalteten Molasse des

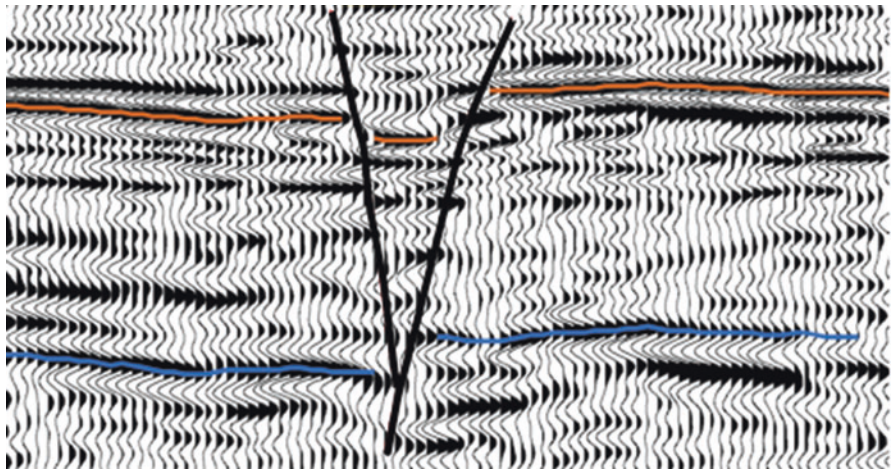


Abb. 3.112 Ausschnitt aus einer reflexionsseismischen Sektion mit Schichtverbiegungen und tektonischen Versätzen

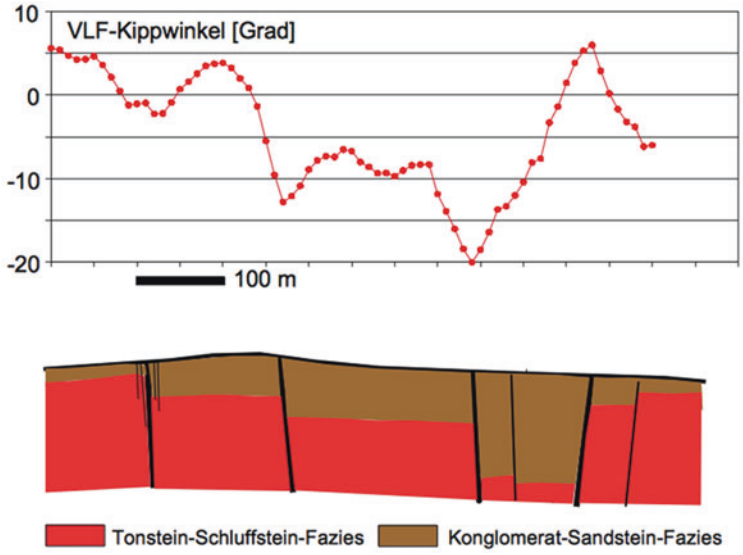


Abb. 3.113 Rasche und kostengünstige tektonische Übersichtskartierung mit der Radiowellen-Methode (VLF) und abgeleitetes sehr einfaches tektonisches Modell

Alpenvorlandes oder im Rheintalgraben mit seinen Randbecken, ebenfalls mit einer erheblichen Tektonik zu rechnen ist, die rezent anhalten kann. Nur ist diese Tektonik fast nie sichtbar, kaum kartierbar und durch Bohrungen schon gar nicht nachweisbar. Werden Versätze einmal in Aufschlüssen von Kiesgruben beobachtet, sind rasch Erklärungen wie Sackungen als Folge von Lösung oder Ausspülung o. ä. zur Hand. Das unterscheidet sich

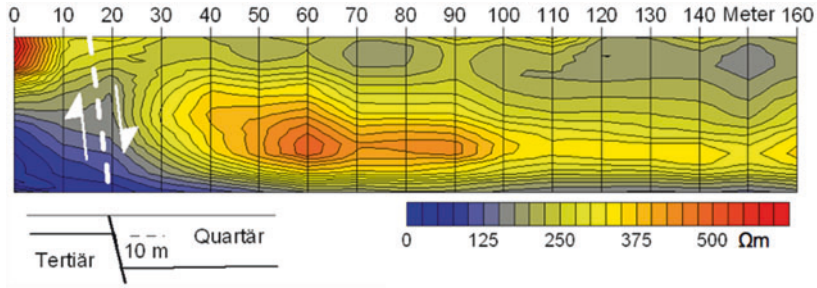


Abb. 3.114 Electrical Imaging, Pseudosektion des scheinbaren spezifischen Widerstandes zeigt sehr junge Bruchtektonik im Alpenvorland, die teilweise ins Pleistozän hineinreichen kann und möglicherweise rezent wirkt. Versätze betreffen den quartären kiesig-sandigen Grundwasserleiter über Mergeln der tertiären Süßwassermolasse. Der 10-m-Versatz leitet sich aus einer Modellierung der Sondierungskurven ab

von anderen Regionen Deutschlands, in denen quartäre und rezente Tektonik sich häufig an älteren, bekannten Strukturen des Festgesteins orientiert, oder eine Pseudotektonik infolge von Subrosion über Salinar oder generell an tiefere Tektonik assoziierte Salzbewegungen vorliegen (z. B. Lehné 2005). Echte Tektonik im jungen und jüngsten Lockermaterial „sieht“ im Allgemeinen nur die Geophysik (Abb. 3.114), und sie kann ganz wesentliche Beiträge liefern, wenn es um problematische, unverstandene und klärungsbedürftige hydraulische Verhältnisse geht.

3.8.2 Karst, Verkarstung

Im Rahmen der Oberflächennahen Geothermie bergen verkarstete Gebiete oder allgemein Verkarstungserscheinungen in zweierlei Hinsicht ein Risiko. Da ist einmal der technische Aspekt des Abteufens und Einrichtens von Bohrungen mit Einsturzgefahr bereits während des Bohrvorgangs oder später bei bereits existierenden Bohrungen mit installiertem Leitungsnetz. Eine Vorerkundung, die sich allein auf eine Testbohrung stützt, ist leicht mit Situationen der Abb. 3.115 und 3.116 konfrontiert, wo Bohraufschlüsse reine Zufallsergebnisse erbringen können. Der zweite Risikoaspekt betrifft die hydraulischen Verhältnisse in einem kontaktierten Karst-Aquifer mit unbekannten Strömungsverhältnissen bei gleichzeitig hohen Fließgeschwindigkeiten, was mit möglichen thermischen Beeinflussungen konkurrierender Nutzer und einer erhöhten Anfälligkeit für Kontamination einhergeht. Allgemein werden bekannte Karstareale von den Behörden als ungünstig für die Oberflächennahe Geothermie eingestuft, obgleich in Einzelfällen gerade Karst-Kluft-Aquifere wegen des erhöhten Wasseraufkommens und des hohen Wärmespeichervermögens bedeutend sein können. Hier geht die Frage an die Geophysik, wie und in welchem Umfang sie zur Klärung der geologischen, hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse und möglicher Risiken beitragen kann.

Abb. 3.115 Vom Überdeckungslehm freigelegte starke Verkarstung im Kalkstein

Die Abb. 3.115 und 3.116 machen zunächst ziemlich deutlich, dass allein mit Bohrungen meist wenig geholfen ist und diese erst Sinn ergeben, wenn sie gezielt nach einer vorherigen Geophysik abgeteuft werden. Außer der Geoelektrik mit Widerstandsondierungen und Messungen der Elektromagnetik sind grundsätzlich alle Methoden der Geophysik geeignet, den verkarsteten Untergrund zu untersuchen, was in jedem Einzelfall mit versierten Fachleuten aus Geologie und Hydrogeologie abzustimmen ist. Dabei können durchaus zunächst befremdlich erscheinende Verfahren wichtige Informationen liefern, wie das Beispiel in Abb. 3.117 mit dem Resultat von Magnetfeldmessungen deutlich macht. Über die Untersuchung und Entdeckung von Karsthöhlen im Schweizer Jura mit der Eigenpotentialmethode berichten Gurk und Bosch (2001), und ein Monitoring zeitlich sich ändernder Eigenpotentiale zur Untersuchung von sandigen Erdfällen als Wegsamkeiten für Grundwassererneuerung von Karst-Aquiferen beschreiben Bumpus und Kruse (2014). In einem ganzen Buch nur über die Eigenpotentialmethode (Revil und Jardani 2013) spielen auch Untersuchungen in Karstgebieten und generell Anwendungen bei Georisiken eine wichtige Rolle. Für seismische Messungen ist die Grundwassererkundung im Karst wegen der meist stark inhomogenen Oberflächenverhältnisse kein leichtes Kapitel; dennoch sollten ihre Möglichkeiten, vor allem in Kombination mit der Geoelektrik (Šumanovac und Weisser 2001) und der Gravimetrie ausgeschöpft werden.

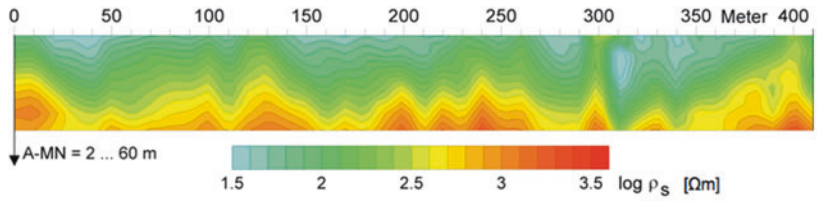


Abb. 3.116 Das geophysikalische Abbild der Verkarstung in Abb. 3.115 vor der Freilegung in einer Pseudosektion der Widerstandsmessung mit dem Electrical Imaging. Es vermittelt, dass Bohrungen ohne Geophysik reine Zufallsergebnisse produzieren würden

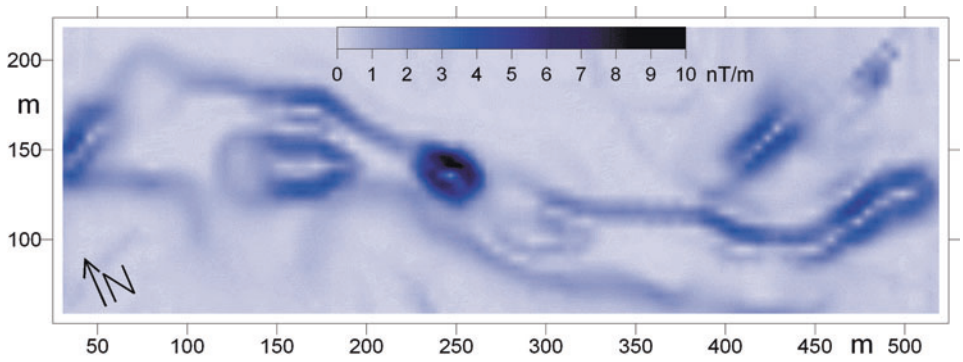


Abb. 3.117 Magnetfeldanomalien über lehmig-sandigen Spalten- und Schlottenfüllungen im verkarsteten Malm-Kalkstein: Horizontalgradient der Vertikalkomponente. Eine tektonische Kontrolle scheint gegeben

3.8.3 Salinar: Anhydrit und Gips

Das Thema Anhydrit und Gips ist im Prinzip beim Karst angesiedelt, wenn es um die Subrosion mit Hohlraumbildung und Erdfällen geht (Abb. 3.118). Das typische Beispiel in Abb. 3.118 mit Bodenradarmessungen aus dem Gipskeuper zeigt, dass mit der Geophysik auch ganz oberflächennah im Bereich der Installation von Erdwärmekollektoren und -körben risikobehaftete Zonen rasch aufgezeigt werden können.

Das besondere Georisiko bei der Oberflächennahen Geothermie liegt aber eher in Regionen mit normaler Schichtlagerung von Anhydrit und Gips, wie beispielsweise im Mittleren Muschelkalk und im Mittleren Keuper (Gipskeuper) Süddeutschlands oder in den Münder Mergeln des Oberen Jura Norddeutschlands, was im Abschn. 3.3.7 mit den Vorkommnissen in Staufen und im Landkreis Böblingen bereits angesprochen wurde. Die Diskussion von Staufen, ob fehlerhafte Bohrarbeiten oder auch tektonische Bewegungen das Unglück herbeigeführt haben, zeigt, wie man letztlich geologisch und geophysikalisch

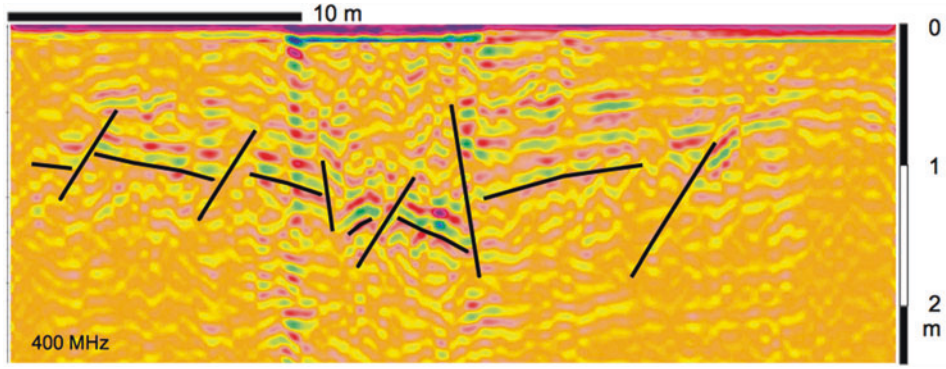


Abb. 3.118 Bodenradar: aktive Pseudotektonik durch Gipslösung in einem Erdfallgebiet

völlig unvorbereitet an die Installation der Geothermie herangegangen ist. Dass Lehren aus Staufen und Böblingen gezogen wurden und in stratigraphisch kritischen Abschnitten maximale Bohrtiefen über dem Anhydrit festgeschrieben werden und gegebenenfalls eine Erkundungsbohrung abzuteufen ist, geht das Grundproblem nur halbherzig an. Eine Bohrung zur Erkundung der stratigraphischen Position des Anhydrit sieht im Extremfall nicht, ob das Bohrprofil wegen einer markanten Tektonik 10 m daneben dort auch noch gilt. Und dass auch auf geologische Karten nicht unbedingt Verlass ist (siehe dazu auch Abschn. 3.3.1), hat eine Geophysik in nur rund 50 km Entfernung von Staufen bewiesen. Das dort im Raum Bad Dürrheim mit Geoelektrik und Gravimetrie aufgefundene intensive und ausgedehnte tektonischen Störungsmuster ist in der geologischen Karte mit nicht einer einzigen kartierten oder vermuteten Verwerfung berücksichtigt. Eine Geophysik im Vorfeld eines Geothermie-Vorhabens kann zweifelsohne nicht nachweisen, ob und in welcher Tiefe ein Anhydrit-Lager existiert, aber sie kann eine Tektonik aufzeigen und vor allem optimieren, wo gegebenenfalls eine Erkundungsbohrung sinnvoll anzusetzen ist. Inmitten bebauter Areale werden geoelektrische Messungen vielfach schwierig durchzuführen sein, aber seismischen Messungen und vor allem einer vergleichsweise kostengünstigen Gravimetrie steht nichts im Wege. Gerade die weithin unterschätzte Gravimetrie kann zeigen, wie ein unkonventionelles Herangehen an das Thema Salinar mit Gips und Anhydrit einschlägig wichtige Zusammenhänge deutlich macht, wie ein Beispiel aus einer subrosionsgefährdeten Region über Salinar-Vorkommen der Münder Mergel am Rand des Norddeutschen Beckens zeigt. Positive und negative Korrelation von Schwereanomalie und Geländeundulationen (Abb. 3.119) werden mit ganz unterschiedlichen

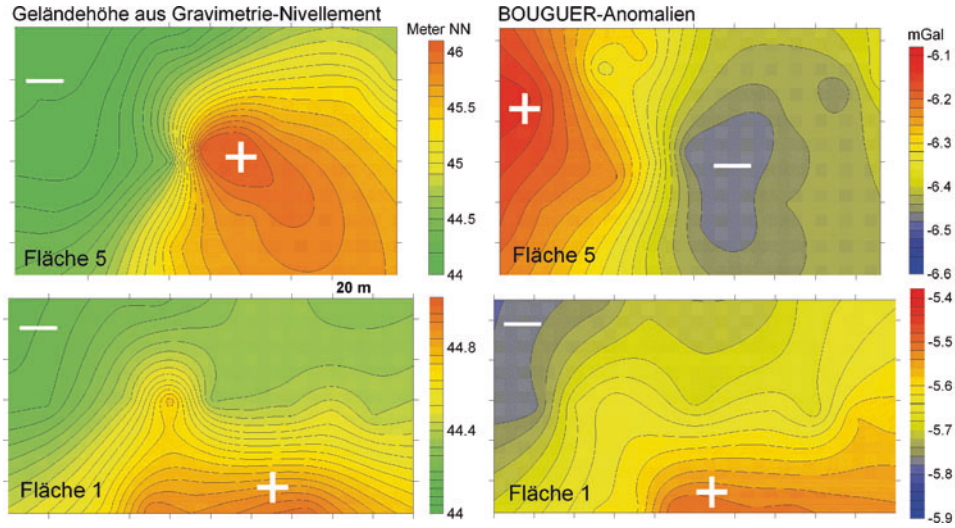


Abb. 3.119 Rezente Hebungen und Senkungen des Geländes, die mit Schwereanomalien der Gravimetrie korrelieren, werden durch stark unterschiedliche hydraulische Verhältnisse erklärt, die einerseits Subrosion durch Lösung und andererseits Anhydrit-Gips-Umwandlung mit Volumenvergrößerung fördern

tektonikbezogenen hydraulischen Konditionen mit Geländeabsenkung durch Subrosion und Geländehebung durch Anhydrit-Gips-Umwandlung bei erhöhter Wasserzufuhr erklärt. Da die Prozesse rezent ablaufen, sind Probleme mit dem Baugrund vorprogrammiert.

3.8.4 Hangrutsche

In den letzten zwei Dekaden hat es verstärkt Untersuchungen gegeben, um die Physik von Hangrutschen (Abb. 3.120, auch: Abb. 3.22) besser zu verstehen und geophysikalische Methoden für eine Charakterisierung und ein Monitoring ihrer Aktivitäten einzusetzen (z. B. Schmutz et al. 2009; Jongmans und Garambois 2007; Jongmans et al. 2000). Damit hat die Geophysik von Hangrutschen (Hangrutschungen, Erdrutschen) eine geologisch-örtliche und eine zeitliche Komponente, weshalb auch manchmal von 4D-Messungen die Rede ist. Wegen der entscheidenden Rolle, die ganz generell das Wasser dabei spielt, das meist als Trigger fungiert, liegt ein Schwerpunkt der geophysikalischen Messungen sicherlich bei der Geoelektrik mit Widerstandsmessungen, elektromagnetischen Sondierungen und immer wieder auch mit Eigenpotentialmessungen (Revil und Jardani 2013). Seismische Refraktionsmessungen mit Kompressions- und Scherwellen sind gut anwendbar, wenn es um die Kartierung des fest anstehenden Gesteins unter Lockersediment des potentiellen Hangrutsches geht. Im Fall der Abb. 3.120 hätte das keinen Sinn gegeben, da Festgestein (harter Rhätsandstein) über dem Feuerletten-Festgestein abgeglitten ist. Wesentlich aufwendiger, aber empfindlicher für Geschwindigkeitsänderungen im Bereich potentieller Gleitbahnen, ist eine seismische Tomographie. Auch die Registrierung seismischer Oberflächenwellen zur Ermittlung von Scherwellen-Geschwindigkeiten hat inzwischen eine gewisse Bedeutung erlangt. Untersuchungen der Gravimetrie wurden bemüht (Del Gaudio et al. 2000), haben aber selten vernünftige Resultate beitragen können.

Bodenradarmessungen haben in der jüngsten Vergangenheit erheblich an Bedeutung bei der Untersuchung von Hangrutschen zugenommen (z. B. Bichler et al. 2004), was mit

Abb. 3.120 Erdrutsche – ein geologisches Risiko für Erdwärmeanlagen

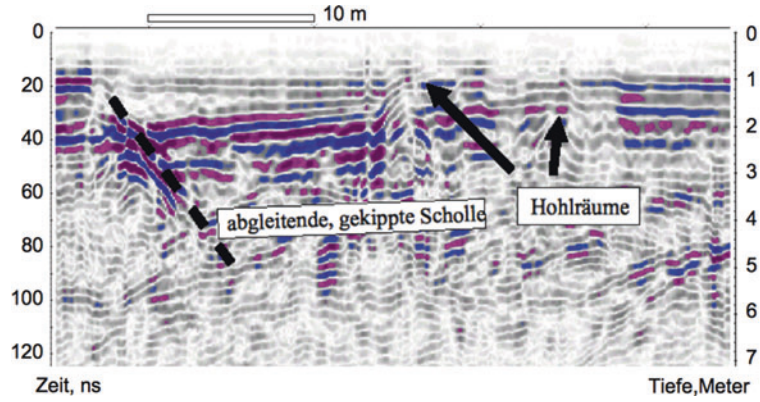


Abb. 3.121 Bodenradarmessung über einem Hangrutsch mit Schichtversätzen, Straßenunterspülung und Hohlraumbildung. Geologie: Rhät-Sandstein abgeglitten über Feuerletten (Knollenmergel, Mittlerer Keuper)

dem hohen Auflösungsvermögen und der Empfindlichkeit für den Wassergehalt im Untergrund zu begründen ist. Das Beispiel in Abb. 3.121 vermittelt, dass Bodenradarmessungen auch unmittelbar nach einem Hangrutsch wichtige Erkenntnisse zum Mechanismus des Abgleitens und für weitere Maßnahmen beibringen können.

3.8.5 Hohlraumortung

Erdfälle im Karst treten häufig ohne vorangehende Veränderungen an der Erdoberfläche und ohne jede Vorankündigung plötzlich auf (Abb. 3.122). Solch ein Einsturz im Rahmen der Oberflächennahen Geothermie gehört sicherlich zum Spektakulärsten und Unangenehmsten im Hinblick auf geplante oder bereits gebaute Erdwärmeanlagen. Nachweis von Hohlräumen im Untergrund ist eine häufig an die Geophysik herangetragene Aufgabe, wobei neben natürlichen, durch Subrosion entstandenen Hohlräumen auch Bergbauaktivität

Abb. 3.122 Frischer Einbruch über einem Karsthohlraum

oder andere anthropogene Einrichtungen wie z. B. Kelleranlagen oder unterirdische Gänge angesprochen sind.

Ein grundsätzliches Problem der Hohlraumortung mit der Geophysik ist ein physikalisches. Bei allen Verfahren, bei denen die Messgrößen aus einem Potential abgeleitet werden, gilt, dass ein Hohlraum nicht viel tiefer liegen darf, als sein Durchmesser beträgt, damit er bei einem akzeptablen Signal-Rausch-Verhältnis (siehe Abschn. 3.4.4) überhaupt noch erkannt wird (Abb. 3.123). Im berechneten Beispiel der Abb. 3.121 erzeugt der kugelförmige, mit Luft gefüllte Hohlraum bei optimalem Signal-Rausch-Verhältnis nur noch eine maximale Anomalie in Höhe des Auflösungsvermögens der besten Feldgravimeter, wenn der Mittelpunkt der Kugel in 4 m Tiefe liegt. Im Hinblick darauf und mit Blick auf das Foto in Abb. 3.115 zeigt sich, wie wenig sinnvoll in den meisten Fällen selbst eine Mikrogravimetrie zur Hohlraumortung über verkarstetem Untergrund ist. Trotzdem und unverständlicherweise findet man die Mikrogravimetrie regelmäßig bei Baugrunduntersuchungen im Verkehrswegebau ausgeschrieben.

Auch bei geoelektrischen Widerstandsmessungen nimmt die Wirkung selbst luftgefüllter Hohlräume bei dem theoretisch unendlich hohen Widerstandskontrast sehr rasch ab. Ergebnisse von Martínez-López (2011) über künstlich geschaffenen Hohlräumen zeigen,

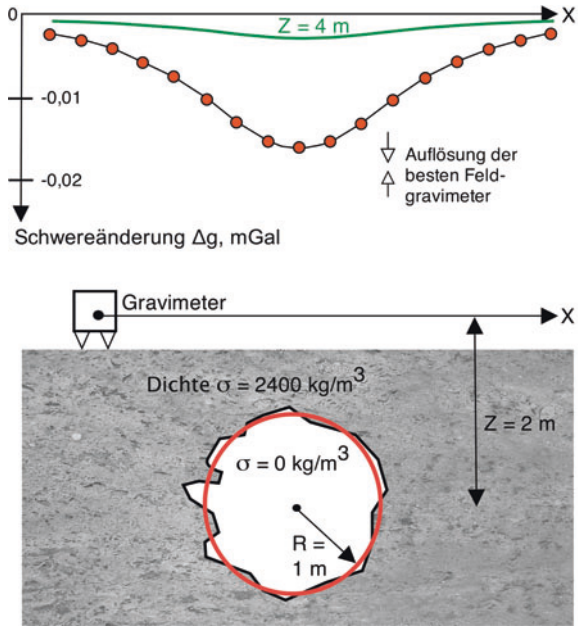


Abb. 3.123 Berechnete Schwerekurve über einem kugelförmigen Hohlraum mit 2 m Durchmesser unter ca. 1 m Überdeckung. Ein modernes, höchstempfindliches Gravimeter „sieht" diesen Hohlraum, erfasst ihn dagegen praktisch nicht mehr, wenn er sich 2 m tiefer befindet (grüne Kurve). Wassergefüllt, mit $\sigma = 1$ g/cm^3, ist er auch in der höheren Lage und bei einem angenommenen etwas erniedrigten Signal-Rausch-Verhältnis selbst mit der Mikrogravimetrie nicht messbar

dass diese mit verschiedenen Elektrodenkonfigurationen in einer Tiefe des 1,5fachen des Hohlraumdurchmessers lokalisiert werden konnten, wobei eine diesbezügliche Interpretation bei den gezeigten komplexen Widerstandsektionen sehr stark an die bekannte Lage und Dimension der Hohlräume orientiert erscheint. Überhaupt ist es das große Problem der Hohlraumortung mit der Geoelektrik, dass gutleitende Schichten in der Nachbarschaft, wie sie gerade in Karstregionen auftreten, die Potentialverteilung extrem stören und eine vernünftige Interpretation rasch unmöglich machen können.

Bei den Laufzeitverfahren der Seismik und des Bodenradar gibt es die Grenze des Auflösungsvermögens bei vorgegebener Signalfrequenz (siehe Abschn. 3.4.3). Hohlräume können sich in Radargrammen und Reflexionsseismogrammen in Form von Diffraktionen (Beugungshyperbeln) bemerkbar machen. Bei günstigen Bedingungen kann auch die refraktionsseismische Tomographie weiterhelfen, die in Kombination mit einer hochauflösenden Reflexionsseismik eine sogenannte Hybridseismik begründet (Frei 2011). Im Allgemeinen ist es aber so, dass die seismischen Messungen nicht einen Hohlraum an sich ansprechen, sondern mit einer Diffraktion auf eine scharfe Diskontinuität im Untergrund reagieren, die z. B. auch an einem Schichtabbruch auftreten kann. Dasselbe betrifft die Bodenradarmessungen, bei denen Diffraktionen durch verschiedene einzelne Objekte (Leitungen, große Steine) erzeugt werden können.

Eine neue Dimension der Hohlraumerkundung im tieferen Karst beginnt sich mit Neuentwicklungen sehr leistungsfähiger Georadar-Geräte abzuzeichnen (Abb. 3.88), die im schlechtleitenden Kalksteingebirge bisher kaum vorstellbare Eindringtiefen bis zu hundert Metern und mehr erreichen und große Karsthöhlen eindrucksvoll erkennen lassen (Abb. 3.124).

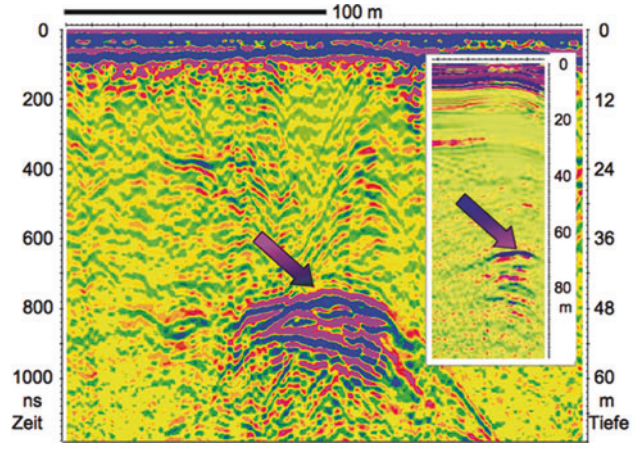


Abb. 3.124 Tiefe Georadarerkundung im Karst mit 25-MHz-Antenne. Der 45 m tiefe Hohlraum im Hauptbild ist wegen der Reflexionsfolge rot-blau mit Wasser/Lehm gefüllt, während es sich beim 65 m tiefen Hohlraum im Einschub wegen der Reflexionsfolge blau-rot um eine luftgefüllte Kaverne handelt. Über der Karsthöhle im Hauptbild markieren deutliche Diffraktionen markante Abbruch- und Einbruchstrukturen. (Quelle: Georadar RTG Tengler)

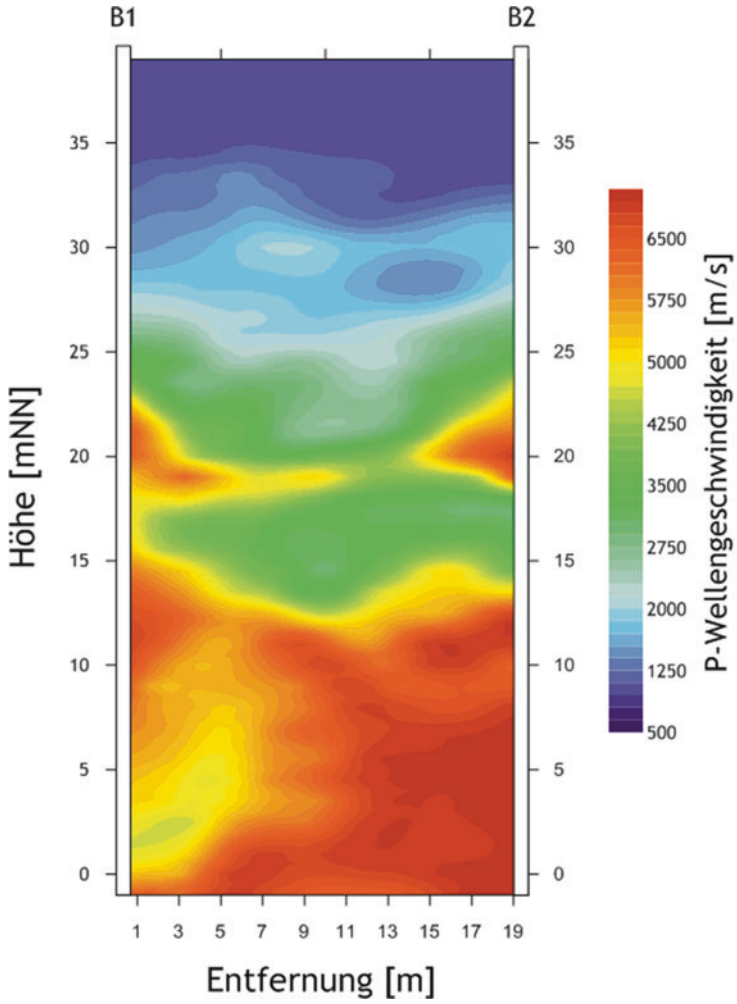


Abb. 3.125 Seismische Bohrloch-Tomographie zur Verfolgung eines Hohlraums, der in der Bohrung B2 zwischen 19 und 14 m angetroffen worden war. Geologie: Lockersedimente (blau) über verkarstetem Kalkstein. (Quelle: Geotomographie GmbH)

Näher heran an vermutete oder angetroffene Hohlräume gelangt man mit einer seismischen Bohrloch-Tomographie, was Abb. 3.125 an einem Beispiel vermittelt.

3.8.6 Altlasten

Das Risiko Altlasten hat für die Planung und den Bau von Erdwärmeanlagen eine nicht unerhebliche Bedeutung, die auch auf den Privatmenschen mit seinem Einfamilienhaus

und dem geplanten Einbau vom Erdwärmekollektoren und -körben zukommen kann, ganz zu schweigen von größeren Vorhaben mit tieferen Bohrungen und auf größeren Flächen. Die gesetzliche Lage ist pauschal relativ einfach und besagt, dass im Allgemeinen der Grundeigentümer für alles haftet, das als Gefahr von seinem Grund und Boden ausgehen könnte, und dass er diese Gefahr auf seine Kosten zu erkunden und zu beseitigen hat. Das kann eine Kontamination des Bodens durch Hausmüll oder industrielle Altlasten, durch Hinterlassenschaften der alliierten Besatzungstruppen, aber auch durch einzelne Kampfmittel wie Bombenblindgänger sein. Bei der Lokalisierung, Untersuchung und Sanierung von Altlasten jeder Art hat die Geophysik seit etwa Ende der achtziger Jahre eine nicht wegzudenkende Rolle gespielt. Bei der Oberflächennahen Geothermie spielen bekannte Altlasten wie z. B. Deponien (Hausmüll, gewerblicher Müll und industrielle Altlasten) indirekt nur insofern eine Rolle, als die hydraulischen Grundwasserverhältnisse durch Bohrungen und Brunnen Veränderungen erfahren könnten mit möglichen nachteiligen Folgen für konkurrierende Nutzer. Auf diese Themen wurde in den vorangegangenen Abschnitten eingegangen. Problematischer sind die Fälle, in denen für das Areal von Erdwärme-Installationen Altlasten vermutet werden oder in denen bei der Errichtung der Anlagen (Bohrungen, Leitungsbau) unbekannte Altlasten erst angetroffen werden.

Die Geophysik verfügt für derartige (Vor-)Untersuchungen meist geringmächtiger Ablagerungen über eine Reihe bewährter Messmethoden, mit denen auf kleinen und großen Flächen rasch und kostengünstig die Existenz oder Nichtexistenz gezeigt, gegebenenfalls die laterale und vertikale Dimension ermittelt sowie vielfach auch eine Differenzierung des deponierten Materials vorgenommen werden kann (Abb. 3.126–3.128). Es kommen vor allem verschiedene Messgeräte der Elektromagnetik (Frequenz- und Impulselektromagnetik) sowie Magnetometer zum Einsatz. Bodenradar kann in vielen Fällen ebenfalls hilfreich sein.

Es vergeht kaum ein Jahr, in dem die Medien nicht darüber berichten oder anderweitig bekannt wird, dass sich nach Fertigstellung eines Wohnhauses oder einer Industrie-/Gewerbeanlage herausstellt, dass direkt über einem Bombenblindgänger-Verdachtspunkt gebaut wurde. Entweder wurde versäumt, eine Luftbildauswertung vorher zu befragen, oder gegen Auflagen verstoßen. Beim Planen von Anlagen zur Oberflächennahen Geothermie ist das ebenfalls ein Thema, das selbst im kleinen Rahmen einer privaten Wärmekollektor-Anlage eine Rolle spielen kann (Abb. 3.129). Bei der Kampfmittelräumung wird unglücklicherweise noch immer an stark veralteten, geophysikfremden Vorstellungen festgehalten. Das ist vor allem den zuständigen Behörden vorzuwerfen, die eine Kampfmittelfreigabe von untersuchten Flächen immer noch aufgrund alleiniger Magnetfeldsondierungen praktizieren, obgleich hinlänglich die Physik bekannt ist, dass sich Bombenblindgänger in ungünstiger Lage und bei ungünstigem Signal-Rausch-Verhältnis dem Nachweis mit Magnetometern vollständig entziehen können. Dem Einsatz von Messungen der Elektromagnetik (Abb. 3.126), die dieser Einschränkung nicht unterliegt, wird an vielen Stellen immer noch mit Ablehnung begegnet.

Abb. 3.126 Typisches Equipment für Altlasten-Erkundung und Kampfmittelräumung. (Fotos: Ebinger GmbH)

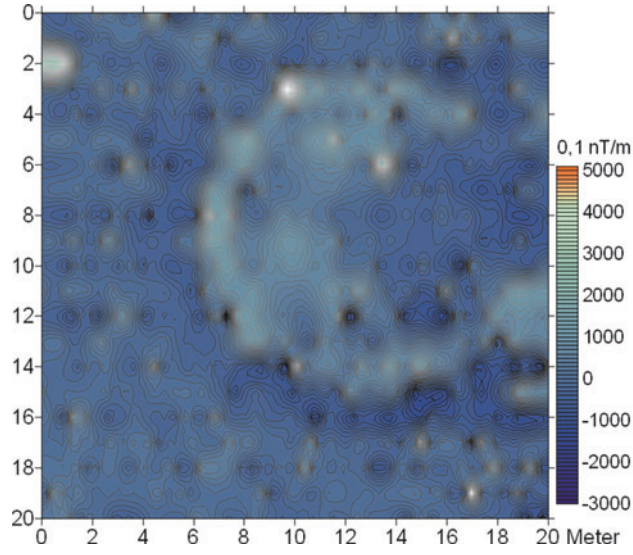


Abb. 3.127 Magnetfeldmessungen, Vertikalgradient der Vertikalkomponente, über eingeebnetem altem Sprengplatz – heute Ackerfläche. Das Grundwasser zeigt beginnende Kontamination

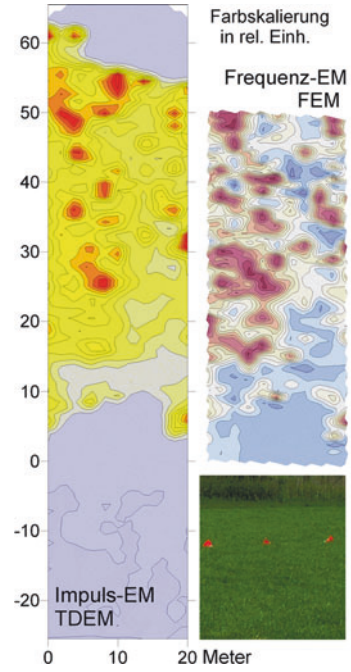


Abb. 3.128 Altlast unter grüner Wiese. Elektromagnetik mit TDEM und FEM grenzt das deponierte Material scharf ab. TDEM und FEM reagieren unterschiedlich auf das eingebrachte Material. (Datenquelle: Ebinger GmbH)

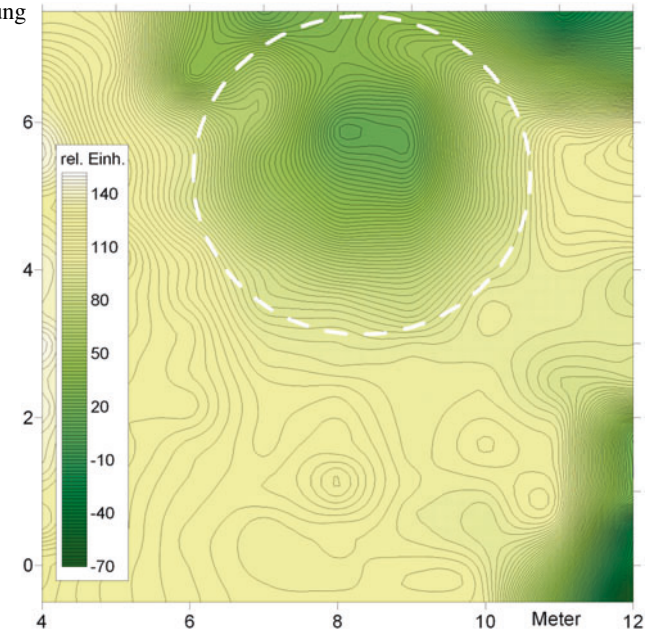


Abb. 3.129 Kampfmittelräumung im Vorgarten eines Hauses: Impulselektromagnetik TDEM über anschließend ausgegrabener 250-kg-Bombe in 3,5 m Tiefe. (Datenquelle: Ebinger GmbH)

3.9 Geophysik als Dienstleistung

3.9.1 Ingenieurgeophysik

Die Geophysik, von der hier geredet wird, wird häufig als Teil der sogenannten „Ingenieurgeophysik“ gesehen und genannt. Ingenieurgeophysik ist ein diffuser und im Prinzip nicht existierender, trotzdem eingebürgerter Begriff (deshalb die Anführungsstriche). Ingenieure oder Ingenieurinnen betreiben in aller Regel selbst keine Geophysik, und sehr viele Ingenieurbüros stehen der Geophysik eher ziemlich fern. Es gibt aus jüngerer Zeit das belegte Beispiel, dass ein leitender Ingenieur eines bekannten Büros den Begriff Geophysik und was sich damit verbindet nicht einmal kannte. Verbürgtes Zitat: „Und mit diesen Messungen können Sie in den Untergrund hineinschauen? “ An diese Stelle passt auch noch einmal der Hinweis aus der Einführung, dass in einem neu erschienenen Leitfaden zur Oberflächennahen Geothermie das Wort Geophysik auf 290 Seiten nicht ein einziges Mal genannt wird. Eigentlich meint Ingenieurgeophysik die oberflächennahe Geophysik als Dienstleistung, die vor allem von einschlägig tätigen Geophysikbüros betrieben wird. In diesem Rahmen ist dann sinnvollerweise auch eher der Begriff der Umweltgeophysik anzusiedeln.

Geophysik im Umweltbereich, und zu diesem Bereich wollen wir im weiteren Sinne auch die Oberflächennahe Geothermie zählen, ist als relativ junge Disziplin anzusehen und einschlägig kaum länger als dreißig Jahre in Erscheinung getreten. Dazu hatte man in der Geophysik kräftig um- und dazulernen müssen. Beschäftigte sie sich zuvor vor allem im Teufenbereich einiger 100 m und mehrerer Kilometer bis hinab in die Tiefen von Erdmantel und Erdkern, so musste sie plötzlich lernen, die Messmethoden und Auswerteprozeduren an den Teufenbereich weniger Dekameter und Meter anzupassen. Das ist seinerzeit in der Geophysik, insbesondere an Universitätsinstituten, nicht unbedingt mit Begeisterung aufgenommen und zunächst vielfach überhaupt nicht vollzogen worden. Das erklärt, warum sich diese oberflächennahe Geophysik ganz wesentlich aus der erfolgs- und einnahmeorientierten Landschaft der damals plötzlich entstehenden geophysikalischen Büros und nicht selten auch von „Seiteneinsteigern“ entwickelt hat und nicht in den geophysikalischen Instituten der Universitäten gewachsen ist – ein Konflikt, der bis heute nicht völlig aus der Welt geschafft ist und zu einer immer noch vielfach umstrittenen Position, um nicht zu sagen Wertschätzung der Geophysik generell in Rahmen der Umweltproblematik geführt hat.

Hinzu kommen vielerlei Missverständnisse. Insbesondere resultiert die umstrittene Position der Geophysik aus der immer wieder zu beobachtenden tiefgreifenden Unkenntnis auf Auftraggeberseite, gekoppelt mit der sehr häufig anzutreffenden Unkenntnis aufseiten der Ingenieur- und Geologiebüros, und sie beruht gleichermaßen auf der ebenso oft zu konstatierenden schlechten, nicht akzeptablen Arbeit, die von der Auftrag nehmenden Geophysik vorgelegt wird. Unglücklicherweise gibt es Rückkopplungen in diesem Apparat.

Bereits mit der Geophysik beschäftigte Leser(innen) werden angesichts der großen Fülle verschiedenster Messverfahren, von denen zuvor immerhin ein Überblick gegeben

wurde, bemerken, dass ihnen in der Praxis, vor allem im Dienstleistungsbereich, im Allgemeinen nur einige wenige Methoden begegnen. Es sind dies vor allem Seismik und geoelektrische Widerstandsmessungen, manchmal die Magnetik und zunehmend auch das Bodenradar. Weder aus physikalischer noch aus geologisch-geotechnischer Sicht ist das zwingend, und sicherlich ist die einfache Aussage gültig: Standardverfahren werden nur Standardsituationen gerecht. Aber gerade im komplexen Bereich der oberflächennahen Geophysik sind Standardsituationen kaum anzutreffen, und die Beschränkung auf wenige, hergebrachte Verfahren deckt auf, dass geophysikalische Messungen in einem Großteil von Projekten, wenn überhaupt, dann nicht optimal durchgeführt werden.

In der Oberflächennahen Geothermie geht es bei der Geophysik als Dienstleistung letztlich um einen wichtigen Beitrag zu einer Standortplanung, seien es einzelne Bohrungen oder Brunnen, seien es größere Areale, in denen die Gesamtheit der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse von Bedeutung ist. Im Einzelnen gehören dazu Aspekte, die in den vorhergehenden Abschnitten bereits ausführlich Thema waren: die Klärung der geologischen (stratigraphischen, lithologischen und strukturellen) Verhältnisse, die Ausbildung, Verbreitung und Mächtigkeit geologischer Barrieren, die Ausbildung, Verbreitung und Mächtigkeiten von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern, die hydraulische Trennung oder Verbindung von Grundwasserstockwerken, der Nachweis von Verwerfungen und Bruchzonen, die Bewegungen des Grundwassers, generell Befunde zu möglicher Grundwasserbeeinflussung bis hin zur Grundwassergefährdung, sowie geologische Risiken bei Projekten zur Geothermie. Mit geophysikalischen Messungen können dabei sehr häufig bereits in der Anfangsphase der Planungen ohne große Bohrarbeiten mit relativ geringem Aufwand grundsätzliche Daten geliefert werden, die viele Diskussionen rasch überflüssig machen oder – häufig bedeutsamer – wichtige Diskussionspunkte erst aufzeigen. Werden Aufschlussbohrungen notwendig, ist es meist günstig, vielfach zwingend, eine vorherige Geophysik zur Reduzierung der Anzahl der Bohrungen und zur Optimierung der Bohransatzpunkte durchzuführen.

3.9.2 Unzulänglichkeiten – ein geophysikalisches Beispiel

Stellvertretend für vielfach zu konstatierenden Unzulänglichkeiten bei der oberflächennahen Dienstleistungsgeophysik wird der folgende Komplex herangezogen: Teilweise mangelnde Kenntnis der Physik führt dazu, dass in der Geoelektrik Sondierungen mit *Multielektroden-Auslagen* beim Electrical Imaging bzw. bei der sogenannten Tomographie weitverbreitet praktiziert werden, obgleich es methodisch im Allgemeinen viel klüger ist, mit der Schlumberger- oder Pol-Dipol-Anordnung (Halbschlumberger-Anordnung) zu messen. Bei der Multielektroden-Auslage, die einfach vom Messtechniker mit Computersteuerung abzufragen ist, haben die Erder einen linearen Abstand, aber die Physik sagt, dass die Tiefenerkundung eine logarithmische Angelegenheit ist, die mit der logarithmischen Erderanordnung bei der Schlumberger- und Pol-Dipol-Messung perfekt angepasst wird. Hinzu kommt, dass – wie die Theorie zeigt – laterale wahre Widerstandsänderungen

im Bereich des engen Sondenpaares M-N einen weit größeren Einfluss auf den gemessenen scheinbaren spezifischen Wiederstand haben als gleichgeartete Änderungen bei den stromzuführenden Elektroden A, B. Das bedeutet ein schärferes Auflösungsvermögen für geologische Strukturen und letztlich bereits ein deutlich geologienäheres Bild der Pseudosektion, das ohne Modellierung und Inversion in reale Widerstandsschnitte vielfach bereits eine gute Näherung an die gewünschte geologische Information bereithält.

Natürlich geht die Messung mit der Multielektroden-Aufstellung bei Wenner- oder Dipol-Dipol-Anordnung rascher, führt aber auch zu den bekannten, geometrisch und aussagemäßig stark eingeschränkten Pseudosektionen in Trapez- oder sogar Dreiecksform (Abb. 3.130). Wenig geologisch ist auch vielfach der nächste, stark automatisierte Schritt der Inversion der gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstandsverteilung ρ_s in eine Verteilung der wahren spezifischen Gesteinswiderstände ρ. Mit der sogenannten „*smooth inversion technique*“ (z. B. Loke et al. 2003) wird die kontinuierliche ρ_s-Verteilung der Pseudosektion in eine „sanfte, glatte“ kontinuierliche, im Prinzip „ungeologische“ ρ-Widerstandsverteilung ohne Schicht- und Objektgrenzen überführt. Das kann zu der kuriosen Situation führen, dass in der Sektion Widerstandsisolinien quer durch interpretierte luftgefüllte Hohlräume verlaufen. Allerdings gibt es auch die Gruppe der Auswerteverfahren, die mit fest umrissenen Modellkörpern arbeiten. Diese Inversionen machen auf weitere Schwachpunkte der praktizierten 2D-Tomographie aufmerksam. Praktisch nie erfährt man beim Lesen von Berichten, wieweit denn mit Parallelprofilen eine Zweidimensionalität der Widerstandsverteilung im Untergrund überhaupt überprüft wurde

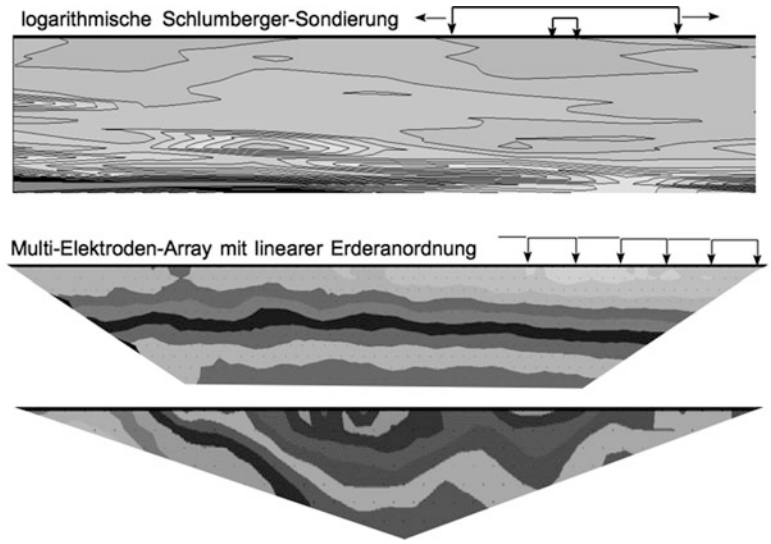


Abb. 3.130 Pseudosektionen des Electrical Imaging bei der Schlumberger-Anordnung mit einer rechteckigen Sektion sowie typischen trapez- und dreiecksförmigen Sektionen bei der Multielektrodenanordnung

und als Voraussetzung für die Computermodellierung erfüllt ist. Vor diesem Hintergrund ist es absolut müßig, bei der Inversion der Pseudosektionen auf einen geringen RMS-Fehler (*root mean square*) als Maß für die Güte der 2D-Inversion hinzuweisen. Ein kleiner RMS-Fehler verleitet eher dazu, mit weiteren Modellierungen aufzuhören und mit dem Resultat zufrieden zu sein. Das äußert sich in aller Regel so, dass kaum einmal eine Zweitlösung der Inversion vorgestellt wird, die bei deutlich anderer Widerstandsverteilung aber genauso gut mit der gemessenen Pseudosektion im Einklang steht. Damit einher geht der Vorwurf, dass fast generell die Mehrdeutigkeit von Lösungen der Widerstandsmodellierung ignoriert wird, die als Äquivalenzprinzip auch der 2D-Messung eigen ist. An dieser Stelle ergeht die Empfehlung, weniger Aufmerksamkeit einem kleinen RMS-Fehler der Anpassung zu schenken, der bei stärkeren Widerstandsänderungen rechts und links der Multielektrodenauslage ohnehin Makulatur ist, sondern mehr auf geologische Plausibilität und Verträglichkeit mit anderen Informationen zu achten.

3.9.3 Fehlerquellen und Fehler

Gemeinhin gehören zur Geophysik als Dienstleistung Messungen mit Messgeräten für physikalische Größen (z. B. Widerstände, Zeiten, Temperaturen, Stationshöhen). Sie werden im Gelände Messstationen zugeordnet, die wiederum ihrer Lage (Koordinaten X, Y) zuzuordnen und gegebenenfalls in Karten einzutragen sind. Wie bei jeder physikalischen Messung, ob mit einem Messgerät oder mit dem Maßband, sind die Resultate auch bei größter Sorgfalt und bei korrekt arbeitenden Messgeräten mit Fehlern behaftet. Über diese nicht vermeidbaren Fehler soll hier nicht geschrieben werden. Bei den Fehlern in der Geophysik, die vielfach schon bei der Planung gemacht werden, handelt es sich um offensichtlich vermeidbare Fehler, die schlechte oder falsche Ergebnisse zeitigen.

Das beginnt bereits bei der Festlegung von Messpunktabständen auf Profilen oder in Messrastern und kann u. U. fatale Auswirkungen bei der Abtastfrequenz (*sampling interval*) haben. Zu großer Messpunktabstand bzw. zu große Abtastfrequenzen bei der Digitalisierung analoger Messkurven führen zu Scheinanomalien, Scheinfrequenzen und allgemein zur Signalverfälschung. Zu großer Messpunktabstand oder ein zu grobes Messraster begründen ein scheinbar kostengünstiges Angebot, aber bringen sehr häufig vollkommen unsinnige Ergebnisse, mit denen der Auftraggeber zu leben hat, der sich nach dem günstigsten (billigsten!) Angebot gerichtet hat, was oftmals der Fall ist. Eine vorgegebene Fläche mit einem Messraster und Punktabstand von 10 m verringert die Kosten beim Geländeaufwand auf ein Viertel, wenn stattdessen ein 5 m-Raster angezeigt wäre. Ein konstruiertes Beispiel mit der Entstehung von Scheinanomalien durch ein sogenanntes *örtliches Aliasing* bringt Abb. 3.131. In der Abbildung ist eine Messkurve gezeichnet (schematisch, schwarz), wie man sie mit einem sehr engen Messpunktabstand korrekt erfassen würde. Bei zu großem Messpunktabstand kann sich je nach Wahl des Anfangspunktes eine positive (rot) oder negative (blau) Anomalie ergeben; beide sind Fantasieprodukte!

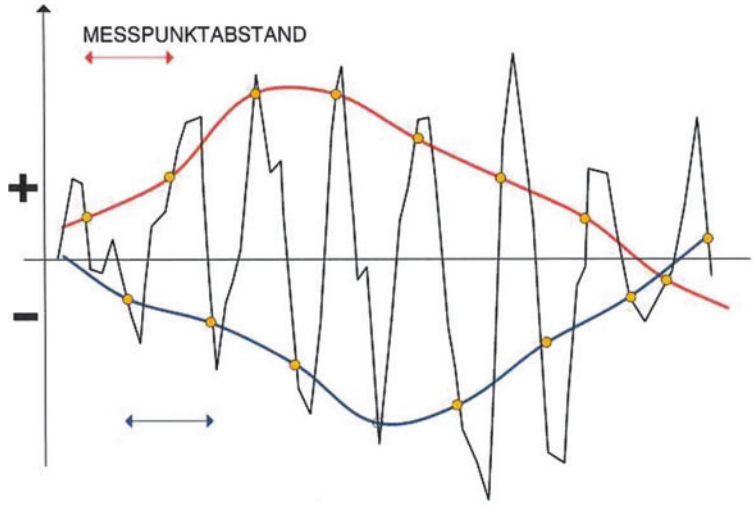


Abb. 3.131 Örtliches Aliasing durch zu grob gewähltes Messpunktraster führt zu Scheinanomalien als Fantasieprodukten

Eine Wahl der falschen Methode ergibt sich bei Unkenntnis der zutreffenden gesteinsphysikalischen Parameter und beim Fehlen geeigneter Apparaturen. Anbieter haben nicht selten nur ein sehr beschränktes Instrumentarium zur Verfügung, das sie für alle möglichen auftretenden Fragestellungen einsetzen wollen, mit zum Teil sehr fragwürdiger Vorgehensweise. Oberflächennahe Scherwellenseismik, die heute beinahe zu einem Standardverfahren geworden ist, gehört in manchen Fällen dazu, bei der zwar das technische Vorgehen und das höhere Auflösungsvermögen eindrucksvoll herausgestellt, aber die geologische Fragestellung überhaupt nicht verstanden wird. Unkenntnis der geologisch-physikalischen Zusammenhänge erleichtert solche Missgriffe, was selbst bei Geophysiker(inne)n anzutreffen ist. Ein typisches Beispiel dafür ist das Anisotropie-Paradoxon, das im Abschn. 3.7.3 (Abb. 3.105) erläutert wurde.

Über die fast stets zu beachtende *Mehrdeutigkeit von Messergebnissen* wurde in Abschn. 3.4.6 geschrieben. Hier wird darauf hingewiesen, dass diese Mehrdeutigkeiten sowohl bei der physikalischen Modellierung als auch bei der geologischen Interpretation sehr häufig und in vielen Berichten sträflich ignoriert werden. Damit einher geht die häufige *Überschätzung der Leistungsfähigkeit bestimmter Verfahren*, was teilweise geradezu abenteuerliche Einschätzungen von Möglichkeiten der Geophysik bei der Präsentation von Büros im Internet zeitigt. Das ist auch zu einem großen Problem beim immer stärker zunehmenden Einsatz des Bodenradar (Georadar) durch immer mehr Anwender ohne ausreichende Ausbildung, Kenntnis und Erfahrung geworden. Auf das Beispiel mit dem Grundwasserspiegel und der Geoelektrik wurde bereits im Abschn. 3.7.4 eingegangen. Hier wird wiederholt, dass die geoelektrische Tiefensondierung praktisch nie in der Lage ist, die Tiefe des Grundwasserspiegels auch nur mit annähernd hinreichender

Genauigkeit zu ermitteln. Die Fehler der Tiefenbestimmung liegen häufig im Bereich vieler Meter. Das hängt mit den stark wechselnden und damit unbekannten Widerständen in der ungesättigten Zone zusammen, was über das Äquivalenzprinzip zu praktisch beliebigen Lösungen führt. Vielfach resultieren Fehler bei der Anwendung der Geophysik aus einer Überschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit (des Anbieters). Firmenprospekte und Bedienungsanleitungen ersetzen kein gründliches Geophysikstudium und/oder eine langjährige Erfahrung, was besonders auffällt, wenn die geologische Interpretation ohne geologische Kenntnisse erfolgt ist.

3.9.4 Ausschreibungen, Berichte und Gutachten

Ein Dilemma mit der oberflächennahen Geophysik beginnt sehr häufig bereits mit der Ausschreibung. Sie wird in Ingenieur- und Geologiebüros formuliert, aber praktisch nie von Fachleuten mit geophysikalischem Sachverstand und Einfühlungsvermögen für sinnvolle, geeignete Messverfahren und die Möglichkeiten unkonventioneller Herangehensweise. Löbliche Ausnahmen sind allerdings immer wieder festzustellen und führen dann auch zu schönen Resultaten. Ergeht aufgrund einer Ausschreibung ein Auftrag, dann fast immer auf der Basis der Kosten. Dabei gilt, dass das billigste Angebot in aller Regel das schlechteste ist, wobei der Umkehrschluss keineswegs erlaubt ist.

Am anderen Ende stehen dann Berichte und Gutachten, bei denen folgende Mindestanforderungen gelten sollten:

- Dokumentation sämtlicher Original-Messdaten,
- Lagepläne,
- Beschreibung der Messverfahren,
- eingesetzte Messgeräte,
- Auswerteprozeduren (evtl. benutzte Software),
- fundierte geologisch-geotechnische Interpretation mit den Hinweisen auf und gegebenenfalls der Präsentation von Mehrfachlösungen.

3.9.5 Geophysik und Bohrungen

In der Vergangenheit und z. T. bis auf den heutigen Tag hat der Komplex Bohrungen/Sondierungen/Schürfe einerseits und geophysikalische Messungen andererseits zu Diskussionen, Missverständnissen und Irritationen geführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Charakteristika, Vor- und Nachteile zusammengestellt. Bohrungen/Sondierungen/Schürfe liefern teufengenaue Aufschlüsse mit hoher vertikaler Auflösung von Strukturen und erlauben eine meist teufengenaue Probennahme. Aber der teufengenaue Aufschluss sagt nichts über die Verhältnisse – im Extremfall nur wenige Dezimeter – neben der Bohrung aus. Nicht selten werden Bohrungen zu früh abgebrochen,

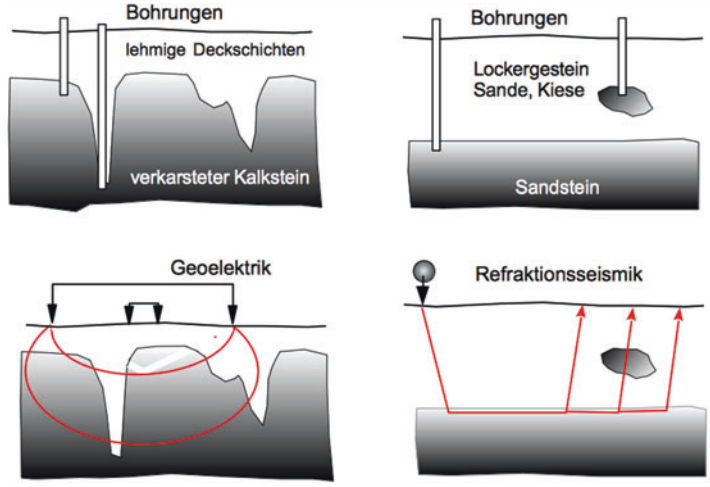


Abb. 3.132 Geophysik und Bohrungen. Links: Über verkarstetem Gebirge können zwei benachbarte Bohrungen mehrere Dekameter unterschiedliche Mächtigkeiten der Deckschichten anzeigen. Geoelektrische Widerstandstiefensondierungen integrieren über ein größeres Volumen und liefern eher mittlere Mächtigkeiten (siehe auch Abb. 3.115, 3.116). Rechts: Erratische Festgesteinsblöcke täuschen bei zu früh abgebrochenen Bohrungen das anstehende Festgestein vor. Eine Refraktionsseismik ignoriert den Block mehr oder weniger komplett und gibt die korrekte Tiefe

da der Bohrmeister einen angebohrten großen isolierten (erratischen) Block fälschlich für das anstehende Gestein hält (Abb. 3.132). Die teufengenaue Probennahme ist vielfach nur scheinbar teufengenau, da durch den Bohrvorgang Material vertikal verschleppt wird. Bohrungen verletzen den Untergrund und schaffen unerwünschte hydraulische Wegsamkeiten. Bei Bohrungen zum Einbringen von Erdwärmesonden oder für die Errichtung von Erdwärmepumpen droht diese Gefahr z. B. beim Durchteufen mehrerer Grundwasserstockwerke. Die Probenentnahme verändert in vielen Fällen das zu beprobende Material.

Messungen der Geophysik untersuchen zerstörungsfrei. Statt punktförmiger Aufschlüsse durch Bohrungen kann kontinuierlich beobachtet und über größere Volumina integriert werden (Abb. 3.132). Geophysikalische Messungen sind kostengünstig, und als Beispiel kann genannt werden, dass sich für die Kosten einer 100-m-Versuchsbohrung an größenordnungsmäßig 100 Stellen geoelektrische Tiefensondierungen mit derselben Untersuchungstiefe durchführen lassen. Andererseits liefern geophysikalische Messungen – insbesondere bei den Potentialverfahren – ungenaue Teufenangaben. Das vertikale Auflösungsvermögen – wiederum insbesondere bei den Potentialverfahren – ist gering. Die hohe Auflösung beim Bodenradar ist wegen der oft sehr geringen Eindringtiefe selten zu nutzen. Ergebnisse geophysikalischer Messungen führen sehr häufig zu Mehrdeutigkeiten, die allerdings durch komplexes Vorgehen, d. h. kombinierten Einsatz unterschiedlicher Verfahren, eingeschränkt werden können. An vielen Lokalitäten im oberflächennahen

Erkundungsbereich sind geophysikalische Messungen wegen vielfältiger Störfaktoren nur sehr bedingt und nicht selten gar nicht durchzuführen.

Die Zusammenstellung zeigt: Es ist absolut müßig, Bohrungen und Geophysik gegeneinander auszuspielen bzw. aufzurechnen; sie haben einen ganz unterschiedlichen methodischen Ansatz. Geophysik ist in eher seltenen Fällen als kostengünstiger Ersatz von Bohrungen anzusehen. Die Charakteristika von direktem Aufschluss durch Bohrung und indirekter Erkundung durch die Geophysik sind eminent verschieden. In einem Projekt sind gegebenenfalls Bohrungen/Sondierungen/Schürfe und Geophysik umfangmäßig, zeitlich und kostenmäßig aufeinander abzustimmen. Es kann sinnvoll sein, geophysikalische Messungen nach niedergebrachten Aufschlüssen durchzuführen. In der Regel wird es klüger sein, zuvor eine geophysikalische Kampagne zu starten, um die Bohrungen nach den Ergebnissen der Geophysik sinnvoll platziert zu setzen. Geschickte Kombination ermöglicht den Anschluss geophysikalischer Profile oder Messnetze an die Bohrungen zur nachträglichen Eichung der Auswertung.

Als krasse aber auch typische Beispiele von Ingenieurbüro-Fehlleistungen sind zwei Fälle zu nennen: Im rheinischen Bergbaurevier wurde auf einem Gelände nach einem vermuteten, möglicherweise verschütteten alten Schacht gesucht. Nachdem achtundneunzig tiefere Bohrungen kein Resultat erbracht hatten, erinnerte sich ein Beteiligter an die Möglichkeiten einer geophysikalischen Erkundung. Es ist nicht überliefert, ob ein solcher Einsatz zum Ziel geführt hat; aber allein die Möglichkeit, vorab mit einer kostengünstigen Geophysik „Ungereimtheiten“ im Untergrund festzustellen und mit einigen wenigen Bohrungen anschließend gezielt der Sache nachzugehen, wurde vertan. Nicht selten ist genau dieses Aufzäumen des Pferdes von hinten bei Ingenieurleistungen zu konstatieren: Erst wenn alle Bohrungen zu keinem schlüssigen Resultat gekommen sind, erinnert man sich vielleicht der Geophysik. Beim zweiten Fall wäre auch das zu spät gekommen. Beim Neubau einer Fachhochschule, weit fortgeschritten, wird plötzlich eine geologische Verwerfungszone im Baubereich festgestellt, was zu Mehrkosten von letztlich einer Million Euro führt (Pressemitteilungen 2009). Nach Auskunft der Verantwortlichen vom Bauamt sei diese markante geologische Störung unvorhersehbar durch das Bohrraster der Baugrunderkundung des Ingenieurbüros gefallen (verschiedene Pressemitteilungen 2010). Bei den gegebenen, im Prinzip gut bekannten geologischen Lagerungsverhältnissen hätte eine vorherige Geophysik auf dem Baugrund die Verwerfung zu einem vergleichsweise minimalen Kostenaufwand für einen Tag Messungen „vorhergesehen“. Eine wichtige Verknüpfung von Bohrungen und Geophysik stellen die geophysikalischen Bohrlochmessungen dar, über die Kap. 18 informiert.

3.9.6 Zum Thema Wünschelrute, Erdstrahlen und Verwandtes

Man wird vielleicht überrascht sein, dass in einem modernen, der Wissenschaft und Technik verpflichteten Handbuch zur Geothermie dieses Thema angeschnitten wird. Das hat

seinen Grund. Der Einfluss von Esoterik mit Wünschelrutengehen, Pendeln und anderen obskuren Praktiken auf allen Ebenen menschlichen Zusammenlebens ist ungebrochen. Wenn ein Bürgermeister einem Scharlatan drei ominöse „Abwehrkästen" für 2000 Euro abkauft, damit die von diesem „gemuteten" Erdstrahlen nicht länger zu Unfällen auf der Straße führen (Pressemitteilungen 2015), dann muss es auch nicht verwundern, wenn regelmäßig Bürgermeister und Bürgermeisterinnen Brunnenbohrungen durch Rutengänger festlegen lassen. Das betrifft durchaus auch die Oberflächennahe Geothermie. Dazu gehört auch das Projekt einer 200 m tiefen Geothermiebohrung, die – trocken und damit erfolglos – nach Ansicht eines Rutengängers an der falschen Stelle platziert war. Seiner „Mutung" zufolge würde in nur 100 m Entfernung 70°C heißes Wasser in 150 m Tiefe angetroffen werden, was bei den Stadtoberen erhebliche Aufregung verursachte. Zum Thema gehört, dass der Oberbürgermeister einer anderen Stadt vor nicht allzu langer Zeit einen Rutengänger mit dem Hubschrauber einfliegen ließ, der von der Plattform einer ausgefahrenen Feuerwehrleiter den Ansatzpunkt für eine Geothermiebohrung aus der Höhe „mutete". In Bezug auf Stadt- oder Gemeindeobere mag man das für „spleenig" halten, obgleich der Steuerzahler nicht nur für das Honorar sondern auch für Fehlbohrungen aufkommen muss; aber selbst Ingenieure von Ingenieurbüros und Geologen von Ämtern praktizieren das Rutengehen oder lassen es „zur Kontrolle" von Rutengängern praktizieren. Und immer wieder kommt es vor, dass bei einer geophysikalischen Erkundung der geologischen Strukturen mit der Empfehlung für einen Bohransatz anschließend der Rutengänger oder die Rutengängerin gegen Honorar beauftragt werden, durchaus mit Zustimmung des Ingenieurbüros, die Geophysik „zu überprüfen" und den „genauen" Punkt für die Bohrung zu markieren. Dabei geschieht es dann, dass der „genaue" Punkt an einer geologisch unsinnigen Stelle zu einer trockenen Bohrung führt.

Nach vielen, neuen und neuesten Untersuchungen, zu denen sich eine große Zahl von Rutengängern bereit erklärt hat, steht in der Meinung der damit befassten Tester aus vielen Ländern der Erde fest: Über 95 % aller Rutengänger liefern reine Zufallsergebnisse. Bei den ganz wenigen restlichen bleibt völlig unklar, ob überhaupt ein Zusammenhang der Reaktionen mit dem Wasser besteht. In nicht einem einzigen Fall ist ein solcher Zusammenhang bisher bewiesen worden, zumal aus medizinischer Sicht der „Ruten-Effekt" längst anders plausibel erklärt werden kann.

„Erfahrene" Rutengänger kennen sich durchaus mit geologischen und topographischen Karten aus, und wenn Rutengänger durchaus einmal in einer von ihnen vorgeschlagenen Bohrung zu aller Überraschung ziemlich präzise die Tiefe des Wasserzuflusses „vorhergesagt" haben, stellt man rasch fest, dass das nach der topographischen Karte genau dem nahegelegenen Vorfluter entspricht. Eingedenk der Einbindung des Wünschelrutengehens in die esoterische Szene gehen immer mehr Rutengänger dazu über, sich einen pseudowissenschaftlichen Anstrich zu geben, indem sie sich technisch aussehender Apparate bedienen und selbst konstruierte Formulare und Nomogramme für eine Art Auswertung ausfüllen. Das soll vermutlich Nähe zu Messungen der Geophysik und eine gewisse Exaktheit suggerieren, ändert aber nichts an der Zufälligkeit der Ergebnisse und letztlich

an der Erfolglosigkeit. Der „Dienstleistung Rutengehen“, auch in der Oberflächennahen Geothermie, wird das vermutlich nicht so rasch Abbruch tun.

3.10 Schlussbemerkungen

Im einleitenden Abschn. 3.1 wurde gesagt, dass das Kapitel zu den geologischen und geophysikalischen Untersuchungen weder als ein Lehrbuch für Geologie noch als eines für Geophysik zu verstehen sei und dass beim Lesen keine Berge von geologischem und geophysikalischem Fachwissen aufgetürmt werden sollen. Dennoch wurde hier versucht, eine große Menge über Geologie und Geophysik zu schreiben, in einem Umfang, der – so werden es Kundige der Materie vielleicht empfinden – deutlich über das hinauszugehen scheint, was mit einem eng gefassten Begriff „Oberflächennahe Geothermie“ zu verbinden ist. Das ist beabsichtigt und greift noch einmal die Anmerkungen des Einführungsabschnittes auf, dass die Oberflächennahe Geothermie in erster Linie ingenieurmäßig beim Baugrund angesiedelt und kaum einmal als ein geologischer Komplex verstanden wird, der mit anerkannten geowissenschaftlichen Methoden vornehmlich der Geologie und Geophysik zu untersuchen ist. Es ist die Absicht gewesen, den Verantwortlichen und Ausführenden nicht nur in Projekten der Oberflächennahen Geothermie sondern gleichermaßen in verwandten Bereichen die Augen zu öffnen für das enorme Potential, das die Geophysik in Verbindung mit der Geologie, Hydrogeologie und Hydraulik für Lösungsansätze und Lösungen bei einschlägig vorhersehbaren und bereits eingetretenen Problemen, aber vor allen Dingen selbst bei ganz normalen Abläufen von Planung und Ausführung bereithält. Augen öffnen: Das ist der Grund, warum in den vorangegangenen Abschnitten auch ein großer Wert darauf gelegt wurde, Geologie und Geophysik durch eine Menge verschiedenster Szenarien, sei es in Form von Fotos, sei es in Form eindrucksvoller Bilder des digitalen Geländemodells, sei es durch eine Zusammenstellung der so vielfältigen geophysikalischen Geländeprozeduren mit aussagekräftigen Resultaten, zu vermitteln.

Verständlicherweise haben nicht alle Verfahren gleichgroße Bedeutung. Vorrangig sind die sehr variabel praktizierbaren geoelektrischen Methoden und die Seismik mit ihren eindrucksvollen neuen Möglichkeiten der oberflächennahen Erkundung zu nennen, und die Gravimetrie als Potentialverfahren sollte als ein wichtiges Standardwerkzeug der Geophysik keineswegs unterschätzt werden. Aber auch die Geomagnetik und die elektromagnetischen Impulsverfahren z. B. bei der Altlastenerkundung, selbst die Eigenpotentialmethode und das *mise-à-la-masse*-Verfahren bei Fragen der Grundwasserhydraulik, haben ihre Berechtigung, wenn noch einmal konstatiert wird, dass Standardverfahren auch nur Standardsituationen gerecht werden können.

Auch das ist abschließend mit Bezug auf den Einführungsabschnitt und zudem im Hinblick auf den Appell des Autors aus dem *Handbuch Tiefe Geothermie* zu wiederholen: Die vorangegangenen Ausführungen sollen nicht zuletzt als ein Plädoyer für

eine größere, vielfach vermisste Harmonie zwischen Geologie und Geophysik, hier insbesondere auch unter Einbeziehung des Ingenieurwesens mit Ingenieurgeologie und Geotechnik, verstanden werden.

Literatur

Attwa, M., Günther, T.: Spectral induced polarization measurements for predicting the hydraulic conductivity in sandy aquifers. Hydrol. Earth Syst. Sci. **17**, 4079–4094 (2013)

Barton, N.: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, S. 729. Taylor & Francis/Balkema, Leiden (2007)

Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.): Handbuch Tiefe Geothermie, S. 854. Springer, Berlin (2014)

Bayerisches Landesamt für Umwelt: Hydrogeologische Karte 1 : 50 000 L5932 Lichtenfels (2009)

Bichler, A., Bobrowsky, P., Best, M., Douma, M., Hunter, J., Calvert, T., Burns R.: Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: The Quesnel Forks landslide.Landslides, **1**(1), 29–40 (2004)

Bißmann, S., Kahnt, R.: Reflexionsseismische Exploration. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, S. 81–123. Springer, Berlin (2014)

Brenner, O., Rübel, H.-J.: Bohrlochgeophysik. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H, Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, S. 337–363. Springer, Berlin (2014)

Bumpus, P. B., Kruse, S. E.: Self-potential monitoring for hydrologic investigations in urban covered-karst terrain. Geophysics **79**(6), B231–B242 (2014)

Büttner, G.: Geologische Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 5928 Obertheres. Bayer. Geol. LA, München (1989)

Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., Binley, A. M.: A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. J. Applied Geophys. **59**, 244–259 (2006)

Cless, B.: Heat transport in very shallow open geothermal systems. Masterarbeit. ETH Zürich, Zürich (2012)

Coscia, I., Linde, N., Greenhalgh, S., Vogt, T., Green, A.: Estimating traveltimes and groundwater flow patterns using 3D time-lapse crosshole ERT imaging of electrical resistivity fluctuations induced by infiltrating river water. Geophysics **77**(4), E239–E250 (2012)

Del Gaudio, V., Wasowski, J., Pierri, P., Masci, U., Calcagnile G.: Gravimetric study of a retrogressive landslide in Southern Italy. Surveys in Geophys. **21**, 391–399 (2000)

De Paly, M., Hecht-Méndez, J., Beck, M., Blum. P., Zell, A., Bayer, P.: Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using linear programming. Geothermics **43**, 57–65 (2012)

Dey, A. K., Stewart, R. R.: Predicting density using Vs and Gardner's relationship. CREWES Research Report **9**, 6.1–6.9 (1997)

Doolittle, J. A., Jenkinson, B., Hopkins, D., Ulmer, M., Tuttle, W.: Hydropedological investigations with ground-penetrating radar(GPR): Estimating water-table depths and local ground-waterflow pattern in areas of coarse-textured soils. Geoderma **131**, 317–329 (2006)

Dupuis, J. C., Butler, K. E., Kepic, A. W.: Seismoelectric imaging of the vadose zone of a sand aquifer. Geophysics **72**, A81–A85 (2007)

Ernstson, K.: Geologische und geophysikalische Untersuchungen. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, S. 20–80. Springer, Berlin (2014)

Ernstson, K., Kirsch, R.: Geoelectrical methods. In: Kirsch, R. (Hrsg.) Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology, S. 85–108. Springer, Berlin (2006)

Ernstson, K., Kirsch, R.: Aquifer structures: Fracture zones and caves. In: Kirsch, R. (Hrsg.) Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology, S. 395–422. Springer, Berlin (2006)
Ernstson, K., Scherer, H. U.: Self-potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters. Geophysics **51**, 1967–1977 (1986)
Everett, M. E.: Near-Surface Applied Geophysics, S. 403. Cambridge University Press, Cambridge (2013)
Fagerlund, F., Heinson, G.: Detecting sub-surface groundwater flow in fractured rock using Self-Potential (SP) methods. Environmental Geology **43**(7), 782–794 (2003)
Feld, H.: Geologische Kartierung 1 : 10 000 am N-Rand der Bodenwöhrer Senke in der Umgebung von Pingarten und Windmais. Erläuterungen mit speziellen Untersuchungen der Geomagnetik, der Geoelektrik und zur Radioaktivität in den Gesteinen. Diplomarbeit, Universität Würzburg (1985), 193 S.
Frei, W.: Die Detektion von Hohlräumen und Auflockerungszonen mit seismischen Verfahren. Swiss Bull. angewandt. Geol. **16**(2), 77–85 (2011)
Freudenberger, W.: Geologische Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 6126 Dettelbach. Bayer. Geol. LA, München (1999)
Frohlich, R. K., Kelly, W. E.: The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits. J. Hydrology, **79**, 215–229 (1985)
Grelle, G., Guadagno, F. M.: Seismic refraction methodology for groundwater level determination: „Water seismic index". J. Applied Geophysics, **68**(3), 301–320 (2009)
Gurk, M., Bosch, F.: Cave detection using the Self-Potential-Surface (SPS) technique on a karstic terrain in the Jura mountains (Switzerland). 19. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Burg Ludwigstein, 1.10.-5.10.2001, A. Hördt, A. und Stoll, J.B. (Hrsg.), 283–291 (2001)
Hardtwig, E.: Theorien zur mikroseismischen Bodenunruhe. Akad, S. 302. Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig (1962)
Hördt, A.: Case history: Hydraulic conductivity estimation from SIP data. In: Kirsch, R. (Hrsg.) Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology, S. 450–457. Springer, Berlin (2006)
Hördt, A., Blaschek, R., Kemna A. Zisser, N.: Hydraulic conductivity estimation from induced polarisation data at the field scale — the Krauthausen case history. J. Applied Geophys. **62**, 33–46 (2007)
Jacob, T., Bayer, R., Chery, J., Le Moigne, N.: Time-lapse microgravity surveys reveal water storage heterogeneity of a karst aquifer. J. Geophys. Res. **115**, (2010). http://doi.org/2009JB006616
Jardani, A., Dupont, J.-P., Revil, A.: Self-potential signals associated with preferential groundwater flow pathways in sinkholes. J. Geophys. Res. Atmospheres **111**(B9), (2006). http://doi.org/10.1029/2005JB004231
Jardani, A., Revil, A., Bolève, A., Crespy, A., Dupont, J.-P., Barrash, W., Malama B.: Tomography of the Darcy velocity from self-potential measurements. Geophys. Research. Lett. **34**, L24403, (2007). http://doi.org/10.1029/2007GL031907
Jongmans, D., Garambois, S.: Geophysical investigation of landslides: A review. Bulletin Société Géologique de France **178**(2), 101–112 (2007)
Jongmans, D., Hemroulle, P., Demanet, D., Renardy, F., Vanbrabant, Y.: Application of 2D electrical and seismic tomography techniques for investigating landslides. European J. Env. Eng. Geophys. **5**, 75–89 (2000)
Jouniaux, L., Zyserman, F.: Seismo-electrics, electro-seismics, and seismo-magnetics for earth sciences, Solid Earth Discuss. **7**, 2563–2662, (2015). http://doi.org/10.5194/sed-7-2563-2015
Kirsch, R., Yaramanci, U.: Geophysical characterisation of aquifers. In: Kirsch, R. (Hrsg.) Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology, S. 439–449. Springer, Berlin (2006)
Kuhnert, C., Rohr, W.-M.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 8230 Lechbruck. Bayer. Geol. LA, München (1975)

Legchenko A., Baltassat, J. M., Beauce, A., Bernard, J.: Nuclear magnetic resonance as a geophysical toolfor hydrogeologists. J. Appl. Geophys. **50**, 21–46 (2002)

Lehné, R. J.: Rezente Bodenbewegungspotenziale in Schleswig-Holstein (Deutschland) – Lokalisierung und Quantifizierung durch GIS-Analysen, seismische Interpretation, Fernerkundung, statistische Auswertung und Feldarbeit. Diss. Univ. Mainz, 227 S. (2005).

Lindseth, R. O.: Synthetic sonic logs – a process for stratigraphic interpretation. Geophysics **44**, 3–26 (1979)

Loke, M. H., Acworth, I., Dahlin, T.: A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. Exploration Geophys. **34**(3), 182–187 (2003)

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., Wilkinson, P. B.: Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. J. Applied Geophys. **95**, 135–156 (2013)

Louie, J. N.: Faster, better: shear-wave velocity to 100 m depth from refraction microtremor arrays. Bull. Seism. Soc. Am. **91**, 347–364 (2001)

MacDonald, A. M., Burleigh, J., Burgess, W. G.: Estimating transmissivity from surface resistivity soundings: an example from the Thames Gravels. Quart. J. Engin. Geol. Hydrogeol. **32**, 199–205 (1999)

Martínez-López, J., Rey, J., Dueñas, J., Hidalgo, C., Benavente, J.: Electrical tomography applied to the detection of subsurface cavities. J. Cave Karst Studies **75**(1), 28–37 (2011)

Nabighian, M. N., MacNae, J. C.: Time domain electromagnetic prospecting methods. In: Nabighian, M. N. (Hrsg.) Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Bd. 2, S. 427–450. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK (1991)

Nimmer, R. E., Osiensky, J. L.: Using Mise-à-la-Masse to Delineate the Migration of a Conductive Tracer in Partially Saturated Basalt. Environ. Geosci. **9**(2), 81–87 (2002)

Niwas, S., Celik, M.: Equation estimation of porosity and hydraulic conductivity of Ruhrtal aquifer in Germany using near surface geophysics. J. Applied Geophys. **84**, 77–85 (2012)

Niwas, S., Singhal, D. C.: Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous media. J. Hydrology. **50**, 393–399 (1981)

Obori, E., Udom, G. J.: Determination of aquifer transmissivity using geoelectrical sounding and pumping test in parts of Bayelsa State, Nigeria. Peak J. Physical and Environm. Sci. Res. **2**(2), 32–40, (2014)

Pant, S. R.: Tracing Groundwater Flow by Mise-à-la-masse Measurement of Injected Saltwater. J. Environ. Engin. Geophys. **9**(3), 155–165 (2004)

Pasquet, S., Bodet, L., Dhemaied A., Mouhri A., Vitale, Q., Rejiba, F., Flipo, N., Gueìrin, G.: Detecting different water table levels in a shallow aquifer with combined P-, surface and SH-wave surveys: Insights from V_P/V_S or Poisson's ratios. J. Applied Geophys. **113**, 38–50 (2015)

Potter, C. C., and Stewart, R. R.: Density predictions using VP and VS sonic logs. In: CREWES, Consortium for Research in Elastic Wave Exploration Seismology, 1998 Research Report, Bd. 10 (1998)

Quijada, M. F., Stewart, R. R.: Density estimations using density-velocity relations and seismic inversion. In: CREWES, Consortium for Research in Elastic Wave Exploration Seismology Research, Report, Bd. 19, S. 1–20. CREWES Software Release Geology and Geophysics Department University of Calgary Calgary, Canada (2007)

Revil, A., Jardani, A.: The Self-Potential Method: Theory and Applications in Environmental Geosciences, S. 369. Cambridge University Press, Cambridge (2013)

Sachs, O., Eberhard, M.: Grundlagenstudie zur Erstellung einer geotechnischen Wegleitung für EWS-Bohrungen mit potenziell gips- und anhydrithaltigen Gesteinen – geophysikalische und mineralogische Untersuchungen an drei oberflächennahen Bohrungen in sulfathaltigen Keupergesteinen. Abschlussbericht für Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK , Bundesamt für Energie BFE, 52 S. (2012)

Salem, H. S.: Determination of fluid transmissivity and electric transverse resistance for shallow aquifers and deep reservoirs from surface and well-log electric measurements. Hydrol. Earth Syst. Sci. Disc., Europ. Geosci. Union **3**(3), 421–427 (1999)

Sattar, G. S., Keramat, M., Shahid, S.: Deciphering transmissivity and hydraulic conductivity of the aquifer by vertical electrical sounding (VES) experiments in Northwest Bangladesh. Applied Water Sci. **10** (2014). http://doi.org/1007/s13201-014-0203-9

Schmutz, M., Guérin, R., Andrieux, P., Maquaire, O.: Determination of the 3D structure of an earthflow by geophysical methods. The case of Super Sauze, in the French southern Alps. J. Appl. Geophys. **68**, 500–507 (2009)

Schön, J.: Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen, S. 405. Ferdinand Enke, Stuttgart (1983)

Schwarzmeier, J.: Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 6024 Karlstadt und 6124 Remlingen. Bayer. Geol. LA, München (1977)

Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., Kohl, T.: Numerical evaluation of thermal response tests. Geothermics **36**(23), 141–166 (2007)

Socco, L. V., Foti, S., Boiero, D.: Surface-wave analysis for building near-surface velocity models – established approaches and new perspectives. Geophysics. **75**, 75A83–75A102 (2010)

Šumanovac, F., Weisser, M.: Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains. J. Applied Geophys. **47**(1), 13–28 (2001)

Supper, R., Ottowitz, D., Jochum, B., Kim, J-H., Römer, A., Baron, I., Pfeiler, S., Lovisolo, M., Gruber, S., Vecchiotti, F.: Geoelectrical monitoring: an innovative method to supplement landslide surveillance and early warning. Near Surface Geophysics **12**, 133–150 (2014)

Tronicke, J., Blindow, N., Groß, R., Lange, M. A.: Joint application of surface electrical resistivity-an GPR measurements for groundwater exploration on the island of Spiekeroog – northern Germany. J. Hydrology. **223**, 44–53 (1999)

Utama, W., Putra, T. K.: Fracture modeling using azimuthal resistivity sounding method in geothermal manifestations of Gunung Lamongan, East Java. PROCEEDINGS, 1st ITB Geothermal Workshop 2012, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, March 6–8 (2012)

Vouillamoz, J. M., Lawson, F. M. A., Yalo N., Descloitres, M.: The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. J. Appl. Geophys. **107**, 16–24 (2014)

Wagner, V, Blum, P.: Abschlussbericht geomatrix.bw, Teil 2: Prozessmodellierung und Chancenanalyse oberflächennaher Erdwärme in Baden-Württemberg. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften (2012)

White, P.-A.: Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity. Geophysics **59**(2), 192–201 (2005)

Yaramanci, U., Hertrich, M.: Magnetic Resonance Sounding. In: Kirsch, R. (Hrsg.) Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology, S. 253–273. Springer, Berlin (2006)

Innovative Explorationsmethoden in der Gravimetrie und Reflexionsseismik

4

Christian Blick, Willi Freeden und Helga Nutz

Inhaltsverzeichnis

4.1 Einleitung 222
4.2 Grundlagen der gravimetrischen Exploration 225
4.3 Grundlagen der seismischen Tomographie 226
4.4 Multiskalentechniken mittels Wavelets 228
4.5 Postprocessing im Explorationsgebiet E 232
4.6 Dekorrelation von Signaturen in E 239
4.7 Tiefendetektion geologischer Formationen lokal in E 246
4.8 Lokale Multiskalenverbesserung in der Bohrlochumgebung 249
4.9 Inverses Problem der Ermittlung der Dichte in E aus Potentialdaten des Komplements von E 251
4.10 Zusammenfassung und Ausblick 253
Literatur 255

Christian Blick (✉)
CBM – Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH, Niederbexbacher Straße 67, 66450 Bexbach, Deutschland
e-mail: blick@cbm-ac.de

Willi Freeden
Lehr- und Forschungsgebiet „Geomathematik“, TU Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Straße 26, 67653 Kaiserslautern, Deutschland
e-mail: freeden@mathematik.uni-kl.de

Helga Nutz
CBM – Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH, Niederbexbacher Straße 67, 66450 Bexbach, Deutschland
e-mail: nutz@cbm-ac.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_4

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine neuartige Möglichkeit behandelt, zusätzliche Informationen über die Risikoabschätzung aus geophysikalischen Messungen in die Bewertung eines geplanten Geothermieprojektes eingehen zu lassen. Dazu wird für die üblicherweise eingesetzten Techniken (Gravimetrie, Reflexionsseismik) ein innovatives geomathematisches Verfahren entwickelt, um vorhandene Auswertungsmethoden sinnvoll zu ergänzen. Das Verfahren, das dem Wesen nach ein seismisches Postprocessing darstellt, basiert auf einer Weiterentwicklung moderner Multiskalenverfahren der Konstruktiven Approximation.

In einem Folgeschritt kann das Multiskalenverfahren auch als Inversionsalgorithmus zur Gewinnung der Kontrastfunktion (d. h. Dichte in der Gravimetrie, Refraktionsindex in der seismischen Tomographie) aus Potentialinformation außerhalb des Explorationsareals dienen. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass die auftretenden Wavelets neben ihrer geophysikalischen Relevanz als (approximative) Lösungen bestimmter partieller Differenzialgleichungen lokale Träger besitzen, sodass die entstehenden linearen Gleichungssysteme dünn besetzt sind und damit effizient und ökonomisch lösbar sind.

Schlüsselwörter

Gravimetrische/seismische Exploration · Multiskalenmethode · Wavelettransformation · Prospektion · Tiefendetektion · Marmousi-Testbeispiel

4.1 Einleitung

Die geothermische Energie ist ein wichtiger Baustein bei zunehmendem Bedarf an erneuerbarer Energieproduktion. Den Vorteilen (z. B. saisonale Unabhängigkeit von Wetterphänomenen, lokale Produktion, umweltfreundlicher Charakter, optisch unauffälliger und geringer Flächenbedarf, optimale Energieausnutzung) steht aus Sicht des Investors (vgl. die Ausführungen in Bauer (2014a) und Bauer (2014b)) als kritisches Moment die Verlässlichkeit von Explorationsaussagen gegenüber, deren Steigerung nur auf der Basis von verstärkter Forschungstätigkeit gelingen kann.

Gegenwärtig eingesetzte geophysikalische Verfahren basieren gleichermaßen in Oberflächennaher wie Tiefer Geothermie auf Potentialmethoden der Gravimetrie (soweit Messkampagnen durchgeführt wurden), sowie in der Regel auf 2D- und 3D-Reflexionsseismik. Sofern die Methoden separat und nicht in Kombination oder Ergänzung Anwendung finden, ist ein beträchtliches Restrisiko unabhängig von noch so gewissenhaftem Vorgehen bei der Exploration kanonisch unvermeidbar. Der Grund liegt im speziellen Charakter gravitativer Potentialmethoden sowie akustisch/elastisch basierter Tomographieverfahren (der Seismik) als sogenannte „inverse Probleme“. In der Geomathematik spricht man von einem *direkten Problem*, wenn man aus der messbaren und somit bekannten Ursache die Wirkung des Systems bestimmen möchte. Beim *inversen Problem* steht man vor

der umgekehrten Aufgabe: Man kann die Wirkung messen und möchte auf deren Ursache schließen. Inverse Probleme sind im Gegensatz zu direkten Problemen in der Regel schwierig lösbar (oder sogar unlösbar).

Das *inverse Problem der geothermischen Exploration* lässt sich dabei formal in geomathematischem Kontext wie folgt formulieren:

Gesucht ist die Ursache F im Explorationsgebiet E, welche die Wirkung V erzeugt. Dabei sind folgende Einflussgrößen beteiligt:

- E: Explorationsgebiet,
- V: Wirkung (oder auch Potential),
- F: Ursache (oder auch Kontrastfunktion),
- x: Punkt innerhalb/außerhalb von E oder auf dem Rand ∂E von E,
- y: Punkt im Explorationsgebiet $\overline{E} = E \cup \partial E$,
- L: Operator, der das Messverfahren kennzeichnet.

Genauer gesagt sind Explorationsprobleme durch eine Integralgleichung vom Typ

$$V(x) = \int_E G(L; x, y)\, F(y)\, dy, \quad x \in \mathbb{R}^3, \tag{4.1}$$

charakterisiert, wobei $G(L; \cdot, \cdot)$ die sogenannte Greensche Funktion zur Operatorgleichung von L bezeichnet. Die Kontrastfunktion F erfüllt dabei eine partielle Differentialgleichung, deren Gültigkeitsbereich allerdings nur E ist, nämlich

$$L\,V(y) = F(y), \quad y \in E. \tag{4.2}$$

Da aber die Messinformation von V abgesehen von Bohrlochmessungen aus dem Komplement von E stammen, hat man in der Praxis zur Exploration auf die Integralgleichung (4.1) zurückzugreifen. Mit anderen Worten, die Schwierigkeit geothermischer Exploration liegt darin, dass die Wirkung V nur auf der Oberlfäche oder im Außenraum und nicht im gesamten Explorationsgebiet gemessen werden kann. Von der Wirkung (d. h. dem Potential) V in bestimmten Punkten x der Oberfläche und des Außenraums soll über die Integralgleichung (4.1) auf die die Geologie beschreibende Ursache (d. h. Kontrastfunktion) F in Punkten y des Explorationsbereiches E geschlossen werden. Leider bedeutet der Umstand, vor der Realisation einer Geothermieanlage nur auf Messpunkte x außerhalb von E, d. h. der Oberfläche ∂E oder des Außenraums von E zurückgreifen zu können, eine intrinsisch vorhandene auch durch noch so viele Messungen nicht zu behebende Unschärfe, die im Rahmen der Durchführung jedes Geothermieprojekts zu beachten ist. Der Grund liegt im Auftreten sogenannter „Geister“ $\hat{F}$ mit der Eigenschaft

$$0 = \int_E G(L; x, y)\, \hat{F}(y) dy, \quad x \in \mathbb{R}^3 \backslash E. \tag{4.3}$$

Fügt man also einen „Geist“ $\hat{F}$ zur realen Kontrastfunktion F hinzu, so ergibt sich

$$V(x) = \int_E G(L; x, y) \left(F(y) + \hat{F}(y) \right) dy, \quad x \in \mathbb{R}^3 \backslash E, \tag{4.4}$$

d. h. ein „Geist“ bewirkt keine Änderung hinsichtlich des gemessenen Potentialwerts $V(x)$ im Komplement von E, d. h. in $\mathbb{R}^3 \setminus E$. Umgekehrt bedeutet dies, dass sich aus der Kenntnis von V in $\mathbb{R}^3 \setminus E$ nicht in eindeutiger Weise F ergibt, ja nicht ergeben kann. Aus Sicht eines Investors ist dies ohne Zweifel die größte Herausforderung. Abhilfe kann nur die zusätzliche Einbeziehung von Messungen in E, d. h. von Inbohrlochmessungen, bringen. Eine weitere Möglichkeit, die in der Exploration die Regel werden sollte, ist der Wechsel des Operators L, d. h. zum Beispiel vom Helmholtz-Operator in der akustischen Seismik zum Laplace-Operator in der Gravimetrie, und umgekehrt, und die anschließende Zusammenschau aller Ergebnisse.

Nichtsdestoweniger haben im Zusammenhang mit inversen Problemen der Geothermie während der letzten Jahre die rasante Entwicklung in der Computertechnologie und die enorme Steigerung von Mess- und Beobachtungsgenauigkeit zu einer explosionsartigen Ausbreitung neuer mathematischer Ansätze wie etwa den Multiskalenmethoden geführt, welche die bestimmbare Information über die Kontrastfunktion aus diskreten Potentialdaten mehr und mehr zugänglich machen und die Kombination und Zusammenschau verschiedener Explorationsverfahren ermöglichen.

In der Geothermie sind heute eine Vielzahl von Explorationsverfahren vom Integraltyp (4.1) verfügbar:

- Gravimetrie bzw. geomagnetische Potentialverfahren (L ist der Laplace-Operator Δ der zweiten partiellen Ableitungen bzw. der gekoppelte Divergenz-/Rotations-(Prä-)Maxwell-Operator).
- Akustische seismische Tomographie (L ist der Helmholtz-Operator $\Delta + k^2$ zu einer bestimmten Wellenzahl k).
- Elastische seismische Tomographie (L ist der Cauchy-Navier-Operator der Elastizitätstheorie).
- Akustisches Streuproblem (L ist der Operator der orts- und zeitabhängigen d’Alembert-Gleichung).
- Elastisches Streuproblem (L ist der Operator der orts- und zeitabhängigen elastischen Wellengleichung).

In diesem Beitrag machen wir nun zunächst nicht den Versuch, neue mathematische Lösungsvorschläge für die inversen Probleme bezüglich der genannten Operatoren für ein beliebiges Testfeld E aus Daten von $\mathbb{R}^3 \setminus E$ zu liefern. Vielmehr werden wir uns zunächst lokal in E für das zu spezifizierende oder bereits spezifizierte Bohrareal auf der Basis vorhandener a priori Information (aus Gravimetrie und/oder Seismik) mit innovativen Auswertemechanismen beschäftigen und dabei folgende Ziele verfolgen:

- Verbesserte geologische Interpretation durch ein geeignetes Postprocessing verfügbarer Potentiale V und Kontrastfunktionen F in E auch im Vergleich verschiedener Lösungsvorschläge unterschiedlicher Explorationsverfahren.
- Tiefendetektion geologischer Formationen in E und Lokalisierung von Aquiferen auf Basis geologischer Vorinformation (vor und während der Bohrphase).

In der Folge des hier entwickelten Multiskalenverfahrens eröffnen sich neue Bewertungsaspekte bei der Analyse der geophysikalischen Daten durch lokal basierte Interpretationsverfahren. Die Feinstrukturmodellierung des Untergrundes basiert dabei wesentlich auf den lokal verfügbaren Daten unter Berücksichtigung global vorhandener Trendmodellierung. Unser Verfahren gewährleistet eine Modellierung so nahe an der Physik wie möglich, wodurch eine möglichst wirklichkeitsnahe Interpretation und somit ein besseres Verständnis der geologischen Formationen ermöglicht werden. In der Konsequenz stellen die Ergebnisse der vorgestellten innovativen geomathematischen Methoden den Investoren hilfreiche Informationen zur Beurteilung und Kostenabschätzung vor und während der Bohrtätigkeit eines Geothermieprojektes zur Verfügung. Die gesammelten Erfahrungen zum Postprocessing und zur Tiefendetektion bilden dann die Basis zur Inversion der Integralgleichung (4.1) lokal in E, und zwar in der Umgebung einer Bohrstelle.

Es sollte betont werden, dass die entwickelten Methoden sowohl in der Oberflächennahen als auch Tiefen Geothermie Anwendung finden können. Vom mathematischen Aufwand ist allerdings oberflächennahe Gravimetrie leichter zugänglich und weniger rechenintensiv.

4.2 Grundlagen der gravimetrischen Exploration

Gravimeterdaten stellen eine kostengünstige Möglichkeit der Exploration bereits vor Beginn einer geplanten Bohrung dar, also noch vor der Durchführung einer ausgedehnten und kostenintensiveren Seismik (vgl. z. B. Ernstson 2014; Jacobs und Meyer 1992). Mithilfe von sehr empfindlichen Messgeräten, sogenannten Gravimetern, ermittelt man hierbei geringfügige Schwerkraftänderungen, die ihre Ursache in Dichteunterschieden im Untergrund haben. Diese Dichtevariationen lassen beispielsweise eine Unterscheidung von Locker- oder Festgestein, dichten und porösen Gesteinen, wasserfreien und wasserführenden Gesteinen, Erzen, Salzgesteinen etc. zu. Die Gravimetrie ermöglicht es, den generellen tektonischen Aufbau zu verdeutlichen, indem wesentliche Störungen und deren Streichrichtung und Zonen mit niedrigerer Dichte sichtbar gemacht werden (siehe Martin et al. 2002; Möhringer 2014). Empirisch lässt sich eine Korrelation zu den Geschwindigkeiten akustischer/elastischer Wellen der Seismik feststellen, was einen weiteren Hinweis auf die Vorteilhaftigkeit eines kombinierten Einsatzes von Gravimetrie und Seismik bedeutet.

Die eingesetzten Gravimeter messen typischerweise kleinste Änderungen des Gravitationsfeldes der Erde, die durch geologische Strukturen oder die Form der Erde erzeugt werden. Es gibt zwei Arten von Gravimetern, relative und absolute Gravimeter. Absolute Gravimeter basieren auf der direkten Messung des freien Falls (z. B. einer Testmasse in einer Vakuumröhre). Relative Gravimeter hingegen vergleichen die Gravitationswerte mit einer Referenzmessung. Sie werden an einem Ort kalibriert, an dem die Gravitation genau bekannt ist, und bestimmen das Verhältnis der Gravitation zum Referenzwert. Die meisten relativen Gravimeter basieren auf dem Federwagenprinzip, d. h., sie messen, wie

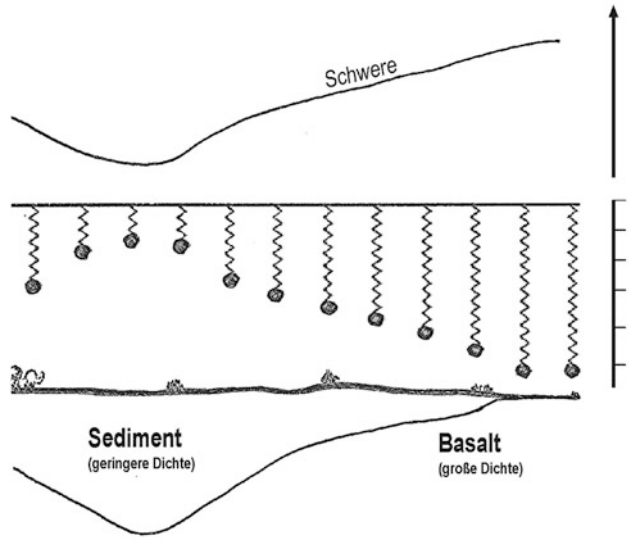


Abb. 4.1 Das Prinzip der relativen Gravimetrie

weit eine Testmasse eine Feder auslenkt (siehe Abb. 4.1). Die Gravitation wird dann über das Hookesche Gesetz bestimmbar.

Für das Postprocessing in der Gravimetrie ($L = \Delta$) geht man vom Newton-Integral in E

$$V(x) = \int_E \underbrace{\left(-\frac{1}{4\pi}\frac{1}{|x-y|}\right)}_{=G(\Delta;x,y)} F(y)\,dy, \quad x \in E \tag{4.5}$$

aus und nutzt beim Übergang zur Dichte F die Poissonsche Differentialgleichung

$$\Delta V(x) = F(x), \quad x \in E \tag{4.6}$$

aus.

4.3 Grundlagen der seismischen Tomographie

Die Grundkomponenten der seismischen Tomographie, d. h. der Signale auf der Basis der akustisch basierten Wellenausbreitung (vgl. z. B. Ernstson 2014; Jacobs und Meyer 1992), stellen sich wie folgt dar: Die Wellen, die durch eine Quelle erzeugt werden, wandern nach unten in das Medium. Gewöhnlich nimmt man an, dass es in der Welle keine Energieverluste aufgrund der Ausbreitung durch das Material gibt. Wir setzen außerdem voraus, dass es keine Scherspannung gibt. Infolgedessen ist die Physik, die hinter der Wanderung der akustischen Welle steht, einfach zu erfassen: Nachdem es zu einer Druckänderung kommt, ändert sich das Volumen und die Energie wird in der Auslenkung gespeichert.

Die Auslenkung selbst führt wiederum zu einer weiteren Druckänderung in der Nachbarschaft des Volumens. Dieser Vorgang führt zu einer sich ausbreitenden Welle. Zum Zweck der Modellierung muss man nun die diesem Prozess zugrunde liegenden physikalischen Gesetze beschreiben. Es zeigt sich, dass dabei die folgenden Größen ins Spiel kommen: Druckänderung am Material in Raum und Zeit, Verschiebungsvektor in Raum und Zeit, Dichte des Materials im Raum (nicht zeitabhängig), Kompressionsmodul des Materials im Raum (nicht zeitabhängig).

Das Hookesche Gesetz für ein akustisches Medium sagt aus, dass der Druck (bei kleinen Auslenkungen) proportional zur Dehnung ist. Das zweite Newtonsche Gesetz setzt Masse und Beschleunigung in Relation zu den Kräften, die auf das Medium wirken, sodass die Kräfte aus dem Produkt von Masse und Beschleunigung bestimmt werden können. Die akustische Wellengleichung verbindet dann diese Größen zu einer partiellen Differentialgleichung, der Wellengleichung, aus der man Informationen über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Medium mittels des Refraktionsindexes zum Erlangen von geologischen Informationen ziehen will (siehe Abb. 4.2). Es sei hier angemerkt, dass das Problem der Bestimmung des Refraktionsindexes aus der assoziierten Integralgleichung im Grunde nichtlinear ist. Der Inversionsprozess ist bisher nur mithilfe einer Linearisierung (z. B. Born-Approximation) effizient möglich. Allerdings ermöglicht unsere Methode ein Postprocessing direkt auf Basis der nichtlinearen Integraldarstellung der Lösung der Wellengleichung.

In mathematischer Darstellung (4.2) ist die Helmholtzsche Schwingungsgleichung ($L = \Delta + k^2$) für die Wirkung, d. h. für das Potential V, gegeben durch

$$\Delta V(x) + (k(x))^2 V(x) = F(x), \quad x \in E, \tag{4.7}$$

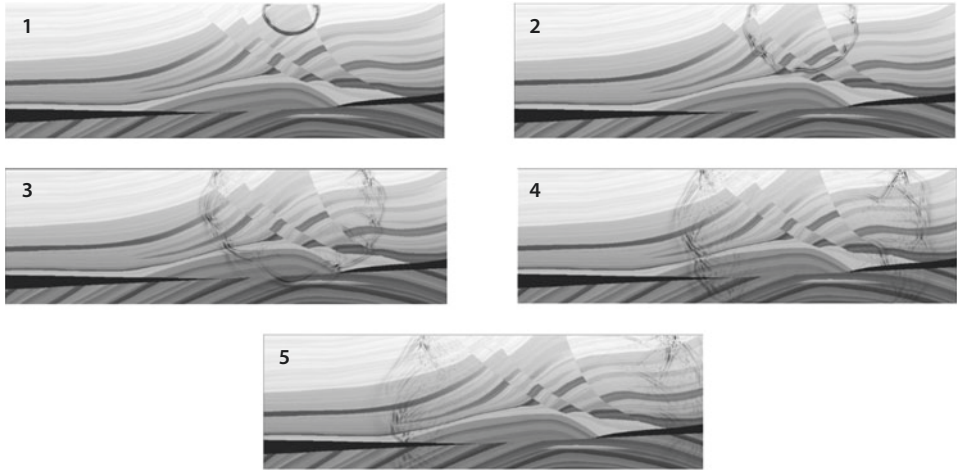


Abb. 4.2 Durchlauf einer Welle durch das Marmousi-Modell. (Aus Ilyasov 2011)

wobei F dessen Ursache beschreibt und die ortsabhängige Wellenzahl $k(y) = k_0 N(y)$ den Refraktionsindex N beinhaltet. Über Zuhilfenahme einer angemessenen Referenzwellenzahl k_0 und Linearisierung mittels Born-Approximation (vgl. z. B. Augustin 2015; Beylkin 1985) erhält man daraus gemäß der Darstellung (4.1) mit $L = \Delta + k_0^2$ die spezielle Integraldarstellung

$$V(x) = \int_E \underbrace{\left(-\frac{1}{4\pi}\frac{\exp(ik_0|x-y|)}{|x-y|}\right)}_{=G(\Delta+k_0^2;x,y)} F(y)\,dy, \tag{4.8}$$

wobei aus der Kontrastfunktion F der Refraktionsindex N direkt berechnet werden kann.

4.4 Multiskalentechniken mittels Wavelets

Die Multiskalenmethode beruht konzeptionsmäßig auf der Idee, dass man die in den Daten (genauer dem Potential V) enthaltene Information mittels physikalisch basierter Wavelets in spezifische Frequenzbandstrukturen zerlegt, um nach Anwendung der Differentialgleichung (4.2) über die Kontrastfunktion F bestimmte skalenabhängige geologische Signaturen zu extrahieren. Damit sollen die geothermisch relevanten Bereiche sichtbar und somit planbar gemacht werden. Die Grundidee der hier vorgeschlagenen Auswertemechanismen wurde in Freeden und Schreiner 2006 für ein Kernproblem der Physikalischen Geodäsie entwickelt. In diesem Beitrag wird die Übertragung der Idee auf Problemstellungen erläutert, die für die Geothermie von Bedeutung sind.

Zum besseren Verständnis der Multiskalentechniken erläutern wir zunächst allgemein das zugrunde liegende Konzept. Die Multiskalenanalyse ist ein Begriff aus der Wavelettheorie und beschreibt die Approximationseigenschaft der Wavelettransformation. Allen modernen Multiskalenansätzen gemein ist der Einsatz von Wavelets als erzeugende Basiskomponenten im Sinne skalierungsspezifischer Filterungen, die eine schnelle und effiziente Methode zur Dekorrelation eines gegebenen Datensatzes ermöglichen. Insbesondere beinhaltet diese Charakterisierung drei wesentliche konstituierende Eigenschaften:

- *Basiseigenschaft:* Wavelets sind Basiskomponenten zur Approximation einer beliebigen Funktion (d. h. eines Signals).
- *Dekorrelation:* Wavelets besitzen die Fähigkeit zur Dekorrelation des Signals, d. h. sie ermöglichen die Extraktion spezieller Information, die im Signal enthalten ist, mittels einer kleineren geeigneten Anzahl von Waveletkoeffizienten durch Beschränkung auf bestimmte Skalenbänder.
- *Effiziente Algorithmen:* Die Waveletzerlegung lässt sich mittels effizienter und ökonomischer Algorithmen (*Fast Wavelet Transform* (FWT)) durchführen.

Diese drei Eigenschaften bilden den Schlüssel für eine Vielzahl von Anwendungen, insbesondere für Signalrekonstruktion und -zerlegung, Thresholding, Datenkompression, Entrauschung usw., und eben auch für Signaturdekorrelation.

Im Rahmen des hier zunächst erläuterten Postprocessings steht somit nicht die Rekonstruktion des Signals im Fokus, sondern dessen Dekorrelation Frequenzbänder, die geologische Formationen reflektieren. Waveletapproximation bedeutet insbesondere, dass die Darstellung des Signals mittels Waveletkoeffizienten eine „kompaktere" Form hat als die ursprüngliche Darstellung. Die Dekorrelation ermöglicht die Extraktion spezieller Information, die im Signal enthalten ist, durch eine spezifische Anzahl und Auswahl von Koeffizienten.

Signale in der geothermischen Praxis zeigen sowohl eine Korrelation im Frequenz- (oder auch Momentum-) als auch im Ortsbereich. Signaleigenschaften (z. B. Salzstöcke, Aquifere) erscheinen im Wesentlichen in bestimmten Frequenzbändern. Um solche Signale mittels Dekorrelation zu spezifizieren, benötigen wir „Testfunktionen", die gewisse Information sowohl im Orts- als auch im Frequenzbereich bereitstellen. Dekorrelation wird dann möglich, weil sich eine scharfe Lokalisierung im Frequenz- und Ortsbereich nach dem Heisenbergschen Unschärfeprinzip gegenseitig ausschließt und gewissermaßen alternativ zueinander ist. Darüber hinaus kann der Anteil des Beitrags in Frequenz und Ort beim Einsatz von Testfunktionen in der Approximation eines Signals in quantitativer Weise angegeben werden.

Derartige Testfunktionen zur Lokalisierung im Frequenz- und Ortsbereich nennt man in der Wavelettheorie Skalierungsfunktionen. Eine zu einer Multiresolution führende Skalierungsfunktion ist somit ein Kompromiss dahingehend, dass eine bestimmte Balance zwischen Frequenz- und Ortslokalisierung im Sinne der Unschärferelation realisiert ist (vgl. Freeden 1998). Aus diesem Grund hängt jede Skalierungsfunktion von zwei Variablen ab, nämlich einem Verschiebungs- und einem Skalierungsparameter, die das Ausmaß der Ortslokalisierung auf Kosten der Frequenzlokalisierung und umgekehrt steuern. Jeder Skalierungsfunktion ist eine Waveletfunktion zugeordnet, die in der Regel die Differenz zweier aufeinanderfolgender Skalierungsfunktionen ist. Anschaulich übernimmt also die Filterung eines Signals mit einer Skalierungsfunktion die Rolle eines Tiefpassfilters, die Filterung des Signals mit den zugeordneten Wavelets liefert in diesem Sinne hingegen aufgrund der Differenzeneigenschaft eine Bandpassfilterung.

Eine Waveletzerlegung ist somit die aufeinanderfolgende Ausführung eines effizienten Auswerteverfahrens unter Verwendung von skalenabhängigen Testfunktionen, die bei der Rekonstruktion immer mehr Ortslokalisierung auf Kosten der Frequenzlokalisierung und umgekehrt bei der Dekomposition immer mehr Frequenzlokalisierung auf Kosten der Ortslokalisierung zeigen (siehe Abb. 4.3). Die Wavelettransformation legt somit den Grundstein für die Dekorrelation eines Signals, d. h. die Spezifikation von Signaturen im Signal in bestimmten Frequenzbändern bzw. Ortsbändern. Dies ist neben der Wahl des geeigneten Wavelettyps der Schlüssel zur Zerlegung eines Signals.

In Abb. 4.4 wird das Verfahren bildlich durch Darstellung der Signalanteile einer Multiskalenzerlegung demonstriert. Die Filterung (Faltung im mathematischen Sinne) mit

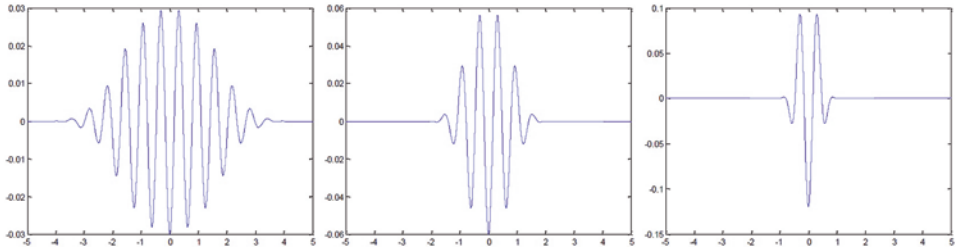


Abb. 4.3 Helmholtz-Wavelets mit abnehmendem Träger in Schnittdarstellung

einer Skalierungsfunktion liefert die der gewählten Skala entsprechenden Tiefpassanteile (oben in Abb. 4.4). Mit zunehmender Skala j wird mehr Information herausgefiltert und die Schärfe der Bilder nimmt zu. Die Wavelettransformation (Faltung) als Differenz zweier Tiefpassfilter liefert die der Skala j entsprechende Detailinformation im Sinne eines Bandpassfilters (unten in Abb. 4.4).

Nach den allgemeinen Anmerkungen zur Multiskalenzerlegung wird diese Technik nun exemplarisch auf eine geothermisch relevante und physikalisch motivierte Differentialgleichung (4.2) in E angewandt. Das Konzept beruht auf der Idee, physiknahe Skalierungsfunktionen und Wavelets für das Potential durch Regularisierung der Greenschen Funktion in der Fredholmschen Integralgleichung (4.1) zu konstruieren. Durch Anwendung der Differentialgleichung (4.2) erhält man dann unmittelbar bei messbarem Potential V in E auch eine entsprechende Multiskalenanalyse der Kontrastfunktion F.

Bei der Multiskalenmethode wird das Potential V in physikalisch motivierte „Bruchstücke“ (gefilterte Versionen von V) mit

$$V_{\tau_j}(x) = \int_E G_{\tau_j}(L; x, y)\, F(y)\, dy, \tag{4.9}$$

$$(WV)_{\tau_j}(x) = V_{\tau_{j+1}}(x) - V_{\tau_j}(x), \tag{4.10}$$

zerlegt, sodass

$$V = \underbrace{V_{\tau_0} + (WV)_{\tau_0} + (WV)_{\tau_1} + (WV)_{\tau_2} + \ldots + (WV)_{\tau_{j-1}}}_{=V_{\tau_J}} + \ldots \tag{4.11}$$

gilt. Bei Wahl einer ausreichend großen Skala J stellt V_{τ_J} eine gute Approximation des Potentials V dar. Betrachtet man nun die Differenzen WV_{τ_j}, so können damit Dekorrelationsprozesse durchgeführt werden. Ist dabei τ_j geeignet gewählt, sodass sich beim Übergang von V zu F über die Differentialgleichung eine geologisch relevante Zerlegung der Kontrastfunktion F zeigt, haben wir eine neue Möglichkeit der Bewertung der gemessenen Information in der Exploration gefunden, die gleichermaßen in der Gravimetrie als auch der Seismik Anwendung findet. Die Hauptaufgabe eines Geomathematikers besteht darin, die Skalenparameter τ_j so zu bestimmen, dass eine geophysikalisch motivierte Interpretation der Datensätze ermöglicht wird. In Analogie zur gängigen Notation

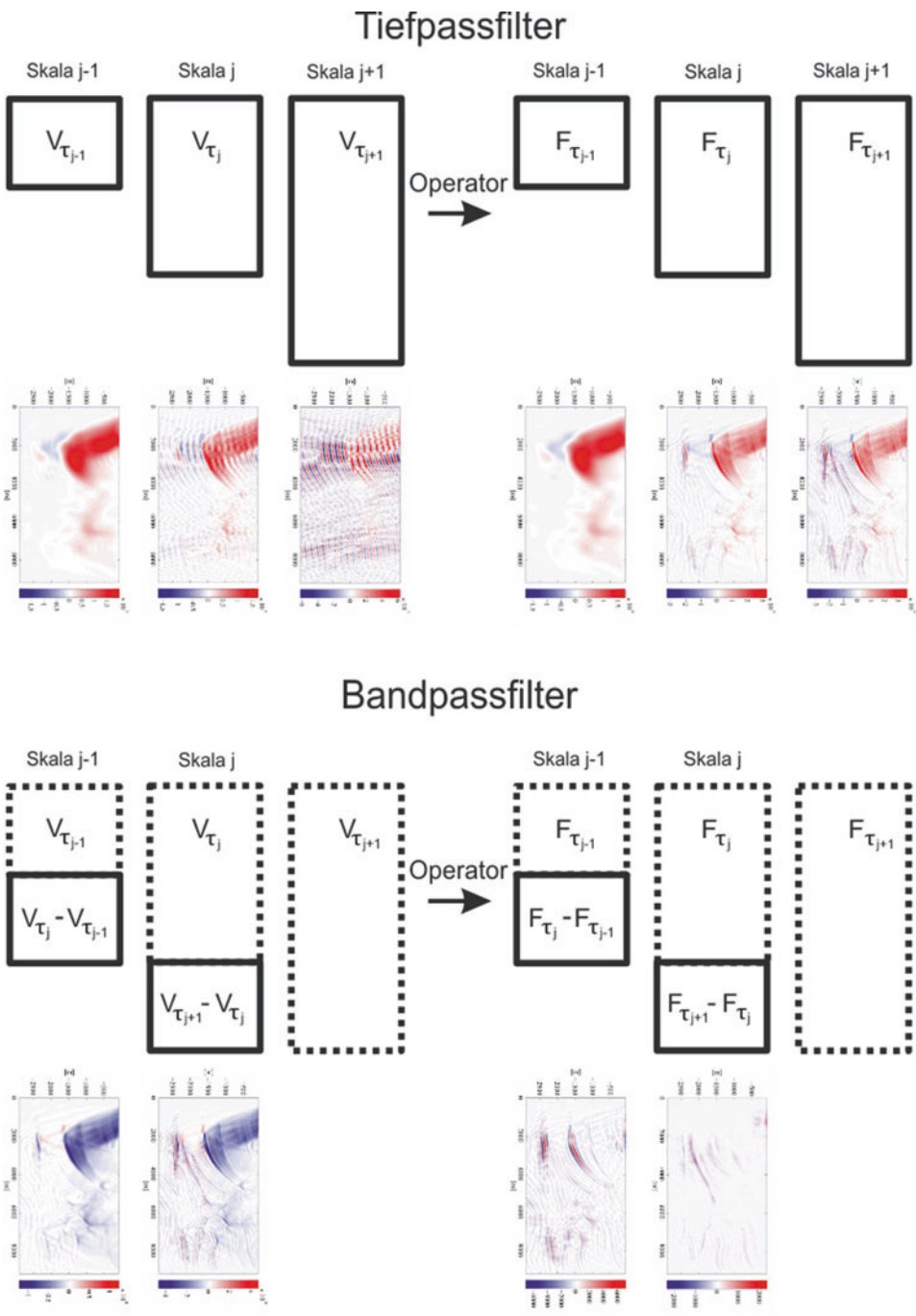


Abb. 4.4 Veranschaulichung der Multiskalenanalyse zur akustisch basierten Seismik

in der Literatur ist $G_{\tau_j}(L;x,y)$ in (4.9) die (physikalisch motivierte) Skalierungsfunktion und übernimmt in der Integraldarstellung (4.9) die Aufgabe eines Tiefpassfilters, wohingegen die Differenzen $G_{\tau_{j-1}}(L;x,y) - G_{\tau_j}(L;x,y)$ als Wavelets bezeichnet werden und die Aufgabe eines Bandpassfilters übernehmen. In Verbindung mit (4.2) erhält man direkt auch die entsprechende Tiefpassfilterung der Kontrastfunktion, d. h., $F_{\tau_j} = LV_{\tau_j}$. Durch Differenzbildung (Waveletzerlegung) ergeben sich die zugehörigen Bandpassanteile $WF_{\tau_j} = L\left(WV_{\tau_j}\right)$. Das Schema in Abb. 4.4 zeigt die beschriebene Zerlegung des Potentials V sowie (nach Anwendung der Differentialgleichung (4.7)) der Kontrastfunktion F durch Tiefpass- und Bandpassfilterung am Beispiel des Marmousi-Migrationsmodells. Wie speziell für die akustisch basierte Seismik, d. h. $L = \Delta + k^2$, erkennbar ist, beinhaltet die Waveletzerlegung insbesondere, dass die Darstellung des seismischen Signals eine explorationstechnisch aufgeschlüsseltere Form hat als die ursprüngliche Darstellung. Die Dekorrelation ermöglicht die Extraktion spezieller Information, die im Signal enthalten ist, durch Spezifizierung einer bestimmten Skala j. Mit zunehmender Skala j wird dabei hochfrequentere Information in Form eines Zooming-In-Prozesses herausgefiltert. Tiefe Skalen liefern somit grobe Trendstrukturen, höhere Skalen hingegen feinere Detailinformationen.

4.5 Postprocessing im Explorationsgebiet *E*

Ein Vorläufer der hier vorgeschlagenen Auswertemechanismen wurde bereits für ein Kernproblem der Physikalischen Geodäsie in (Freeden und Schreiner 2006) entwickelt. Aus Gründen der Einfachheit werden die mathematischen Ausführungen hier nur abrisshaft behandelt. In der Tat ist die Darstellung kompromisshaft so ausgelegt, dass zum geothermisch reflektierten Verständnis der formelhafte Kontext dieses Abschnittes nicht notwendigerweise erforderlich ist und die Basisingredienzien hinreichend aus den vorausgehenden Abschnitten verständlich werden. Detailliertere Darstellungen unseres Zugangs finden sich für den mathematisch fortgeschrittenen Leser in Augustin 2015; Blick et al. 2017; Freeden und Blick 2013a; Freeden und Nutz 2014; Freeden und Nutz 2015; Gehringer und Loksha 2012; Möhringer 2014 und ihre exemplarische geothermisch relevante Weiterentwicklung und numerische Realisierung in der Dissertation Blick 2015.

Im Zentrum des hier vorgeschlagenen Kontextes steht die physikalisch motivierte Gleichung

$$L_x G(L;x,y) = \delta(x,y), \quad x,y \in E,\ x \neq y, \tag{4.12}$$

welche das Ergebnis der Anwendung des Operators L auf *L-Ableitung* Greenschen Funktion $G(L;\cdot,\cdot)$ L als Diracsche(s) Deltafunktion(al) $\delta(\cdot,\cdot)$ ausweist. Die Gleichung (4.12) hat dann in Verbindung mit der Integralgleichung (4.1) zur unmittelbaren Konsequenz, dass formal der Übergang von V zu F mittels der Differentialgleichung

$$L_x V(x) = \int_E L_x G(L; x, y) F(y)\, dy = \int_E \delta(x, y) F(y)\, dy = F(x), \quad x \in E, \tag{4.13}$$

(zumindest unter gewissen Glattheitsvoraussetzungen F) gilt. Unsere Resultate basieren nun auf der folgenden mathematischen Aussage:

Zu jeder Nullfolge $\{\tau_j\}_{j=0,1,\ldots}$, d. h. $\lim_{j\to\infty} \tau_j = 0$, existiert eine Folge von Kernen $G_{\tau_j}(L; x, y), x, y \in E$, mit

$$\lim_{j\to\infty} G_{\tau_j}(L; x, y) = G(L; x, y), \quad x, y \in E, x \neq y, \tag{4.14}$$

sowie eine Folge von Kernen (Dirac-Folgen) $\delta_{\tau_j}(x, y), x, y \in E$, mit

$$L_x G_{\tau_j}(L; x, y) = \delta_{\tau_j}(x, y), \quad x, y \in E, x \neq y, \tag{4.15}$$

sodass

$$\lim_{j\to\infty} \delta_{\tau_j}(x, y) = \delta(x, y), \quad x, y \in E, x \neq y, \tag{4.16}$$

gilt. Die τ_j-skalengefilterten *Potentialfunktionen*

$$V_{\tau_j}(x) = \int_E G_{\tau_j}(L; x, y) F(y)\, dy, \quad x, y \in E, \tag{4.17}$$

und die τ_j-skalengefilterten *Kontrastfunktionen*

$$F_{\tau_j}(x) = \int_E \delta_{\tau_j}(x, y) F(y)\, dy, \quad x, y \in E, \tag{4.18}$$

erfüllen somit die Grenzrelation

$$\begin{aligned} L_x V(x) &= \lim_{j\to\infty} L_x V_{\tau_j}(x) \\ &= \lim_{j\to\infty} \int_E L_x G_{\tau_j}(L; x, y) F(y)\, dy \\ &= \lim_{j\to\infty} \int_E \delta_{\tau_j}(x, y) F(y)\, dy \\ &= \lim_{j\to\infty} F_{\tau_j}(x) \\ &= F(x). \end{aligned} \tag{4.19}$$

In Abb. 4.4 sind die dieser Zerlegung entsprechenden Tiefpassanteile dargestellt. Die Kerne $G_{\tau_j}(L; \cdot, \cdot)$ bzw. $\delta_{\tau_j}(\cdot, \cdot)$, $j = 0, 1, \ldots$, heißen Greensche bzw. Diracsche Skalierungsfunktionen zur Skala j (siehe graphische Veranschaulichungen in Abb. 4.5 und Abb. 4.6).

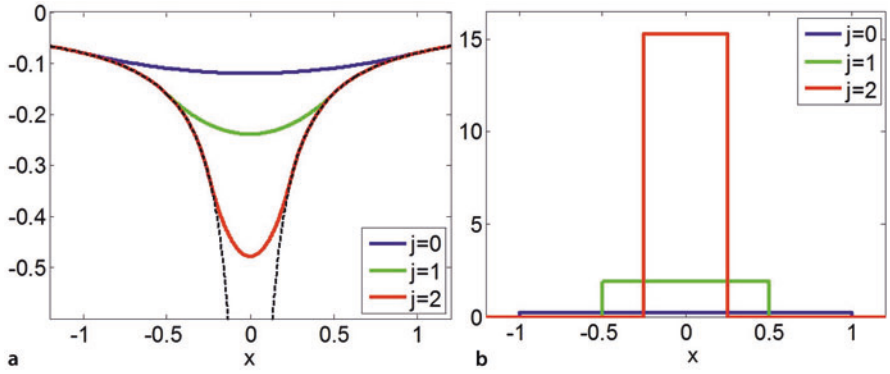


Abb. 4.5 Profile der Skalierungsfunktionen $G_{\tau_j}(\Delta; x, 0)$ (**a**) und $\delta_{\tau_j}(x, 0)$ (**b**) zur Wahl $L = \Delta$ und $\tau_j = 2^{-j}$. Die schwarze Linie im linken Bild zeigt das Profil der Greenschen Funktion $G(\Delta; x, 0)$

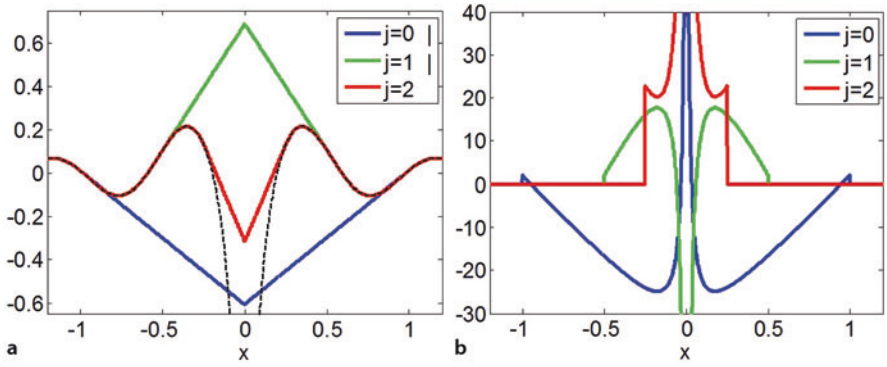


Abb. 4.6 Profile der Skalierungsfunktionen $G_{\tau_j}\left(\Delta + k_0^2; x, 0\right)$ (**a**) und $\delta_{\tau_j}(x, 0)$ (**b**) zur Wahl $L = \Delta + k_0^2$, $k_0 = 16\pi$ und $\tau_j = 2^{-j}$. Die schwarze Linie im linken Bild zeigt das Profil der Greenschen Funktion $G\left(\Delta + k_0^2; x, 0\right)$

Die Differenzenkerne

$$\Psi_{G_{\tau_j}}(L; x, y) = G_{\tau_{j+1}}(L; x, y) - G_{\tau_j}(L; x, y), \quad x, y \in E, \tag{4.20}$$

bzw.

$$\Psi_{\delta_{\tau_j}}(x, y) = \delta_{\tau_{j+1}}(x, y) - \delta_{\tau_j}(x, y), \quad x, y \in E, \tag{4.21}$$

heißen Greensche bzw. Diracsche Waveletfunktionen zur Skala $j = 0, 1, \ldots$ (siehe Abb. 4.7 und Abb. 4.8).

Die τ_j-Waveletpotentialfunktionen (Bandpassanteile des Potentials V zur Skala j)

$$(WV)_{\tau_j}(x) = \int_E \Psi_{G_{\tau_j}}(L; x, y) F(y)\, dy, \quad x \in E, \tag{4.22}$$

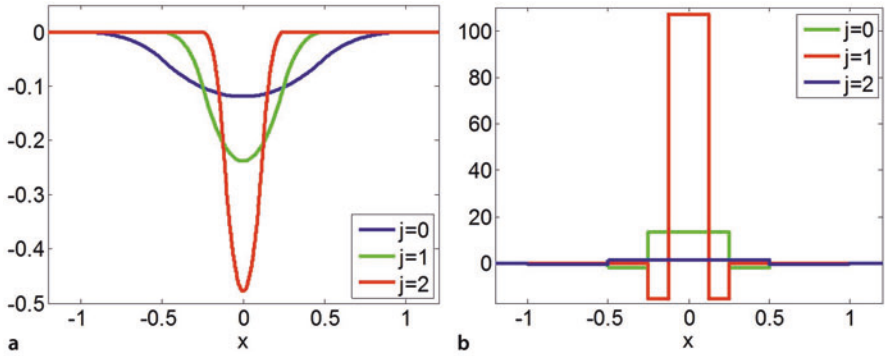


Abb. 4.7 Profile der Waveletfunktionen $\Psi_{G_{\tau_j}}(\Delta; x, 0)$ (**a**) bzw. $\Psi_{\delta_{\tau_j}}(x, 0)$ (**b**) zur Wahl $L = \Delta$ und $\tau_j = 2^{-j}$

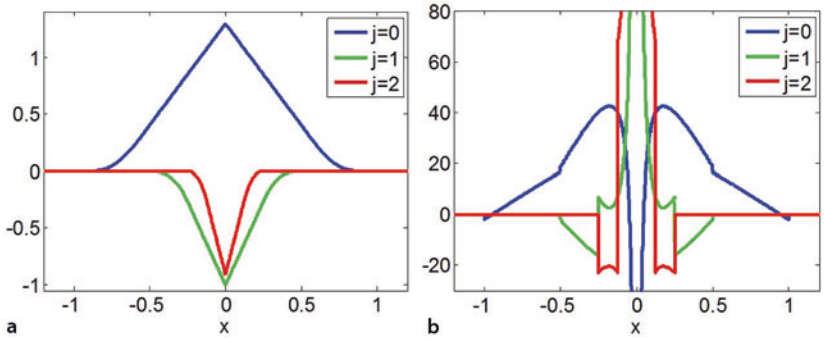


Abb. 4.8 Profile der Waveletfunktionen $\Psi_{G_{\tau_j}}\left(\Delta + k_0^2; x, 0\right)$ (**a**) bzw. $\Psi_{\delta_{\tau_j}}(x, 0)$ (**b**) zur Wahl $L = \Delta + k_0^2$, $k_0 = 16\pi$ und $\tau_j = 2^{-j}$

und die τ_j-Waveletkontrastfunktionen (Bandpassanteile der Kontrastfunktion F zur Skala j)

$$(WF)_{\tau_j}(x) = \int_E \Psi_{\delta_{\tau_j}}(x, y)\, F(y)\, dy, \quad x \in E, \tag{4.23}$$

charakterisieren sukzessive die Detailinformationen, die in $V_{\tau_{j+1}}(x) - V_{\tau_j}(x)$ bzw. $F_{\tau_{j+1}}(x) - F_{\tau_j}(x)$ enthalten sind. In Abb. 4.4 sind die dieser Zerlegung entsprechenden Bandpassanteile unten dargestellt. Somit gewinnen wir entsprechend unseres Zugangs mit $(WV)_{\tau_j}$ bzw. $(WF)_{\tau_j}$ gegeben durch

$$(WV)_{\tau_j}(x) = V_{\tau_{j+1}}(x) - V_{\tau_j}(x), \quad x \in E, \tag{4.24}$$

$$(WF)_{\tau_j}(x) = F_{\tau_{j+1}}(x) - F_{\tau_j}(x), \quad x \in E, \tag{4.25}$$

die zur Skala j gehörigen Informationen über V bzw. F in Bandstruktur. Aus numerischer Sicht von besonderer Bedeutung ist, dass die Greenschen Waveletkerne $\Psi_{G_{\tau_j}}(L;x,y)$, als Funktion der Variablen y außerhalb einer Kugel $\mathcal{B}_{\tau_j}(x)$ vom Radius $\tau_j > 0$ mit Mittelpunkt x verschwinden. Dies impliziert dann

$$(WV)_{\tau_j}(x) = \int_{\mathcal{B}_{\tau_j}(x)\cap E} \Psi_{G_{\tau_j}}(L;x,y)\, F(y)\, dy, \quad x \in E, \tag{4.26}$$

d. h. das Integral erstreckt sich nicht über ganz E, sondern nur über den Schnittbereich $\mathcal{B}_{\tau_j}(x) \cap E$. Die Teleskopsummen

$$\sum_{j=0}^{J-1} (WV)_{\tau_j}(x) = \sum_{j=0}^{J-1} \left(V_{\tau_{j+1}}(x) - V_{\tau_j}(x)\right) \tag{4.27}$$

und

$$\sum_{j=0}^{J-1} (WF)_{\tau_j}(x) = \sum_{j=0}^{J-1} \left(F_{\tau_{j+1}}(x) - F_{\tau_j}(x)\right) \tag{4.28}$$

liefern für $J = 1, 2, \ldots$

$$V_{\tau_J}(x) = V_{\tau_0}(x) + \sum_{j=0}^{J-1} (WV)_{\tau_j}(x) \tag{4.29}$$

und

$$F_{\tau_J}(x) = F_{\tau_0}(x) + \sum_{j=0}^{J-1} (WF)_{\tau_j}(x), \tag{4.30}$$

sodass sich simultan beim Grenzübergang $J \to \infty$ die Multiskalenapproximationen (vgl. (4.11))

$$V(x) = \lim_{J\to\infty} V_{\tau_J}(x) = V_{\tau_0}(x) + \sum_{j=0}^{\infty} (WV)_{\tau_j}(x) \tag{4.31}$$

und

$$F(x) = \lim_{J\to\infty} F_{\tau_J}(x) = F_{\tau_0}(x) + \sum_{j=0}^{\infty} (WF)\,\tau_j(x) \tag{4.32}$$

$$= \lim_{J\to\infty} L_x V_{\tau_J}(x) = L_x V_{\tau_0}(x) + \sum_{j=0}^{\infty} L_x (WV)_{\tau_j}(x) \tag{4.33}$$

ergeben. Dies bedeutet, dass sich $V(x)$ bzw. $F(x)$ aus einer Tiefpassfilterung $V_{\tau_0}(x)$ bzw. $F_{\tau_0}(x)$ und der sukzessiven Addition von Bandpassfilterungen $(WV)_{\tau_j}(x)$ bzw. $(WF)_{\tau_j}(x), j = 0, 1, \ldots$, ergeben.

Die in (4.32) dargestellte Dekorrelation kann mithilfe eines Tree-Algorithmus effizient umgesetzt werden (siehe Freeden und Maier 2002). Dabei ist das Ziel des Tree-Algorithmus, die Berechnung der auftretenden Filterstufen mittels einer rekursiven Dekomposition durch Einlesen der Daten auf der höchsten Skalenstufe erheblich zu beschleunigen. Hierzu wird ein Pyramidenschema verwendet, wie es in Abb. 4.9 zu sehen ist. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung ist hierbei die Existenz einer Folge von Kernen Θ_j, die garantieren, dass

$$\delta_{\tau_j}(x,y) \simeq \int_E \delta_{\tau_j}(x,z)\,\Theta_j(z,y)\,dz, \tag{4.34}$$

$$\Theta_j(x,y) \simeq \int_E \Theta_j(x,z)\,\Theta_{j+1}(z,y)\,dz, \tag{4.35}$$

gilt. Des Weiteren ist zu beachten, dass die τ_j-Kontrastfunktion und τ_j-Waveletkontrastfunktion mittels einer Integrationsregel mit Integrationsgewichten $w_k^{N_k}$ in N_k Knoten $y_k^{N_k}$ durch

$$F_{\tau_j}(x) = \int_E \delta_{\tau_j}(x,y)\,F(y)\,dy \simeq \sum_{k=1}^{N_j} a_k^{N_j}\,\delta_{\tau_j}\left(x, y_k^{N_j}\right) \tag{4.36}$$

sowie

$$(WF)_{\tau_j}(x) = \int_E \Psi_{\delta_{\tau_j}}(x,y)\,F(y)\,dy \simeq \sum_{k=1}^{N_j} a_k^{N_j}\,\Psi_{\delta_{\tau_j}}\left(x, y_k^{N_j}\right) \tag{4.37}$$

approximiert werden können, wobei die Koeffizienten $a_k^{N_j}, j \le J$, im ersten Schritt startend mit der feinsten Detailstufe J als

$$a_k^{N_J} = w_k^{N_J} F\left(y_k^{N_J}\right), \quad j \le J, \tag{4.38}$$

gegeben sind. Dabei können die Koeffizienten $a_k^{N_j}, j < J$, rekursiv über

$$a_k^{N_j} = w_k^{N_j} \int_E \Theta_j\left(y, y_k^{N_j}\right) F(y)\,dy \tag{4.39}$$

$$= \int_E \int_E \Theta_{j+1}(z,y)\,\Theta_j\left(z, y_k^{N_j}\right) dz F(y)\,dy \tag{4.40}$$

$$\simeq w_k^{N_j} \sum_{s=1}^{N_{j+1}} w_s^{N_{j+1}}\,\Theta_j\left(y_s^{N_{j+1}}, y_k^{N_j}\right) a_s^{N_{J+1}} \tag{4.41}$$

$$\begin{array}{ccccccccc} F & \to & a^{N_J} & \to & a^{N_{J-1}} & \to \ldots \to & a^{N_{j_0+1}} & \to & a^{N_{j_0}} \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ & & F_{\tau_J} & & F_{\tau_{J-1}} & & F_{\tau_{j_0+1}} & & F_{\tau_{j_0}} \end{array}$$

Abb. 4.9 Dekompositionsschema des Tree-Algorithmus

berechnet werden. Dies führt zu einem Dekompositionsschema der in Abb. 4.9 gezeigten Form.

Diese Art von Tree-Algorithmus lässt sich z. B. für die τ_j-Waveletkontrastfunktion bezüglich des Laplace-Operators, d. h. zur Zerlegung von Dichtemodellen, anwenden, indem man $\Theta_j = \delta_{\tau_{j+M}}$ für ein geeignetes $M \in \mathbb{N}_0$ wählt. Die Gitter, auf denen sich die Knoten $y_k^{N_k}$ befinden, können ineinander geschachtelt werden, jedoch ist zu beachten, dass bei der Wahl der Knoten und der Folge τ_j stets die Bedingung

$$\delta_{\tau_j}\left(y_m^{N_k}, y_l^{N_k}\right) \simeq \int_E \delta_{\tau_j}\left(y_m^{N_k}, z\right) \Theta_j\left(z, y_l^{N_k}\right) dz, \quad l, m \in N_k, \tag{4.42}$$

erfüllt ist. Unsere Multiskalentechniken sind in den Abb. 4.10 und 4.11 graphisch für die Operatoren $L = \Delta$ (Gravimetrie) und $L = \Delta + k_0^2$ (akustische Seismik) veranschaulicht.

Beispiel 4.1

Die Gravimetrie, d. h. die Wahl $L = \Delta$ liefert den wohl am einfachsten strukturierten Fall der Fredholmschen Integralgleichung (4.1). Es stellt sich heraus, dass die resultierenden Skalierungsfunktionen und Wavelets sich entsprechend ihrer Konzeption zur Ermittlung der im Newton-Integral (4.5) auftretenden Dichte F eignen (siehe Abb. 4.10). Konkret gilt in diesem Fall

$$G(\Delta; x, y) = -\frac{1}{4\pi} \frac{1}{|x-y|}, \quad x \neq y, \tag{4.43}$$

sowie vgl. (4.6)

$$\Delta_x V(x) = \Delta_x \int_E G(\Delta; x, y) F(y)\, dy = F(x), \quad x \in E \tag{4.44}$$

Für eine Nullfolge $\{\tau_j\}_{j=0,1,\ldots}$, z. B. die dyadische Folge $\tau_j = 2^{-j}, j = 0, 1, \ldots$, setzen wir

$$G_{\tau_j}(\Delta; x, y) = \begin{cases} -\dfrac{1}{8\pi\tau_j}\left(3 - \dfrac{1}{\tau_j^2}|x-y|^2\right), & |x-y| \leq \tau_j, \\ -\dfrac{1}{4\pi|x-y|}, & |x-y| > \tau_j. \end{cases} \tag{4.45}$$

Unter der Annahme, dass F gleichmäßig beschränkt in E samt Berandung ∂E, d. h. in $\overline{E} = E \cup \partial E$ ist, erhalten wir für das Newton-Integral

$$V(x) = \int_E G(\Delta; x, y) F(y)\, dy, \quad x \in E, \tag{4.46}$$

die Grenzrelationen

$$\lim_{J\to\infty} \sup_{x\in\overline{E}} \left|V(x) - V_{\tau_J}(x)\right| = 0. \tag{4.47}$$

Alternative Regularisierungsvarianten finden sich in Blick et al. 2017, Freeden und Blick 2013a, Freeden und Gerhards 2013b und den Dissertationen Blick 2015 und Möhringer 2014.

Beispiel 4.2

Der Helmholtz-Operator, d. h. die Wahl $L = \Delta + k_0^2$ stellt einen weiteren Fall der Fredholmschen Integralgleichung (4.1) dar. Die resultierenden Skalierungsfunktionen und Wavelets eignen sich gemäß ihrer Konzeption zur Diskussion von gestreuten Wellenfeldern im Frequenzbereich (z. B. für Born- und Rytov-Approximation vgl. Beylkin 1985; Marks 2006 und Snieder 2002) und einer Reihe von Migrationsmodellen (siehe Abb. 4.11). Es gilt

$$G\left(\Delta + k_0^2; x, y\right) = -\frac{1}{4\pi} \frac{\exp\left(ik_0 \left|x-y\right|\right)}{\left|x-y\right|}, \quad x \neq y, \tag{4.48}$$

sowie

$$\left(\Delta_x + k_0^2\right) V(x) = \left(\Delta_x + k_0^2\right) \int_E G\left(\Delta + k_0^2; x, y\right) F(y)\, dy = F(x), \quad x \in E. \tag{4.49}$$

Beispiel 4.3

Dieses Beispiel basiert auf der akustischen Wellengleichung, d. h. der Wahl $L = \Box_{t,x}$ wobei der d'Albembert-Operator $\Box_{t,x}$ gegeben ist durch

$$\Box_{t,x} = \left(\frac{\partial^2}{c_0^2 \partial t^2} - \Delta_x\right). \tag{4.50}$$

Die resultierenden Skalierungsfunktionen und Wavelets eignen sich entsprechend ihrer Konzeption zur Diskussion von gestreuten Wellenfeldern (Seismogrammen) im Zeitbereich. Für eine konstante Referenzgeschwindigkeit c_0 gilt

$$G(\Box; t, s; x, y) = \frac{1}{4\pi} \frac{\delta\left((t-s) - \frac{|x-y|}{c_0}\right)}{|x-y|}, \quad x \neq y, \tag{4.51}$$

sowie

$$\Box_{t,x} V(t,x) = \Box_{t,x} \int_E \int_{\mathbb{R}} G(\Box; t, s; x, y)\, F(s,y)\, dsdy = F(t,x), \quad x \in E,\ t \geq 0. \tag{4.52}$$

Entsprechende Regularisierungsvarianten finden sich in der Dissertation Blick (2015).

4.6 Dekorrelation von Signaturen in *E*

Im vorherigen Abschnitt haben wir erläutert, wie man in der Gravimetrie und/oder der Seismik einen Lösungsansatz für die Kontrastfunktion F aus Kenntnis von V in Form einer Fredholmschen Integraldarstellung (4.1) erhält, sodass V und F entsprechend der Skalen j in „Wellenpaketstrukturen" zerlegt werden. Innerhalb des Spektrums aller Wellenbänder (vgl. Abb. 4.10 zur Gravimetrie und Abb. 4.11 zur Seismik) spiegeln bestimmte Gesteinsformationen oder Aquifere ein spezifisches Wellenband wider, das mithilfe der

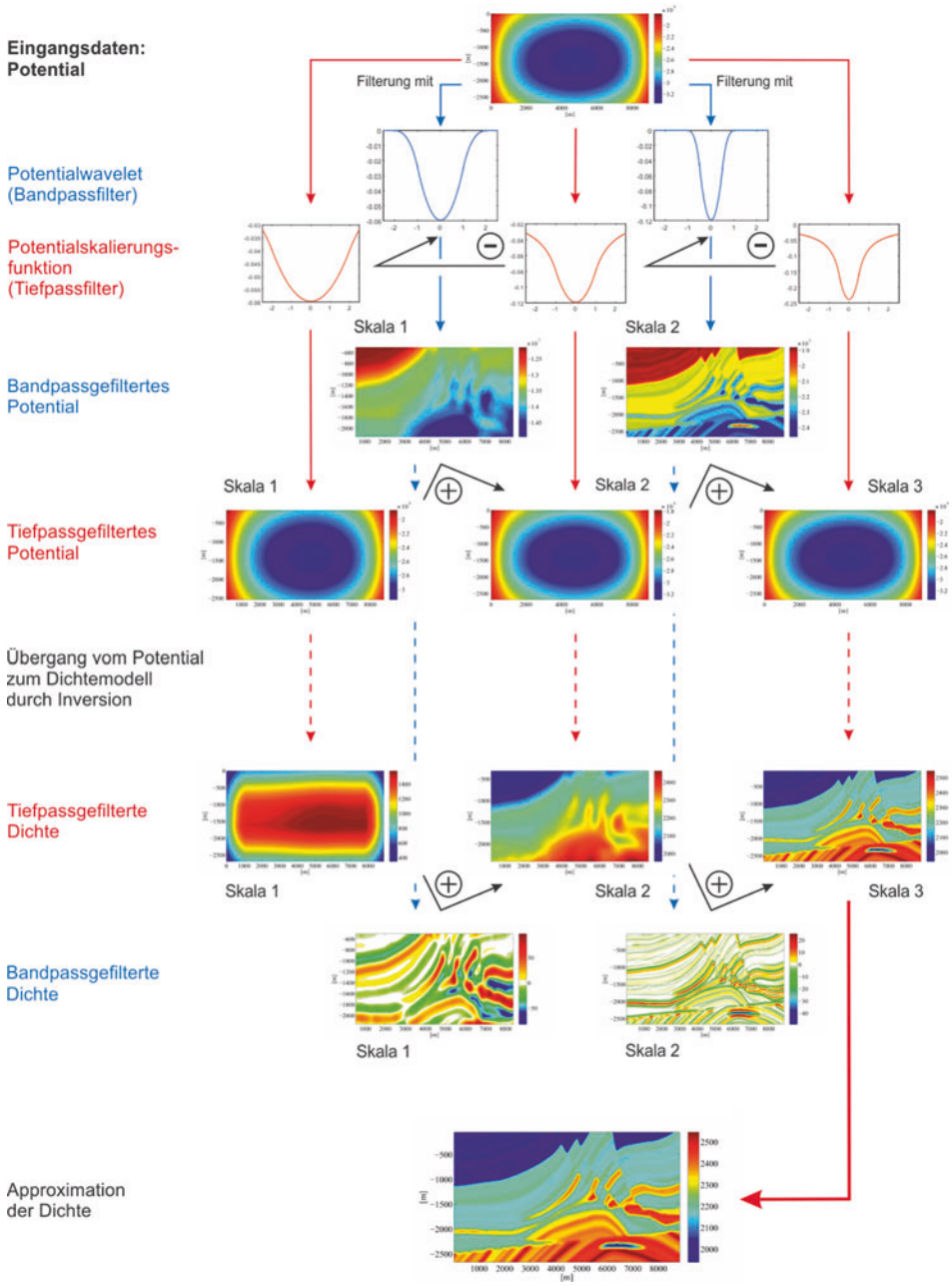


Abb. 4.10 Schema zur Veranschaulichung der Multiskalenanalyse zum Gravimetrieproblem, d. h. $L = \Delta$ (vgl. auch Blick et al. 2017)

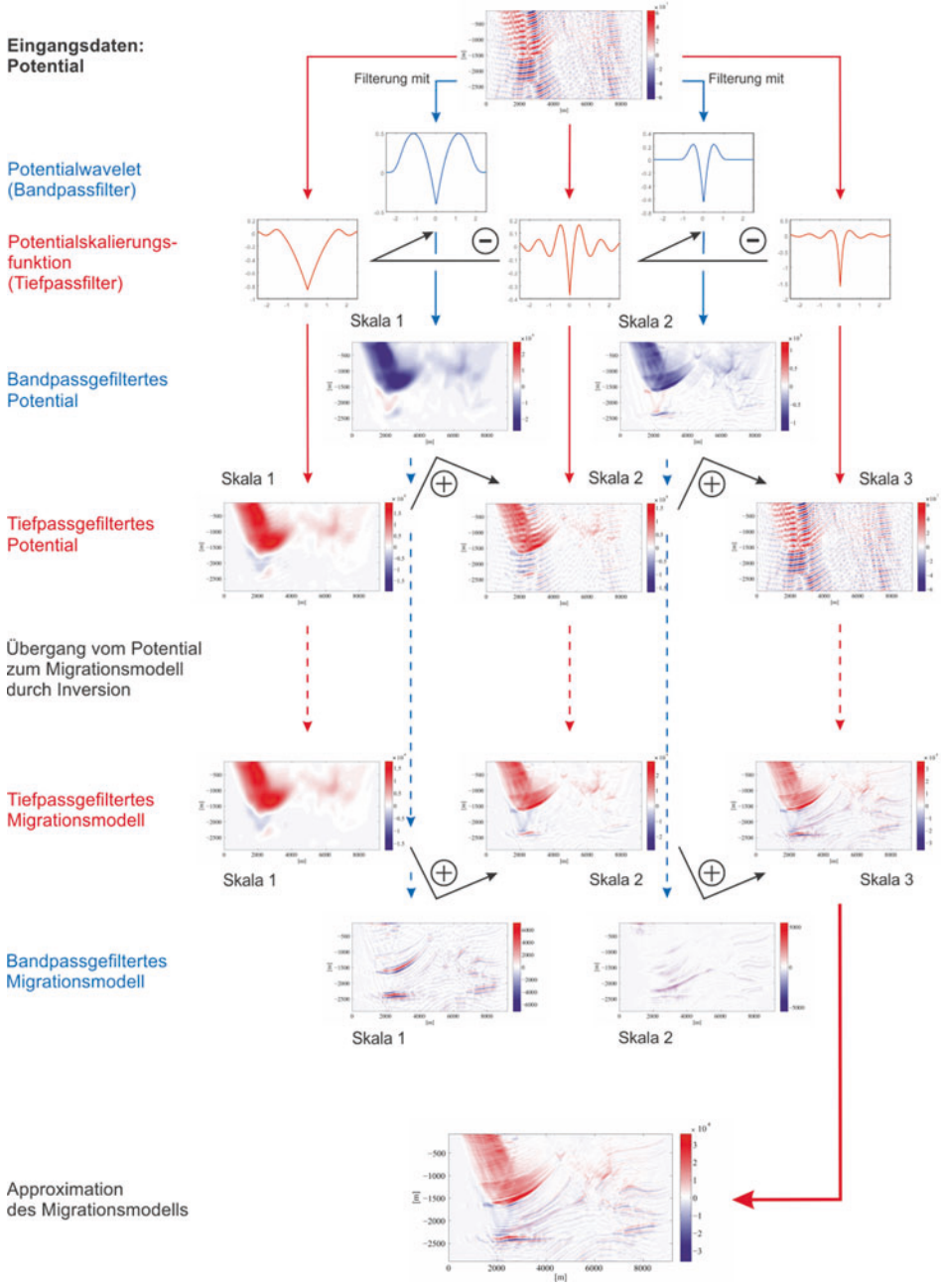


Abb. 4.11 Schema zur Veranschaulichung der Multiskalenanalyse zur Helmholtzschen Schwingungsgleichung, d. h. $L = \Delta + k_0^2$

Multiskalenanalyse durch Charakterisierung typischer Merkmale detektiert werden soll. Wie bereits erläutert, zeigen sich im Rahmen einer Multiskalenanalyse mittels Wavelets mit lokalem Träger charakteristische lokal reflektierte Signaturen im Signal in bestimmten Frequenzbändern.

Ein Prototyp für Untersuchungen in der Geoexploration ist das bereits erwähnte Marmousi-Modell, das wir exemplarisch zur Validierung unseres Multiskalenzugangs benutzen. Als Kontrastfunktion F verwenden wir hierbei ein 3D Marmousi-Dichtemodell (siehe Abb. 4.12). Wir führen zunächst eine Zerlegung des Potentials durch (siehe Abb. 4.13). Die Tiefpassanteile liefern keine strukturellen Informationen. Betrachtet man jedoch die Detailinformationen (Bandpassanteile), erkennt man für kleine Skalen j bereits wesentliche Elemente der geologischen Situation des ursprünglichen Dichtemodells. Bei der direkten Zerlegung des 3D-Marmousi-Dichtemodells F (Abb. 4.14) zeigt sich, dass die Information in den Bandpassanteilen (Abb. 4.13, rechts) zu den Tiefpassanteilen (Abb. 4.14, links) korreliert. Die Bandpassanteile (Abb. 4.14, rechts) liefern zusätzliche Informationen, beispielsweise in Skala $j = 9$ die Lage aller Dichteübergänge und damit die strukturelle Aufgliederung der geologischen Verhältnisse.

Abb. 4.15 zeigt die Anwendung des Tree-Algorithmus auf denselben Datensatz wie in Abb. 4.14. Selbstverständlich werden bei Anwendung des Tree-Algorithmus dieselben Schichten im Datensatz hervorgehoben und es lassen sich nach wie vor dieselben Grenzschichten erkennen. Allerdings schleicht sich in Richtung kleiner werdender Skalen eine leichte Unschärfe ein, die sowohl auf die Rekursion und die damit verbundene Verstärkung der Approximationsfehler als auch auf die Wahl der ineinander geschachtelten Gitter

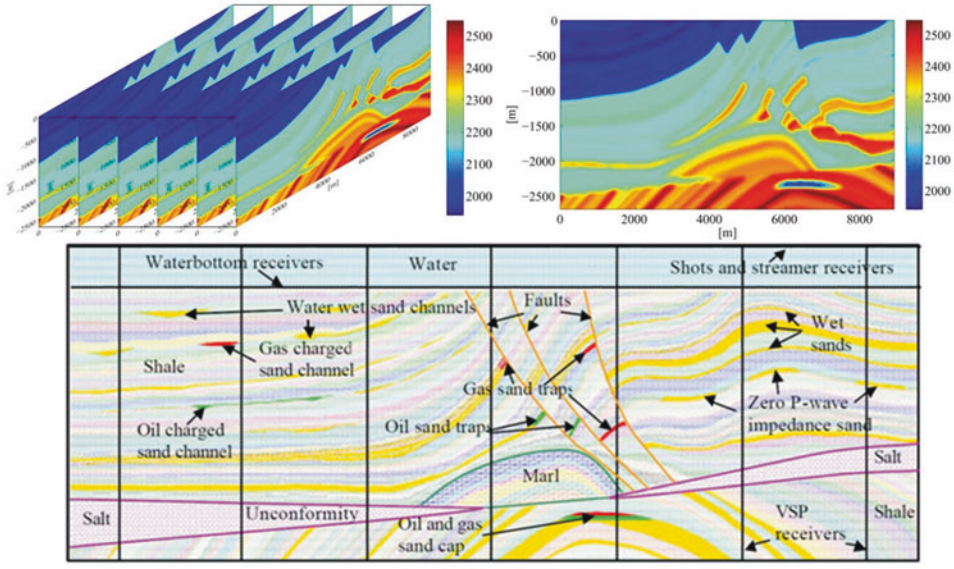


Abb. 4.12 3D-Marmousi-Dichtemodell (**a**) mit zugehörigem Schnitt (**b**, Symes 2014) in [kg/m^3] sowie die zugehörige Interpretation (**c**, Martin et al. 2002)

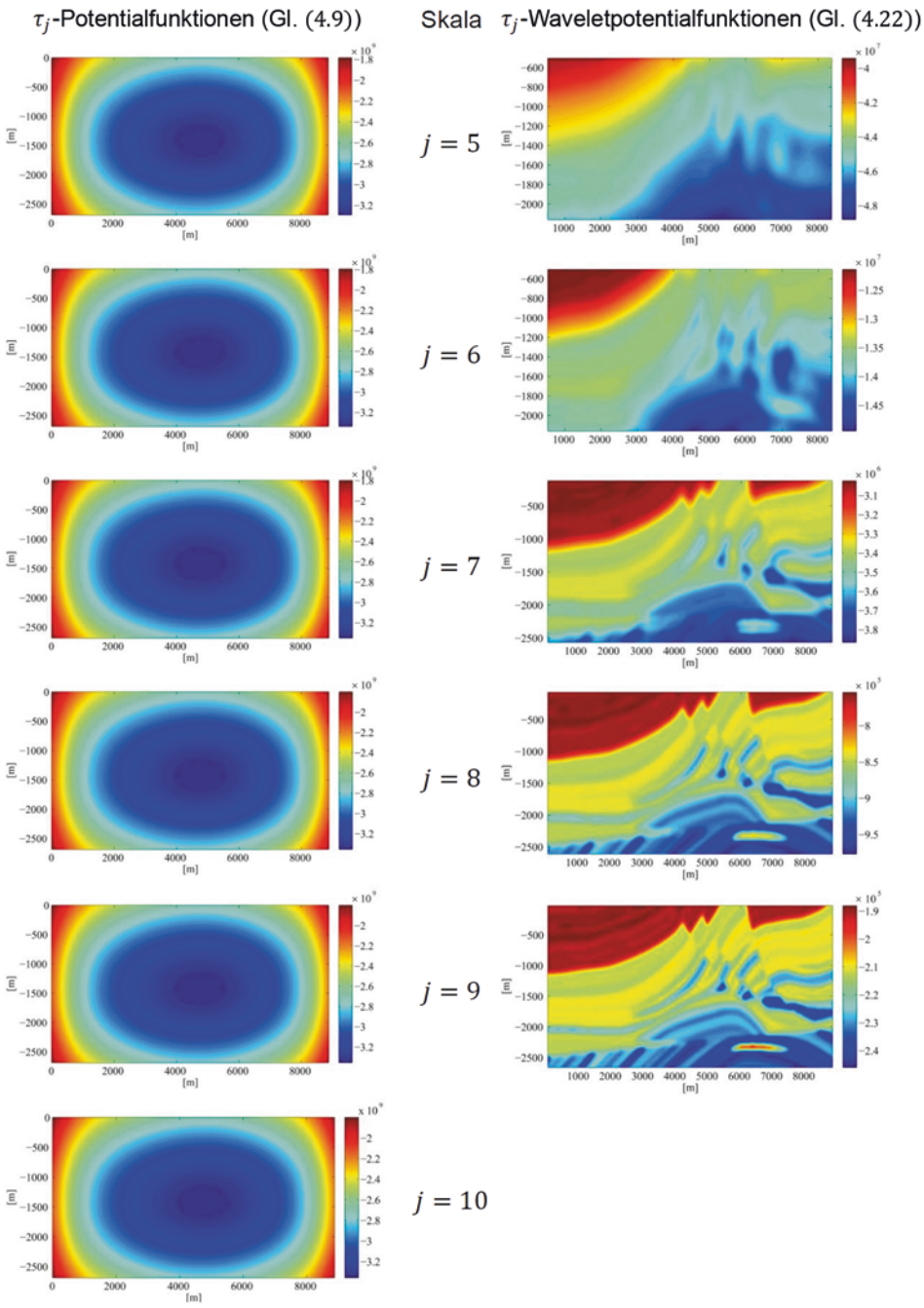


Abb. 4.13 Zerlegung des 3D-Marmousi-Potentials für die Nullfolge $\tau_j = 9200 \cdot 2^{-j}$ m in [kg/m]. Die Wahl der Nullfolge, d. h. der Faktor 9200 m, spiegelt hierbei die Länge des Explorationsareals wider

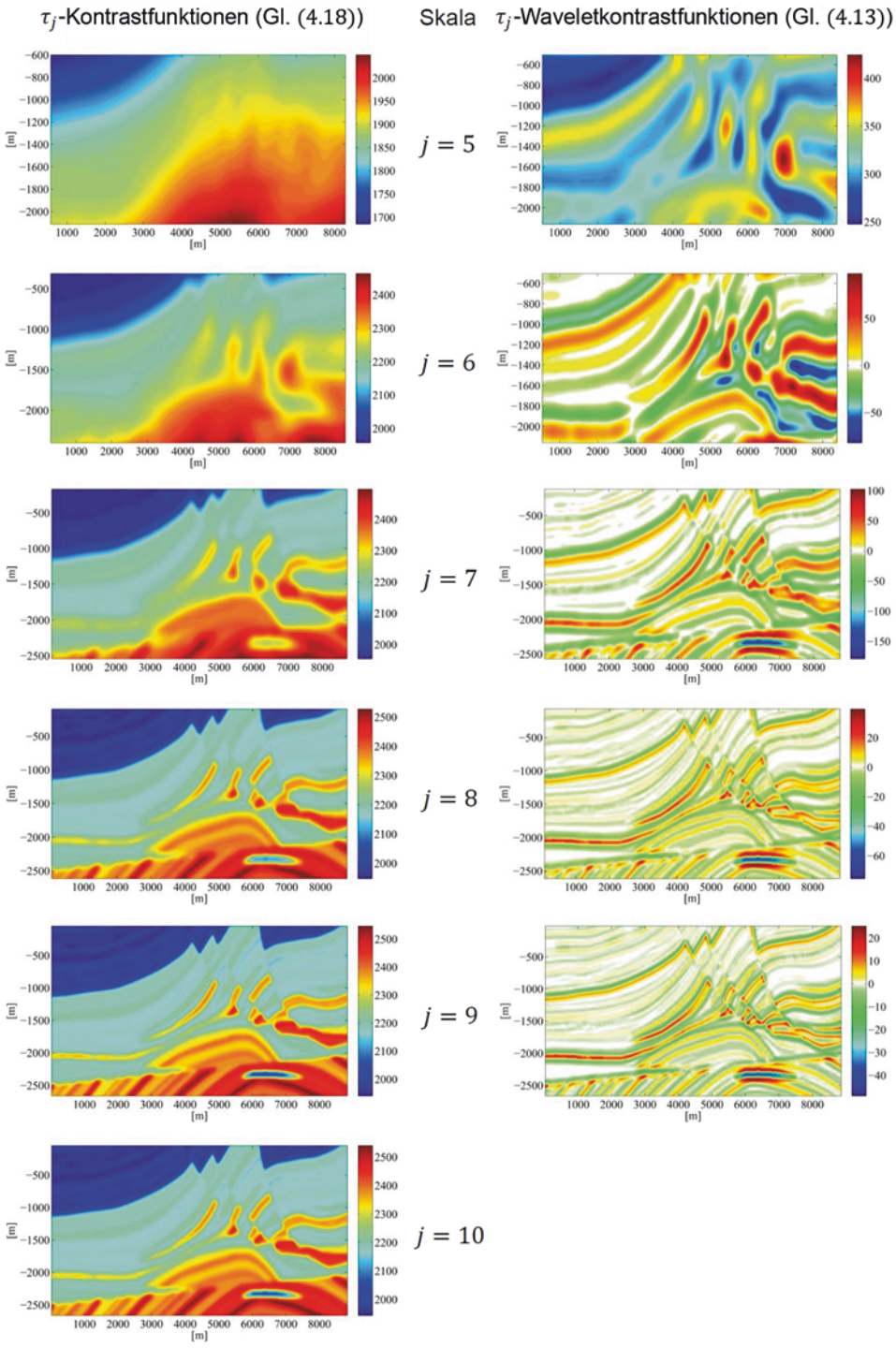


Abb. 4.14 Zerlegung des 3D-Marmousi-Dichtemodells für die Nullfolge $\tau_j = 9200 \cdot 2^{-j}$ m in [kg/m^3]. Die Wahl der Nullfolge, d. h. der Faktor 9200 m, spiegelt hierbei die Länge des Explorationsareals wider

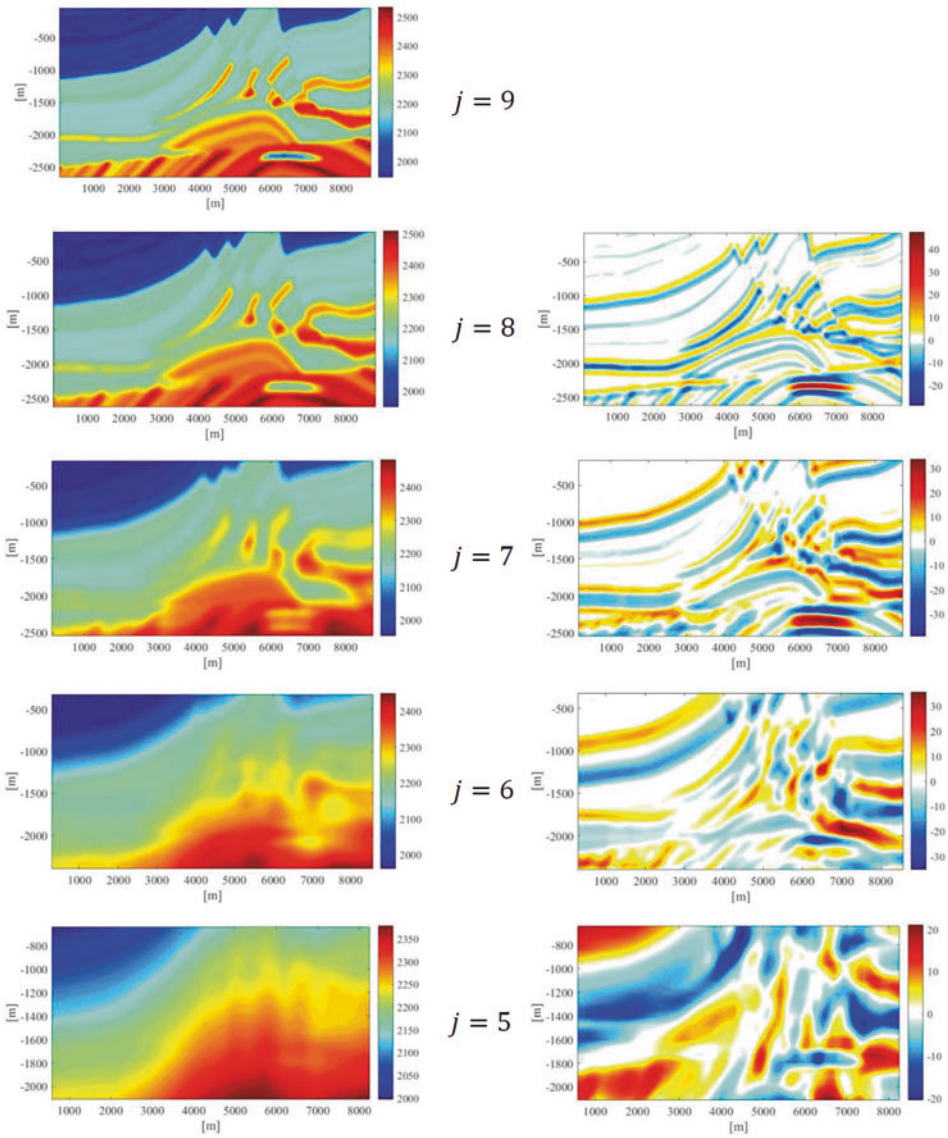


Abb. 4.15 Zerlegung des 3D-Marmousi-Dichtemodells für die Nullfolge $\tau_j = 9200 \cdot 2^{-j}$ m in [kg/m^3] mittels Tree-Algorithmus. Die Wahl der Nullfolge ist hierbei an die Länge des Dichtemodells angepasst

zurückzuführen ist. Bei der Berechnung wurden die orthogonalen Gitter so gewählt, dass $N_j = 1/4^{J-j} N_J$, $J > j$, gilt. Somit wird mit kleinerer Skala j das der Approximation zugrunde liegende Gitter immer gröber und die Approximation ungenauer. Dieser Nachteil wird allerdings durch den Rechenzeitgewinn (in unserem Beispiel mit einem Faktor 5) aufgewogen.

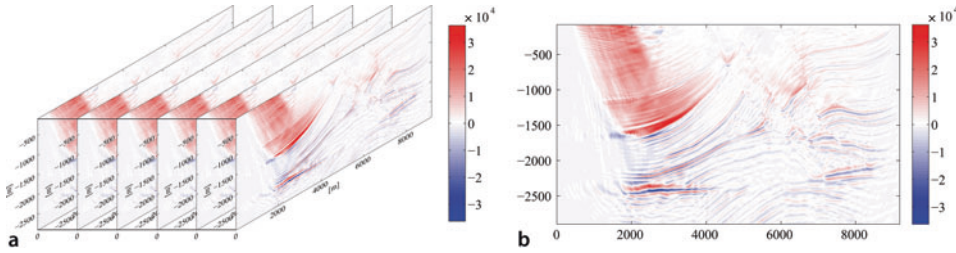


Abb. 4.16 3D-Marmousi-Migrationsmodell (**a**) und zugehöriger Schnitt (**b**, gemäß Ilyasov 2011)

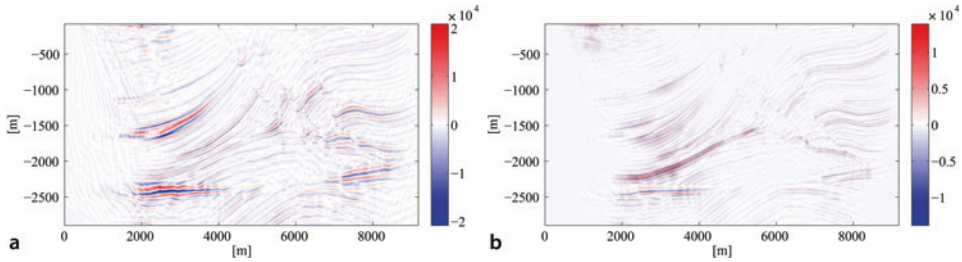


Abb. 4.17 Schnitte spezifischer Bandpassfilterungen des 3D-Marmousi-Migrationsmodells zu den Skalen $j = 5$ (**a**) und $j = 8$ (**b**) für den Operator $L = \Delta + k_0^2$, und $k_0 = 0.226 \frac{1}{\mathrm{m}}$, wobei die Wellenzahl k_0 als Repräsentant aus einer Parameterstudie ausgewählt wurde

Im nächsten Validierungsschritt widmen wir uns nun der Zerlegung von Seismiken in Form von Migrationsmodellen basierend auf der Helmholtzschen Schwingungsgleichung, d. h. wir verwenden den Operator $L = \Delta + k_0^2$ zur Wellenzahl k_0. Abb. 4.16 zeigt ein dem Marmousi-Dichtemodell entsprechendes 3D-Marmousi-Migrationsmodell. Abb. 4.17 stellt die Bandpassfilterung des Modells entlang eines 2D-Schnitts zu zwei verschiedenen Skalen j und der Wellenzahl $k_0 = 0,226\,1/\mathrm{m}$ dar. Es ist klar zu erkennen, dass verschiedene Gesteinsschichten bei Filterung mit unterschiedlichen Skalen j hervorgehoben werden. Vergleicht man die Ergebnisse der Zerlegung mit der Interpretation des Marmousi-Modells (Abb. 4.12), so erkennt man, dass in Abb. 4.17a hauptsächlich die Hervorhebung des Salzstocks im linken Teil der unteren Bildhälfte erfolgt. In Abb. 4.17b sieht man hingegen die Schieferschicht oberhalb des Salzstocks besonders deutlich.

4.7 Tiefendetektion geologischer Formationen lokal in *E*

Um Tiefenverhältnisse geologischer Strukturen in E näher zu beschreiben, modifizieren wir einen den Autoren zur Verfügung gestellten Datensatz einer Seismik im bayerischen Molassebecken (vgl. Abb. 4.18) durch künstliches Einbringen von lokalen Störungen, also der Superposition von Punktpotentialen, die anomale Störungen darstellen. Es zeigt

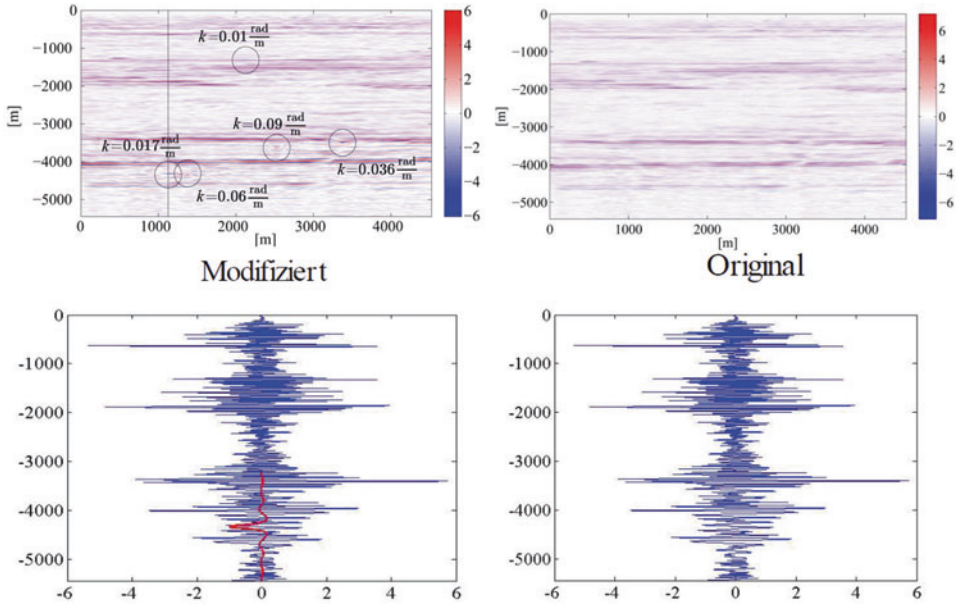


Abb. 4.18 Modifizierung des Migrationsergebnisses. Die beiden unteren Bilder zeigen beispielhaft die Originaldaten des Migrationsergebnisses (blau) entlang der schwarzen Linie im linken oberen Bild. Zusätzlich wurde die Modifizierung, die auf das vorhandene Signal addiert wird, im linken Bild (rot) eingetragen

sich, dass die Multiskalenzerlegung in der Lage ist, diese Störungen unabhängig von der abtastenden Wellenzahl k_0 ausfindig zu machen und hervorzuheben. Zur Modifizierung werden sphärische Wellen mit Amplitudengang 1/(Abstand zum Zentrum) zu den in Abb. 4.18 angegebenen Wellenzahlen und mit einer Ausdehnung vom Radius von ca. 1500 m zum Originalsignal addiert. Die Singularitäten dieser Punktpotentiale werden abgeschnitten, um die Position der künstlichen Störungen nicht offensichtlich zu machen. Um die künstlichen Störungen vollständig im vorhandenen Signal zu verstecken, werden die Störungen entsprechend skaliert. Ein Vergleich der Originaldaten und des modifizierten Signals in Abb. 4.18 demonstriert eindrucksvoll, dass derartige Modifizierungen des Signals zwar mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind, aber die auf diese Weise erzeugten synthetischen Testdaten innerhalb einer Multiskalenanalyse geeignet sind, die Fähigkeit zur Tiefenlokalisierung von Signalanteilen innerhalb einer geologischen Struktur zu verifizieren.

Das Ziel der Multiskalenzerlegung ist hier insbesondere die Bestimmung der Tiefenlage von Störungen (Abb. 4.19) zur Tiefendetektion geologischer Formationen. Dabei ist festzustellen, dass eine Aufschlüsselung des Datensatzes mit langwelligen Wavelets (d. h. „kleinen“ Wellenzahlen k_0, vgl. Abb. 4.19, links) grundsätzlich eine Fokussierung der Zerlegung auf langwellige Signalanteile bedeutet. Wavelets zu höheren Wellenzahlen ermöglichen eine bessere Fokussierung auf hochfrequente Störungen (vgl. Abb. 4.19,

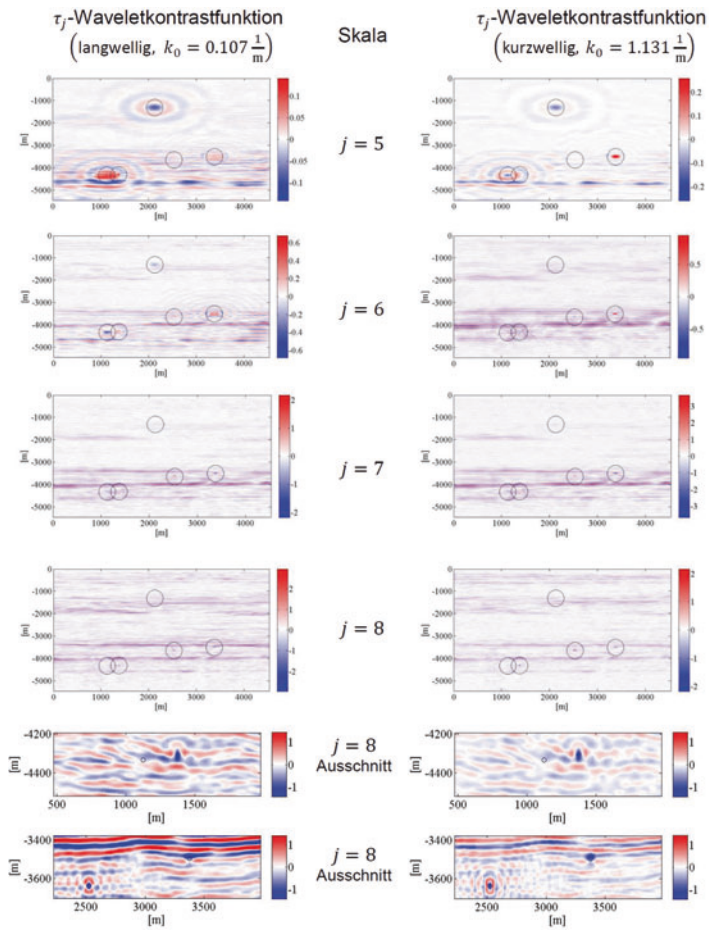


Abb. 4.19 Schnitte der τ_j Waveletkontrastfunktionen des modifizierten Migrationsergebnisses mittels langwelliger ($k_0 = 0.107\,\frac{1}{m}$, links) und kurzwelliger Wavelets ($k_0 = 1.131\,\frac{1}{m}$, rechts) zur Nullfolge $\tau_j = 5500 \cdot 2^{-j}$m (angepasst an die Ausdehnung des Datensatzes). Die Kreise zeigen die genaue Position der eingefügten Punktpotentiale

rechts). Dennoch lassen sich alle Zentren von Punktquellen für beide Wellenzahlen lokalisieren. Dies liegt daran, dass eine Erhöhung der Wellenzahl – und damit eine Erhöhung der abtastenden Frequenz – dazu führt, dass langwellige Signalanteile in Richtung niederer Skalen verschoben werden und umgekehrt. Dieser Umstand ist vor allem von numerischer Relevanz. Will man langwellige Störungen mit einem kurzwelligen Wavelet hervorheben, bedeutet dies, dass wir ein Wavelet zu einer niedrigen Skala benötigen und damit über ein großes Gebiet integrieren müssen. Dies ist numerisch sehr aufwendig und lässt sich dem hier vorgeschlagenen Zugang folgend einfach umgehen, indem die abtastende Wellenlänge entsprechend verringert wird.

4.8 Lokale Multiskalenverbesserung in der Bohrlochumgebung

Das Verfahren der Waveletrücktransformation in E von (4.1) beschäftigt sich abweichend von dem bisher verfolgten Zugang mit der folgenden Idee (vgl. (Freeden et al. 2013b) für die Herleitung einer Grundvariante): Als Ausgangssituation stehen in E oder einem Teilbereich von E diskret zwei Datensysteme zur Verfügung, eine „grobe“ Approximation und eine um zusätzliche Bohrlochdaten lokal verfeinerte Approximation. Das Ziel ist nun, für eine weitere Bohrung ein lokal hochgenaues, verbessertes Modell im Bohrlochareal zu konstruieren, um Folgebohrungen bestmöglich planen und durchführen zu können. Ausgangspunkt ist die Idee, dass die Differenz zwischen grobem und lokal um Bohrlochdaten verfeinertem 3D-Modell als lokalisierte Bandpassfilterung angesehen werden kann. Durch Diskretisierung der Integrale V_{τ_j} und F_{τ_j} mittels Kubaturformeln, d. h. durch näherungsweise Integration, erhält man ein lineares Gleichungssystem, das dünn besetzt ist, da das verwendete Wavelet einen lokalen Träger hat, also außerhalb eines bestimmten Bereiches Null ist. Der lokale Träger garantiert, dass das Verfahren lokal, d. h. nur auf den relevanten Bohrbereich, eingeschränkt werden kann und außerhalb des Trägers keine Änderungen stattfinden. Zugleich ist auch die Lösung des Gleichungssystems numerisch effizient und ist zusätzlich für die Verwendung von verrauschten Daten geeignet, da das Gleichungssystem durch ein an das Rauschen angepasstes paralleles „Smoothingverfahren“ gelöst werden kann (vgl. Blick et al. 2017 für nähere Einzelheiten, insbesondere dem erforderlichen Formelapparat).

Die Verbesserung durch zusätzliche Bohrlochdaten soll nun am Beispiel illustriert werden. Als Kontrastfunktion F betrachten wir einen Ausschnitt des 3D-Marmousi-Geschwindigkeitsmodells (Abb. 4.21b). Dieser Ausschnitt stellt das Zielmodell dar, d. h. den Datensatz, den wir zu rekonstruieren beabsichtigen. Durch Glättung werden die Eingangsdaten für das Verfahren generiert (Abb. 4.20). Somit können wir das Ergebnis qualitativ mit dem Zieldatensatz vergleichen.

Abb. 4.21 zeigt einen Schnitt des 3D-Ergebnisses und den entsprechenden Schnitt aus dem Zieldatensatz. Zusätzlich gibt Abb. 4.22 Aufschluss über den ursprünglichen Fehler (die Differenz der „lokal verfeinerten“ Approximation zum Zieldatensatz) und dessen Verbesserung. Abb. 4.22 zeigt, dass die Waveletrücktransformation zu einer deutlichen Fehlerreduktion führt. Tatsächlich ist der ursprüngliche maximale Fehler um einen Faktor 3.1 und der relative Fehler um einen Faktor 2.8 größer als nach der Durchführung des Verfahrens, was zu einem deutlich schärferen Geschwindigkeitsmodell führt (vgl. Abb. 4.22).

Eine umfangreiche Parameterstudie in der Dissertation Blick 2015 hat gezeigt, dass das Verfahren sowohl numerisch stabil als auch effizient ist. Da der resultierende relative Fehler kontinuierlich von der Wahl der Skala j abhängt, existiert ein Referenzintervall, sodass für jeden Skalenparameter j, der im Referenzintervall liegt, eine Verbesserung der Daten erreicht wird. Dies erlaubt einen gewissen Spielraum bei der Wahl der Parameter. Außerdem garantiert die Stetigkeit des Verfahrens, dass die „optimalen“ Parameter durch ein einfaches iteratives Verfahren aufgezeigt werden können.

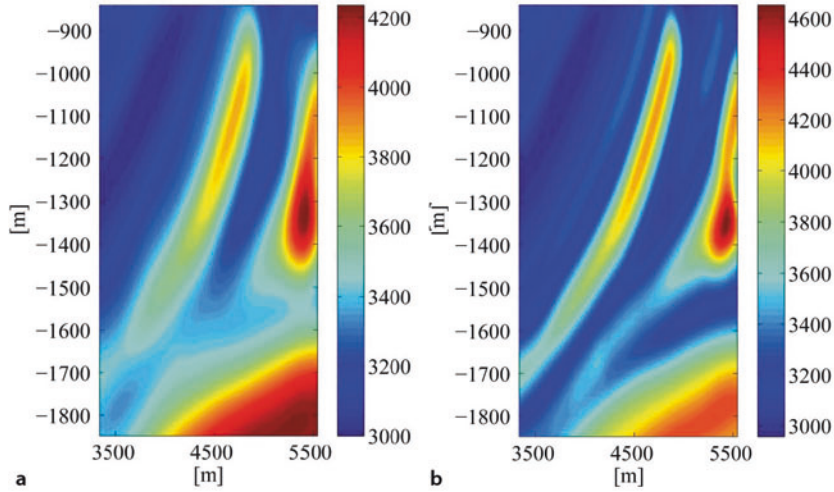


Abb. 4.20 Eingangsdaten für den waveletbasierten Verbesserungsprozess. Die Bilder zeigen Schnitte eines groben (**a**, $F_c(x)$) und eines feinen (**b**, $F_f(x)$) 3D-Modells entstanden durch Glättung des 3D-Marmousi-Geschwindigkeitsmodells (das Farbprofil zeigt die Geschwindigkeiten in [m/s] an, mit der die seismischen Wellen durch die geologische Struktur laufen)

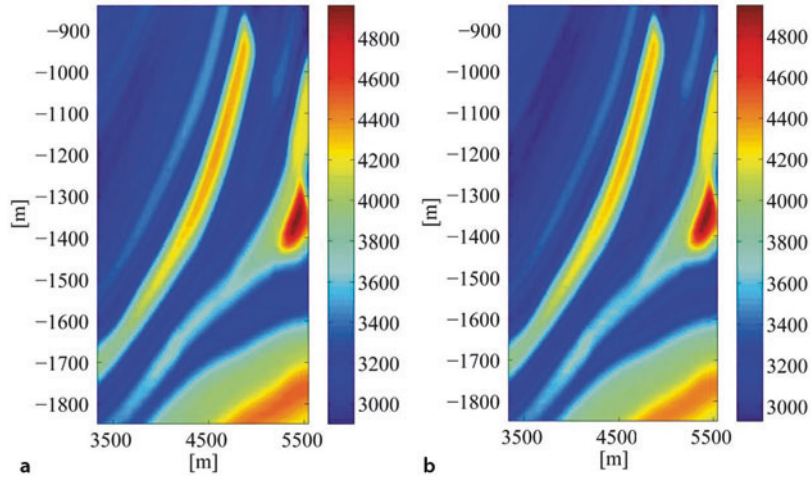


Abb. 4.21 Schnitt des Ergebnisses des waveletbasierten Verbesserungsprozesses (**a**) und Schnitt des Zieldatensatzes (**b**). Die Farben zeigen die Geschwindigkeiten in [m/s] an, mit der die seismischen Wellen durch das Gestein laufen

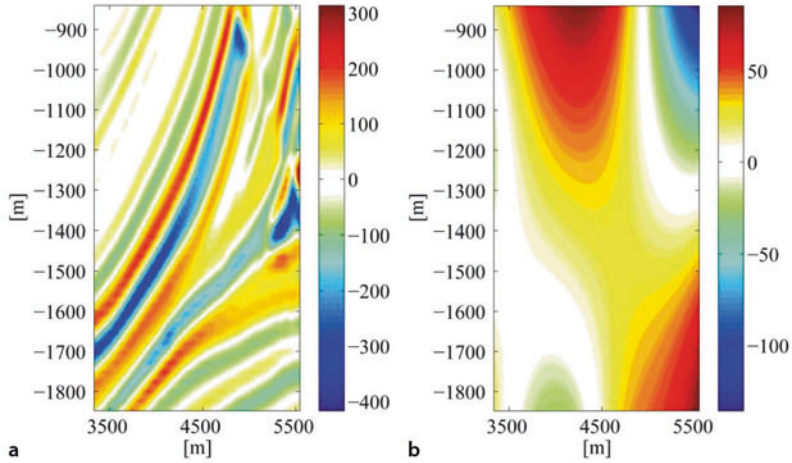


Abb. 4.22 **a** Ursprünglicher Fehler (Differenz des „feinen" 3D-Modells zur Zielfunktion) und **b** Fehler nach dem waveletbasierten Verbesserungsprozess (Differenz des Ergebnisses zur Zielfunktion) mit Fehler in [m/s]

4.9 Inverses Problem der Ermittlung der Dichte in *E* aus Potentialdaten des Komplements von *E*

Im Folgenden beschränken wir unsere Ausführungen aus Gründen der Einfachheit auf den Fall des Operators $L = \Delta$ entsprechend Gleichung (4.6). Die Inversion des Newton-Integrals, d. h. die Bestimmung der Dichtefunktion F mit endlicher „Signaturenergie" in E, d. h. die Bestimmung einer quadratintegablen Dichtefunktion in E, aus Information des Gravitationsfeldes V im Komplement von E, wird in den Geowissenschaften als *Gravimetrieproblem* bezeichnet.

Es wurde bereits erwähnt, dass das Gravimetrieproblem der Bestimmung der Dichte F aus der Kenntnis von V im Komplement von E im Gegensatz zum Verfahren der verbesserten Dichtebestimmung im vorangegangenen Abschnitt sich mit dem Phänomen des Auftretens von „Geistern" konfrontiert sieht. In der Tat sind für das Gravimetrieproblem zu quadratintegrablen Dichtefunktionen alle Kriterien der Wohlgestelltheit im Sinne der Klassifikation nach Hadamard verletzt, d. h. Eindeutigkeit, Existenz und Stabilität (siehe z. B. Freeden und Michel 2004; Michel 2002; Michel und Fokas 2008). Entsprechend der Hadamardschen Klassifikation stellt man folgende Eigenschaften fest:

- Das Potential V ist harmonisch im Komplement von $\overline{E}$. Gemäß der sogenannten Picard-Bedingung, die aus der Theorie der inversen Probleme bekannt ist (siehe z. B. Engl et al. (1996)), existiert eine Lösung nur dann, wenn V zum Raum der harmonischen Funktionen im Komplement von $\overline{E}$ gehört (oder einem entsprechenden Teilraum).

Allerdings sollte klargestellt werden, dass dies keine numerischen Schwierigkeiten verursacht, da in der Praxis die Information über V nur endlich-dimensional, d. h. diskret ist. Insbesondere ist eine Approximation durch eine passende harmonische Funktion ein selbstverständlicher Bestandteil jeder geophysikalischen Praxis.

- Das schwerwiegendste Problem stellt die fehlende Eindeutigkeit der Lösung dar, da der Lösungsraum orthogonal in die abgeschlossenen Teilräume der harmonischen Funktionen und der sogenannten anharmonischen Funktionen zerfällt. Für eine quadratintegrable Dichte $F \in L^2(E)$, d. h. eine Dichte mit endlicher „Signaturenergie“ in E bedeutet dies, dass sie anteilig in eine in E harmonische Funktion F_{harm} und einen anharmonischen Anteil $\hat{F} = F_{anharm}$ zerfällt. Für jeden Punkt x im Komplement von E steht F_{anharm} orthogonal zur harmonischen Greensche Funktion $G(\Delta; x, y)$ *im Raum* $\mathbb{R}^3$ (vgl. (4.6)). Mit anderen Worten, der dem Gravimetrieproblem assoziierte Integraloperator besitzt in diesem Fall einen Kern (Nullraum), der mit dem abgeschlossenen linearen Teilraum aller in E anharmonischen Funktionen zusammenfällt (vgl., z. B., Freeden et al. 2013b; Freeden und Michel 2004). Der Raum aller anharmonischen Funktionen auf E, d. h. der Raum der „Geister“, ist bekanntermaßen (vgl. z. B. Freeden und Gerhards 2013b) unendlich-dimensional. In der Konsequenz bedeutet dies, dass bei Vorgabe von $V(x)$ für Punkte x im Komplement von E nur die harmonische Dichte bestimmbar ist und die Menge der anharmonischen Dichten F_{anharm} sich als „gewaltig großer Geist“ des Gravimetrieproblems herausstellt.
- Schränkt man nun den Integraloperator auf harmonische Dichten ein, erhält man eine injektive Abbildung mit einer unbeschränkten Inversen und somit eine instabile Lösung (vgl. Freeden und Michel 2004). In der Tat wird die Schwierigkeit der Nicht-Eindeutigkeit ausführlich in der Literatur diskutiert. Das Problem kann nur unbefriedigend bewältigt werden, indem man einige sinnvolle zusätzliche Bedingungen an die Dichte stellt. Die näherungsweise Berechnung der harmonischen Dichte wurde bereits in einer Vielzahl von Veröffentlichungen umgesetzt und behandelt, während das Problem der Bestimmung des anharmonischen Anteils nach wie vor eine große Herausforderung ist. Aufgrund der fehlenden angemessenen physikalischen Interpretation des harmonischen Anteils der Dichte wurden in der Literatur verschiedene alternative Varianten diskutiert (vgl. z. B. Freeden und Michel 2004; Michel und Fokas 2008 und die darin enthaltenen Referenzen).

Speziell mit der hier vorgestellten Multiskalentechnik lässt sich das Gravimetrieproblem mit Messdaten im Komplement von E, insbesondere der Oberfläche ∂E, wie folgt angehen: Wir erinnern uns an die Diskretisierung des regularisierten Newton-Integrals in der ausintegrierten Form

$$V_{\tau_J}(x) = \int_E G_{\tau_J}(\Delta; x, y) F(y)\, dy \simeq \sum_{k=1}^{N_J} \underbrace{w_k^{N_J} F\left(y_k^{N_J}\right)}_{a_k^{N_J}} G_{\tau_J}\left(\Delta; x, y_k^{N_J}\right) \tag{4.53}$$

wobei $w_k^{N_J}$ die Integrationsgewichte und $y_k^{N_J}$ Integrationsknoten datstellen.

Wird den Messdaten $V\left(x_l^M\right)$, $l = 1, \ldots, M$, eine hinreichend große Skala J, d. h. ein hinreichend kleiner Wert τ_J gemäß ihrer Schärfe und ihres Rauschanteils zugeordnet, entsteht ein lineares Gleichungssystem (vgl. (4.36), (4.37))

$$
\begin{aligned}
V_{\tau_J}\left(x_1^M\right) &= \sum_{k=1}^{\mathrm{N_J}} \mathrm{a_k^{N_J}} G_{\tau_J}\left(\Delta; x_1^M, y_k^{\mathrm{N_J}}\right), \\
&\vdots \\
V_{\tau_J}\left(x_l^M\right) &= \sum_{k=1}^{\mathrm{N_J}} \mathrm{a_k^{N_J}} G_{\tau_J}\left(\Delta; x_l^M, y_k^{\mathrm{N_J}}\right), \\
&\vdots \\
V_{\tau_J}\left(x_M^M\right) &= \sum_{k=1}^{\mathrm{N_J}} \mathrm{a_k^{N_J}} G_{\tau_J}\left(\Delta; x_M^M, y_k^{\mathrm{N_J}}\right),
\end{aligned}
\tag{4.54}
$$

das zu den M Messdaten $V\left(x_l^M\right)$, $x_l^M \in E$, $l = 1, \ldots, M$ im Außenraum die Koeffizienten $a_1^{N_J}, \ldots, a_{N_J}^{N_J}$ liefert. Wegen der Kenntnis der Gewichte $w_k^{N_J}$ erhält man dann als Information von F deren diskrete Werte $F\left(y_1^{N_J}\right), \ldots, F\left(y_{N_J}^{N_J}\right)$ und damit diskrete Information über die Dichte in E.

4.10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Leitprinzipien der hier geschilderten innovativen geomathematischen Ansätze lassen sich wie folgt charakterisieren: Multiskalenapproximation, d. h. Waveletapproximation, bedeutet, dass die Darstellung eines gravimetrischen und/oder seismischen Signals mittels Waveletkoeffizienten eine aussagekräftigere Form hat als die ursprüngliche Darstellung. Die Dekorrelation ermöglicht die Extraktion spezifischer Information, die im Signal enthalten ist. In der Regel zeigen die Signale in der geothermischen Praxis sowohl eine Korrelation im Frequenz- als auch im Ortsbereich. Wir nutzen insofern die Tatsache aus, dass Signalsignaturen, die sich auf bestimmte geologische Formationen begründen, hauptsächlich in bestimmten Frequenzbändern auftreten. Zur Dekorrelation setzen wir Skalierungsfunktionen ein, die gewisse Informationen sowohl im Ort als auch im Frequenzbereich im Sinne eines Zooming-In-Prozesses verfügbar machen. Detailanteile der geologischen Strukturen werden bei der Multiskalenanalyse mittels Differenzbildung zweier Skalierungsfunktionen herausgefiltert. Man nennt diese Differenzenfunktionen Wavelets und die herausgefilterten Informationen die Bandpassanteile des Signals.

Wir haben abrisshaft die Konstruktion physikalisch relevanter Wavelets basierend auf der Regularisierung Greenscher Funktionen zur Zerlegung gravimetrischer und seismischer Daten, wie sie in der geothermischen Exploration vorkommen, beschrieben

und an verschiedenen Beispielen untersucht. Der besondere Vorteil der hier verfolgten Dekorrelationsmethode liegt in der gleichzeitigen Berechnung von Potential- und Kontrastfunktion in E, ohne dass ein zusätzlicher mathematisch-numerischer Neuaufwand erforderlich ist und dies unter Gewährleistung physikalischer Relevanz und bei numerisch akzeptablem Aufwand. Die Zerlegungen des 3D-Marmousi-Dichtemodells und der zugehörigen Gravimetrie/Seismik zeigen eine Aufschlüsselung der Signale in ihre konstituierenden Bestandteile. Unsere numerischen Tests haben weiterhin gezeigt, dass die beschriebene Waveletrücktransformation zur Verbesserung von Datensätzen numerisch stabil ist. Insbesondere lässt sie sich durch den lokalen Träger der Wavelets auf die lokalen Bereiche, die von Interesse sind, einschränken. Die entstehenden linearen Gleichungssysteme sind dünn besetzt und lassen sich ökonomisch und effizient lösen. Rechnungen zur Zerlegung von Seismogrammen basierend auf der akustischen Wellengleichung (d'Alembertsche Differentialgleichung) zeigen ebenfalls vielversprechende Resultate). Auch das inverse Problem der Bestimmung der Kontrastfunktion F in E aus Dateninformation von V im Komplement von E führt über den Multiskalenansatz zu effizient lösbaren Gleichungssystemen.

Die erzielten Ergebnisse der hier vorgestellten geomathematischen Verfahren in der Geothermie lassen den Schluss zu, dass die Methoden in der Tat wesentlich zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos und damit zu gesteigerter Investmentsicherheit bei Geothermieprojekten durch gesichertere explorative Information beitragen, da die entwickelte Multiskalenmethode sich dem Wesen nach sowohl in der Gravimetrie als auch in der Seismik anwenden lässt. Sie ist daher geeignet, die der Inversion inhärenten „Geister" durch methodische Kombination weitgehend zu reduzieren.

Insgesamt ist festzustellen, dass die entwickelte Multiskalenmethode mittels Regularisierungswavelets ihren Ursprung in Arbeiten der AG Geomathematik der TU Kaiserslautern (siehe Publikationsverzeichnis) besitzt und nicht auf bereits in der Literatur zu findenden Ansätzen basiert. Zur Demonstration ihrer Wirksamkeit wurden umfangreiche numerische Studien durchgeführt, der Übergang zur elastischen Wellengleichung steht allerdings noch aus.

Als wesentliche Resultate und Charakteristika der Studien sind zu nennen:

- Physikalisch basiertes Verhalten und geeignete Interpretierbarkeit der entwickelten Wavelets im Helmholtz-Modell der seismischen Tomographie.
- Numerische Effizienz und Ökonomie der Wavelets durch adaptiv wählbare Träger und schnelle Algorithmen (Baumstruktur, *Fast Wavelet Transform*).
- Skalenabhängige Dekorrelation von Waveletbändern und geologischen Strukturen in einem systematischen „Zooming-In/Zooming-Out"-Dekorrelationsprozess.
- Spezifische Transparenz bestimmter geologischer Strukturen bei entsprechender Parameterwahl.
- Simultane Realisierung der Dekorrelation des Potentials V und der Kontrastfunktion F durch Differentiation für verschiedene Anwendungen (Gravimetrie, akustische Seismik etc.).

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie Berlin und dem Projektträger Jülich für die Finanzierung der Projekte GEOFÜND (Förderkennzeichen 0325512A, PI Prof. Dr. W. Freeden, TU Kaiserslautern, Germany) und SPE (Förderkennzeichen 0324061, PI Prof. Dr. W. Freeden, CBM – Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH, Bexbach, Deutschland, Gesellschafter Prof. Dr. mult. M. Bauer).

Literatur

Augustin, M., Blick, C., Eberle, S., Freeden, W., Gerhards, C., Ilyasov, M., Kahnt, R., Klug, M., Möhringer, S., Neu, T., Nutz, H., Michel née Ostermann, I., Punzi, A.: Modeling deep geothermal reservoirs: Recent advances and future perspectives. In: Freeden, W., Sonar, T., Nashed, M. Z. (Hrsg.) Handbook of Geomathematics, 2. Aufl., S. 1547–1629. Springer, Heidelberg (2015)

Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.): Handbuch Tiefe Geothermie. Springer, Heidelberg (2014a)

Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T.: Energiewirtschaft 2014 (Fakten und Chancen der Tiefen Geothermie). Springer Spektrum, Springer Fachmedien Wiesbaden (2014b)

Beylkin, G., Oristaglio, M. L.: Distorted-wave Born and distorted-wave Rytov approximation.Optics Communications, **53**, 213–216 (1985)

Blick, C.: Multiscale potential methods in geothermal research: Decorrelation reflected post-processing and locally based inversion. Ph.D.-Thesis, University of Kaiserslautern, Geomathematics Group, Verlag Dr. Hut, München (2015)

Blick, C., Freeden, W., Nutz, H.: Feature extraction of geological signatures by multiscale gravimetry. Int J Geomath, **8**, 57–83 (2017)

Engl, W., Hanke, M., Neubauer, A.: Regularization of inverse problems. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht (1996)

Ernstson, K.: Geologische und geophysikalische Untersuchungen. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, S. 19–80. Springer Spektrum, Berlin (2014)

Freeden, W.: The uncertainty principle and its role in physical geodesy. – Progress in Geodetic Science, S. 225–237. Shaker, Aachen (1998)

Freeden, W., Blick, C.: Signal decorrelation by means of multiscale methods. World of Mining. **65**, 304–317 (2013a)

Freeden, W., Gerhards, C.: Geomathematically oriented potential theory. Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton (2013b)

Freeden, W., Maier, T.: On Multiscale denoising of spherical functions: Basic theory and numerical aspects. Electronic Transactions on Numerical Analysis (ETNA), **14**, 40–62 (2002)

Freeden, W., Michel, V.: Multiscale potential theory (with applications to geoscience). Birkhäuser, Boston (2004)

Freeden, W., Nutz, H.: Mathematische Methoden. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, S. 125–221. Springer, Berlin (2014)

Freeden, W., Nutz, H.: Mathematik als Schlüsseltechnologie zum Verständnis des Systems „Tiefe Geothermie“. Jahresbericht der Deutschen Mathematikervereinigung (DMV). **117**, 45–84 (2015)

Freeden, W., Schreiner, M.: Local multiscale modelling of geoid undulations from deflections of the vertical. J. Geodesy. **79**, 641–651 (2006)

Gehringer, M., Loksha, V.: Handbook on planning and financing geothermal power generation. – ESMAP (Energy Sector Management Assistence Programm), Main Findings and recommandations. The International Bank for Reconstruction and Developement, Washington (2012)

Ilyasov, M.: A tree algorithm for Helmholtz potential wavelets on non-smooth surfaces: Theoretical background and application to seismic data postprocessing. – Ph.D.-Thesis, University of Kaiserslautern, Geomathematics Group (2011)

Jacobs, F. Meyer, H.: Geophysik-Signale aus der Erde. B.G. Teubner, Leipzig, und VDF Verlag, Zürich (1992)

Marks, D. L.: A family of approximations spanning the Born and Rytov scattering series. Optics Express, **14,** 8837–8848 (2006)

Martin, G. S., Marfurt, K. J., Larsen, S.: Marmousi-2: An updated model for the investigation of AVO in structurally complex areas. In: Proceedings, Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Salt Lake City (2002)

Michel, V.: A multiscale approximation for operator equations in separable Hilbert spaces – case study: Reconstruction and description of the Earth's interior. Habilitation thesis, University of Kaiserslautern, Geomathematics Group (2002)

Michel, V., Fokas, A. S.: A unified approach to various techniques for the non-uniqueness of the inverse gravimetric problem and wavelet based methods. Inverse Problems. **24** (2008). http://doi.org/10.1088/0266-5611/24/4/04519

Möhringer, S.: Decorrelation of gravimetric data. – Ph.D.-Thesis, University of Kaiserslautern, Geomathematics Group, Verlag Dr. Hut, München (2014)

Snieder, R.: General theory of elastic wave scattering. – Scattering and inverse scattering in pure and applied science, Pike, R., Sabatier, P. (Hrsg.) S. 528–542. Academic Press Inc., San Diego (2002)

Symes, W. W.: T.R.I.P. the Rice inversion project. – Department of computational and applied mathematics, Rice University, Houston, Texas, USA, http://www.trip.caam.rice.edu/downloads/downloads.html (2014). Zugegriffen: 04. Sept. 2014

Mathematische Lösungspotentiale, Strategien und Dilemmata

5

Willi Freeden und Helga Nutz

Inhaltsverzeichnis

5.1 Einleitung . . . 258
5.2 Grundgleichungen in der Exploration . . . 259
5.2.1 Gravimetrie . . . 260
5.2.2 Geomagnetfeldbestimmung . . . 260
5.2.3 Akustisch basierte seismische Tomographie (Helmholtz-Ansatz) . . . 261
5.2.4 Akustisch basierte seismische Tomographie (d'Alembert-Ansatz) . . . 262
5.3 Strategien und Dilemmata . . . 264
5.3.1 Regularisierung und Fehlerspezifikation . . . 267
5.3.2 Stetige und diskrete Regularisierung . . . 270
5.3.3 Dilemmata und Methodologien . . . 271
5.3.4 Grobe Eingruppierung der Regularisierungsmethoden . . . 272
5.4 Zusammenfassung und Ausblick . . . 276
Literatur . . . 278

Zusammenfassung

Das Kapitel stellt eine integrative Zusammenschau aller wesentlichen in der oberflächennahen Exploration verfügbaren Datensysteme und Methoden aus mathematischer Sicht bereit, um auf diese Weise zur Risikoreduzierung in einem geothermischen Projekt beizutragen. Die in der Exploration auftretenden physikalisch motivierten

Willi Freeden (✉)
Lehr- und Forschungsgebiet „Geomathematik", TU Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Straße 26, 67653 Kaiserslautern, Deutschland
e-mail: freeden@mathematik.uni-kl.de

Helga Nutz
CBM – Gesellschaft für Consulting, Business and Management mbH
Niederbexbacher Straße 67, 66450, Bexbach, Deutschland
e-mail: nutz@cbm-ac.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_5

Grundgleichungen werden beschrieben und klassifiziert. Sie führen zu sogenannten „Inversen Problemen“. Dieser Begriff wird in seiner mathematischen Bedeutung erläutert und die den Inversen Problemen innewohnende Eigenschaft der Schlecht-Gestelltheit im Hinblick auf die daraus resultierenden Schwierigkeiten bei der Lösung dem Leser verdeutlicht. Auf die Behandlung dieser Art von Gleichungen durch Regularisierung wird ausführlich eingegangen.

Schlüsselwörter

Gravimetrie · Geomagnetik · Grundgleichung · Inverse Probleme · Regularisierung · Risikoreduzierung · Schlecht-Gestelltheit · Tomographie

5.1 Einleitung

In Vorträgen auf Konferenzen und Tagungen, Seminaren etc. vernimmt man oftmals die Meinung, dass moderne geothermische Exploration, insbesondere im oberflächennahen Bereich, kein mathematisches Problem mehr darstelle und man das Risiko von Falschaussagen und Fehlinterpretationen doch weitgehend im Griff hätte. Empirische Methoden, die häufig mit gutem Erfolg angewendet werden, verleiten möglicherweise zu dem Schluss, dass in der geothermischen Exploration keine ernstzunehmenden mathematischen Probleme zu analysieren sind. Dabei sollte allerdings nicht in Vergessenheit geraten, dass auch bei erfolgreicher Anwendung empirischer Methoden der dem geophysikalischen Grundproblem zugrundeliegene Formelapparat und die daraus resultierenden Lösungsanforderungen erhalten bleiben. Auch in der oberflächennahen Exploration sollte man sich daher nie allein auf ein Verfahren verlassen, insbesondere wenn es weitgehend auf empirischen Simplifizierungen basiert. Eine integrative Zusammenschau aller verfügbaren Datensysteme und Methoden scheint aus mathematischer Sicht durchaus sinnvoll und geradezu unabdingbar, um zu einer Risikoreduzierung bei einem geothermischen Projekt beizutragen. Ohne die heutigen Forschungsfortschritte in der geothermischen Exploration anzuzweifeln oder auch kleinreden zu wollen, stellen sich für einen Mathematiker stets die drei eng verwobene Fragen, ob nicht doch entgegen der oftmals vertretenen Meinung ein gehöriges Restrisiko besteht, wodurch dieses Restrisiko bedingt ist und welche Perspektiven in Zukunft gegebenenfalls Abhilfe schaffen können (vgl. auch die Bemerkungen in Bauer et al. (2014) zur Risikoeinschätzung). Die Beantwortung dieser Fragen ist Gegenstand dieses Beitrages. Sie basiert dabei streng auf der intrinsischen Struktur der mathematisch eingesetzten Hilfsmittel und der im Modell auftretenden Strukturen, um eine wissenschaftlich nicht widerlegbare Objektivierung von Aussagen im Bereich der geothermischen Exploration zu ermöglichen. Es gilt das Prinzip, dass vereinfachende Regeln und empirische Schlussfolgerungen die mathematische Lösungskomplexität substantiell widerspiegeln müssen, ansonsten sind sie ihrem Wesen nach wertlos.

Bei einem solchen mathematisch fundierten Objektivierungsanspruch sind sich die Autoren dieses Beitrages selbstverständlich bewusst, dass zum Verständnis ein gewisses

Grundwissen der Mathematik an den Leser vorausgesetzt werden muss. Insbesondere ist die Darstellung der in der Exploration auftretenden Grundgleichungen (in Abschn. 5.2) ohne einen gewissen Formelapparat nicht denkbar. Der Gesamtbeitrag ist jedoch so angelegt, dass dieser Abschnitt überlesen werden kann, ohne den Gehalt und die Aussagekraft der in der Folge getroffenen mathematischen Sachverhalte und Schlüsse zu beeinträchtigen.

Die wesentlichen Inhalte des Beitrages, d. h. Strategien und Dilemmata der geothermischen Exploration, werden in Abschn. 5.3 behandelt. Angestrebt ist dabei ein verständlicher Überblick über das heutzutage verfügbare Lösungspotential in typisch mathematischer Vorgehensweise (vgl. auch Freeden (2015)). Der Brückenschlag zwischen Realität und Modell beinhaltet kanonisch eine Vereinfachung durch Abstraktion: Wesentliche Eigenschaften eines Explorationsproblems werden von unwichtigen getrennt und gehen in ein Lösungsschema ein. Der mathematische Blick für Gemeinsamkeiten erlaubt es nachträglich zu erkennen, dass ein geeignet reduziertes Problem auch aus ganz anderen Zusammenhängen und Verfahren entstehen kann. Entsprechend werden die resultierenden Lösungen bei angemessener Anpassung und Konkretisierung vielseitig verwendbar, allerdings weisen sie auch gleiche Lösungsdilemmata auf. Nichtsdestoweniger ist es dieses Wechselspiel aus Abstraktion und Konkretisierung, das die Entstehungsgeschichte der mathematischen Erkundungsmethoden auch in der Geothermie kennzeichnet, wobei Mathematik mittels ihrer verbindenden Sprache unter Einschluss von Computerverfahren und geeigneter Verarbeitung von Datensystemen ohne Zweifel zu ihrem hohen Standard beiträgt.

Der Beitrag schließt in Abschn. 5.4 mit einer Zusammenschau der gegenwärtigen mathematischen Komponenten in der oberflächennahen Exploration und der Würdigung des ursächlichen Zusammenhangs zwischen der Abstraktheit mathematischer Konzepte mit deren Schlag- und Querschnittsvermögen.

5.2 Grundgleichungen in der Exploration

Zunächst betrachten wir in mathematisch formelhafter Darstellung einige Explorationskonzepte, die von Relevanz in der Oberflächennahen Geothermie sind. Als Resultate erhalten wir häufig Integralgleichungen, die sich exemplarisch in der Form

$$\lambda\varphi(x) + \int_{\mathscr{B}} k(x,y)\varphi(y)\, dV(y) = F(x), \quad x \in \overline{\mathscr{B}}, \tag{5.1}$$

mit vorgegebener Kernfunktion $k : \overline{\mathscr{B}} \times \overline{\mathscr{B}} \to \mathbb{R}$ und rechter Seite $F : \overline{\mathscr{B}} \to \mathbb{R}$ darstellen lassen. Dabei ist $\mathscr{B}$ ein geeignet zu spezifizierendes Explorationsgebiet und $\overline{\mathscr{B}} = \mathscr{B} \cup \partial\mathscr{B}$ ist der topologische Abschluss von $\mathscr{B}$, wobei $\partial\mathscr{B}$ den Rand von $\mathscr{B}$ bezeichnet.

Ein geothermisches System liefert dabei gewöhnlich $F(x)$ als Messgrößen diskret für einen Teil des Randes $\partial\mathscr{B}$. Gesucht ist $\varphi(x)$ im Idealfall für alle Punkte $x \in \mathscr{B}$, zunächst aber nur für Punkte x im randnahen Bereich von $\mathscr{B}$, und zwar zumeist dort, wo die Messwerte auf dem Rand gewonnen wurden.

Mathematisch unterscheidet man Integralgleichungen erster Art ($\lambda = 0$) und zweiter Art ($\lambda = 1$). Bei den für die Oberflächennahen Geothermie interessanten Integralgleichungen handelt es sich durchweg um Integralgleichungen erster Art. Während die Theorie der Integralgleichungen zweiter Art oftmals gut verstanden ist, gibt es für Gleichungen erster Art bei verrauschten Daten oftmals keine voll befriedigende Theorie. Auf die besonderen Charakteristika dieser Fragestellungen werden wir in Abschn. 5.3 eingehen. Im Folgenden wenden wir uns zunächst einigen bedeutenden Integralgleichungen zu, mit denen wir in der Oberflächennahen Geothermie prototypenhaft konfrontiert sind.

5.2.1 Gravimetrie

Wir beginnen mit der Poisson-Gleichung, die mithilfe des Laplace-Operators Δ für ein geometrisch geeignet spezifiziertes Gebiet $\mathscr{B}$ des $\mathbb{R}^3$ durch

$$\rho = -\Delta P \tag{5.2}$$

gegeben ist, wobei nach der Newtonschen Theorie P das Gravitationspotential zur Dichteverteilung ρ in $\overline{\mathscr{B}}$ ist.

Die Fundamentallösung der homogenen Differentialgleichung zum Laplace-Operator Δ ist durch die rotationssymmetrische Kernfunktion

$$G(\Delta; |x-y|) = \frac{1}{4\pi\,|x-y|}, \quad x, y \in \mathbb{R}^3,\ x \neq y, \tag{5.3}$$

gegeben (siehe z. B. Freeden und Gerhards (2013) für weitere potentialtheoretische Ausführungen). Die allgemeine Lösung der Poisson-Gleichung (5.2) lässt sich mithilfe der Fundamentallösung in Form der Newtonschen Integraldarstellung

$$P(x) = \int_{\mathscr{B}} G(\Delta; |x-y|)\ \rho(y)\ dV(y), \quad x \in \mathbb{R}^3 \backslash \mathscr{B}, \tag{5.4}$$

angeben, wobei dV das Volumenelement im $\mathbb{R}^3$ und $\partial\mathscr{B}$ hinreichend glatt ist.

Eine wichtige Anwendung in der Oberflächennahen Geothermie ergibt sich über das sogenannte Gravimetrieproblem, d. h. der Bestimmung der Dichtefunktion ρ in $\overline{\mathscr{B}}$ im Newton-Integral aus beobachteter Information des Gravitationsfeldes P gewöhnlich auf dem Rand $\partial\mathscr{B}$ des Gebietes oder im Außenraum z. B. durch Satelliten mit niedrigen Orbits.

Weiterführende mathematische Literatur zur Gravimetrie als eine der klassischen Explorationsmethodiken findet der interessierte Leser z. B. in Anger (1981); Blakely (1996); Blick (2015); Freeden (1999); Freeden und Gerhards (2013); Freeden und Nutz (2014a,b); Kellogg (1929); Möhringer (2014); Nettleton (1976).

5.2.2 Geomagnetfeldbestimmung

In Analogie zur skalaren Poisson-Gleichung, die in der Gravimetrie Anwendung findet, kann eine vektorielle Form dieser Differentialgleichung für ein geometrisch geeignet

spezifiziertes Gebiet $\mathscr{B}$ des $\mathbb{R}^3$ formuliert werden:

$$\mu_0 \operatorname{div} m = -\Delta M. \tag{5.5}$$

Eine Anwendung dieser Integralgleichung finden wir in der Geomagnetik. In diesem Fall ist m die Magnetisierung, M das magnetische Potential, j die Stromdichte und μ_0 die magnetische Feldkonstante.

Die Fundamentallösung ist durch

$$Z(\Delta; |x-y|) = \nabla_x G(\Delta; |x-y|) = \frac{1}{4\pi} \nabla_y \frac{1}{|x-y|}, \quad x, y \in \mathbb{R}^3,\ x \neq y, \tag{5.6}$$

gegeben. Die allgemeine Lösung kann mithilfe der Integralgleichung

$$M(x) = \int_{\mathscr{B}} \mu_0\, Z(\Delta; |x-y|) \cdot m(y)\, dV(y) \tag{5.7}$$

berechnet werden (siehe Blakely (1996), Freeden und Gerhards (2013), Menke (1984)).

5.2.3 Akustisch basierte seismische Tomographie (Helmholtz-Ansatz)

Die Helmholtzsche Schwingungsgleichung in einem Ausbreitungsmedium $\mathscr{B}$ des $\mathbb{R}^3$ ist durch

$$\Delta U + k^2 U = W \tag{5.8}$$

gegeben, wobei U das Wellenfeld beschreibt und W die Ursache (Quelle).

Die Fundamentallösung der homogenen Differentialgleichung zum Helmholtz-Operator $\Delta + k^2$ ist durch

$$G(\Delta + k^2; |x-y|) = -\frac{1}{4\pi} \frac{e^{ik|x-y|}}{|x-y|}, \quad x, y \in \mathbb{R}^3,\ x \neq y, \tag{5.9}$$

gegeben. Damit kann die Lösung der Helmholtz-Gleichung bei festem Wellenparameter k in der Form

$$U(x) = \int_{\mathscr{B}} G(\Delta + k^2; |x-y|) W(y)\, dV(y), \quad x \in \mathscr{B}, \tag{5.10}$$

geschrieben werden (siehe z. B. Müller (1969)).

Die Helmholtz-Gleichung wird in der (akustischen) Tomographie angewandt. Dazu wird in der Regel der Operator $A = \Delta + k^2$ in der Form $A = A^{(0)} + A^{(1)}$ zerlegt, wobei sich $A^{(0)}$ auf ein als bekannt angenommenes Referenzmedium bezieht, in dem die zugeordnete partielle Differentialgleichung die Helmholtz-Gleichung mit einer konstanten Wellenzahl k_0 ist, also $A^{(0)} = \Delta + k_0^2$, und $A^{(1)}$ sich auf kleine Störungen im Medium bezieht, also $A^{(1)} = k_0^2 n$, wobei $k^2 = k_0^2(1+n)$ ist und n den Refraktionsindex bezeichnet. Die gestreute Welle U_s ergibt sich als Differenz aus dem wirklich beobachteten und dem einfallenden

Wellenfeld, d. h. $U_s = U - U_i$. Das inverse Problem der (akustischen) seismischen Tomographie besteht nun aus der Bestimmung der Funktion n unter Kenntnis des einfallenden Wellenfeldes U_i und der Messung des gestreuten Wellenfeldes U_s:

$$A^{(0)}U_i = W, \tag{5.11}$$

$$A^{(0)}U_s = -A^{(1)}U. \tag{5.12}$$

Weiterführende Literatur findet sich z. B. in Biondi (2006); Engl et al. (1996); Grasmair et al. (2015); Scherzer (2015); Snieder (2002); Symes (2003, 2007); Tarantola (1984).

5.2.4 Akustisch basierte seismische Tomographie (d'Alembert-Ansatz)

Die d'Alembertsche Wellengleichung ist durch

$$\left(\frac{1}{c^2(x)}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta_x\right) P(x,t) = Q(x,t), \quad x \in \mathscr{B},\ t \in \mathscr{I}, \tag{5.13}$$

gegeben, wobei P das Wellenfeld und Q die Quelle ist. Das Gebiet $\mathscr{B} \subset \mathbb{R}^3$ beschreibt das Ausbreitungsmedium und $\mathscr{I}$ das betrachtete Zeitintervall.

Für den D'Alemberschen Operator $\Box_{t,x} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta_x$ mit konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist die Fundamentallösung durch

$$G(\Box; |x-y|, t-s) = \frac{1}{4\pi}\frac{\delta\left((t-s) - \frac{1}{c}|x-y|\right)}{|x-y|}, \quad x, y \in \mathbb{R}^3, \quad x \neq y,\ t, s \in \mathbb{R}, \tag{5.14}$$

gegeben. Damit ergibt sich für die allgemeine Lösung der d'Alembertschen Wellengleichung (bei konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit) die Integraldarstellung

$$P(x,t) = \int_{\mathscr{I}}\int_{\mathscr{B}} G(\Box; |x-y|, t-s)\, Q(y,s)\, dV(y)\, ds, \quad x \in \mathscr{B},\ t \in \mathscr{I}. \tag{5.15}$$

Die d'Alembertsche Wellengleichung (5.13) wird in der (akustischen) seismischen Tomographie angewandt. Wir setzen

$$\frac{1}{c^2(x)} = \frac{1}{c_0^2}(1 + \nu(x)) \tag{\dots}$$

und zerlegen den Operator $A_{x,t} = \frac{1}{c_0^2}(1+\nu(x))\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta_x$ in der Form $A_{x,t} = A^{(0)}_{x,t} + A^{(1)}_{x,t}$, wobei

$$A^{(0)}_{x,t} = \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta_x = \Box_{t,x}, \tag{\dots}$$

$$A^{(1)}_{x,t} = \frac{\nu(x)}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} \tag{\dots}$$

Das Feld $P(x,t)$ kann nun in das einfallende Wellenfeld $P_i(x,t)$ und das gestreute Wellenfeld $P_s(x,t)$ zerlegt werden, sodass

$$P(x,t) = P_i(x,t) + P_s(x,t). \qquad (\dots)$$

Weiterhin sei $F(x,t) = -A^{(1)}_{x,t}P(x,t)$. Das inverse Problem der (akustischen) seismischen Tomographie besteht nun aus der Bestimmung der Funktion ν unter Kenntnis des einfallenden Wellenfeldes P_i und der Messung des gestreuten Wellenfeldes P_s:

$$\Box_{t,x}P_i(x,t) = Q(x,t), \qquad (\dots)$$
$$\Box_{t,x}P_s(x,t) = F(x,t). \qquad (\dots)$$

Weitere Ausführungen findet der interessierte Leser z. B. in Blick (2015); Blick et al. (2015); Freeden und Blick (2013); Freeden und Nutz (2014b); Yilmaz (1987).

Weitere geophysikalische Anwendungsfelder in der Geothermie und mathematisch daraus ableitbare Differential- und Integralgleichungsprobleme vom obigen Typ lassen sich beispielsweise in der Geoelektrik (vgl. auch Jacobs und Meyer (1992) und den Beitrag von Ernstson in dieser Monographie), bei Boden- und Georadar, welches den gleichen Prinzipien wie die Reflexionsseismik folgt, in der Wärmeleitung (siehe z. B. Carlslaw und Jaeger (1959), Gehlin (2002)) sowie beim Fluidfluss (vgl. z. B. Freeden und Mayer (2015)) aufzeigen. Deren detaillierte mathematische Beschreibung wird in diesem Beitrag auch aus Gründen der Lesbarkeit nicht weiter behandelt. Zu ihrem Studium verweisen wir auf die angegebenen Publikationen und die darin enthaltene Literatur.

Für die Geothermie ist dabei festzuhalten, dass die auftretenden Integralgleichungen der aufgelisteten Mess- und Auswerteverfahren stark variieren je nach der untersuchten Messgröße (z. B. Erdbeschleunigung, elektrische bzw. magnetische Feldstärke, Temperatur, Wärmefluss etc.), dem beobachteten Frequenzbereich und der dabei auftretenden „Feldcharakteristik“ (Potentialfeld, Diffusionsfeld oder Wellenfeld, jeweils abhängig von den zugrundeliegenden Differential- und Integralgleichungen). Insbesondere hat der Typ der Differentialgleichung großen Einfluss auf die Auswerteverfahren. Die mathematischen Erkundungsverfahren lassen sich dabei wie in der Geophysik üblich wie folgt klassifizieren:

- *Potentialverfahren* (Potentialfelder, elliptische Differentialgleichungen) in Gravimetrie, Geomagnetik, Geoelastik ...
- *Diffusionsverfahren* (Diffusionsfelder, parabolische Differentialgleichungen) in Magnetotellurik, Geoelektromagnetik ...
- *Wellenverfahren* (Wellenfelder, hyperbolische Differentialgleichungen) in Seismologie und Seismik, Georadar ...

Schließlich sollte Erwähnung finden, dass die Diversität der mathematischen Erkundungsverfahren in der Geothermie sich in Zukunft mit der technologischen Entwicklung von Mess- und Computertechnik erhöhen wird. Hinzu kommen luft- und satellitengestützte

Verfahren, die immer stärker für die Erkundung auch und insbesondere im oberflächennahen Bereich einsetzbar werden. Eine Kombination von terrestrisch basierten Verfahren mit Raum gestützten Methoden (etwa Satellitenmethoden) ist äußerst vielversprechend für zukünftige Explorationsvorhaben.

5.3 Strategien und Dilemmata

Wir wenden uns nun der abstrahierenden Formulierung geothermischer Grundgleichungen zu. In mathematischer Abstraktion (vgl. z. B. Nashed 1981a), beschreibt man ein technisches oder naturwissenschaftliches Problem wie in Abschn. 5.2 aufgeführt durch eine Operatorgleichung der Form

$$Ax = y, \quad x \in X, y \in Y. \tag{5.16}$$

Dabei bezeichnen wir mit x die Ursache aus der „Menge“ der Ursachen X und mit y die Wirkung aus der „Wertemenge“ der Wirkungen Y. A ist wie im vorherigen Abschnitt aufgezeigt ein (Differential- oder Integral-) Operator, der Ursache und Wirkung basierend auf dem zugrundeliegenden (technischen oder naturwissenschaftlichen) Problem miteinander verknüpft. In der Geothermie sind X und Y gewöhnlich Hilbert-Räume, d. h. vollständige Räume versehen mit einer Abstands- und Winkeldefinition, welche Positionierungen möglich machen.

Bei einem direktem Problem leitet man aus der messbaren und somit bekannten Ursache x die Wirkung y ab, das heißt man berechnet diese (direkt) mithilfe der Operatorgleichung. Wenn die Ursache x nicht oder auch nur in sehr unzureichender Form direkt messbar ist, so muss man von der beobachteten, messbaren Wirkung y auf deren Ursache x schließen. Derartige Probleme nennt man *inverses Problem*. Inverse Probleme stellen sich im Gegensatz zu den direkten Problemen als schwieriger zu lösen dar, da sie in der Regel „schlecht gestellt“ sind. Wichtig ist dabei die Erkenntis, dass diese Eigenschaft dem Problem selbst innewohnt und nicht aufgrund mangelnder oder fehlerhafter mathematischer Modellierung entsteht. Insofern kann diese Schwierigkeit nicht durch verbesserte Modellierung des zugrundeliegenden technischen oder naturwissenschaftlichen Problems überwunden werden, sondern man braucht möglichst komplementär gelagerte zusätzliche Strategien und Techniken zur erweiterten Lösbarkeit inverser Probleme.

An einfachen Beispielen lässt sich nun die *(begrenzte) Leistungsfähigkeit der Grundgleichung (5.16) bei Auftreten von „Geistern“* erklären.

(1) Es bezeichne x die Massendichte eines Körpers, y (im Sinne der Newtonschen Theorie) den Messwert (Gesamtmasse, Output) des resultierenden Gravitationspotentials. Es besteht die Möglichkeit, innerhalb eines Körpers Massen umzuverteilen, sodass sich dabei die Gesamtmasse und damit das Gravitationspotential nicht ändert. Dies kann man auf unendlich viele Weisen tun. Die Gesamtmasse ist insofern nur dann sinnvoll verwendbar, wenn man über die Gravitationspotentialwerte zusätzliche Eigenschaften des Körpers

kennt. In der Tat haben seit Stokes im 19. Jahrhundert zahlreiche Mathematiker und Physiker darauf hingewiesen, dass die eindeutige Bestimmung der Massendichte x innerhalb eines Objektes aus Messwerten an der Oberfläche nicht eindeutig möglich ist (vgl. z. B. Jacobs und Meyer (1992) für entsprechende Illustrationen).

(2) Ein weiteres Beispiel, das auch in der Medizin auftritt, sind Messungen von elektrischen Strömen, die sich auf der Oberfläche eines Körpers sehr genau als Output messen lassen. Es lassen sich, wie beim Gravitionsfeld der Erde, unendlich viele verschiedene Ladungsverteilungen x innerhalb des Körpers angeben, die dieselben Messwerte y erzeugen.

Bezeichnet x die wirkliche Lösung (*real world solution*) von (5.16) und z eine Lösung von $Az = 0$, die also keine Wirkung auf der Oberfläche hervorbringt und sich somit nicht bei der Messung von y auswirkt, so gilt bei den genannten Beispielen wegen der Linearität des Operators A

$$A(x+z) = \underbrace{Ax}_{=y} + \underbrace{Az}_{=0} = y. \tag{5.17}$$

In dieser Gleichung ist also z ein Geist, Phantom oder Artefakt bei der Messung von y, und solche Geister treten in den messenden Geowissenschaften, speziell bei Vorhandensein nur endlich vieler Messwerte, nicht nur in den genannten Beispielen auf.

Dies führt uns zur Schlussfolgerung, dass man zur Ermittlung der realen Lösung x auf zusätzliche Informationen angewiesen ist und mit einer Operatorgleichnung vom Typ (5.16) allein nicht auskommt.

Das Auftreten von Geistern, d. h. mathematisch die Nichteindeutigkeit der Lösung von (5.16), ist nur *eine* Schwierigkeit bei inversen Problemen. Wie sieht aber nun die Liste der Ursachen aus, die inverse Probleme als „schlecht gestellt“ kennzeichnen? Hadamard (1923) führte den Begriff der sogenannten gut gestellten Probleme ein. Ein gut gestelltes Problem zeigt folgende drei Eigenschaften:

- Die Gleichung $Ax = y$ hat für jedes $y \in Y$ eine Lösung $x \in X$ (*Existenz*).
- Diese Lösung ist eindeutig bestimmt (*Eindeutigkeit*).
- Die inverse Abbildung $A^{-1} : Y \to X$ ist stetig (*Stabilität*).

Bei Verletzung einer dieser drei Bedingungen heißt das Problem *schlecht gestellt* (*ill-posed problem*, IPP). Dabei erweist sich neben dem Auftreten von Geistern in der Praxis die dritte Bedingung als besonders kritisch. Dies liegt daran, dass bei Messungen die Daten nicht exakt vorliegen, sondern einem Messrauschen unterworfen sind. Ist die inverse Abbildung nicht stetig, so hängt die Lösung x nicht stetig von den Daten y ab. In der Folge können kleinste Messfehler zu drastischen Fehlern in der Lösung führen oder – im schlimmsten Fall – die Lösung völlig unbrauchbar machen.

Es sollte nochmals die wesentliche Erkenntnis betont werden, dass wir im Falle von schlecht gestellten inversen Problemen nicht aufgrund eines unvollständig oder

ungeschickt formulierten Modells schlechte Ergebnisse in der Lösung erzielen, sondern dass diese Problematik inhärent ist, d. h. dem jeweiligen Modell selbst innewohnt.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass Risikominimierung unter Einbindung geowissenschaftlicher Forschungsarbeit aus dem Bereich Geomathematik auch in der Oberflächennahen Geothermie absolut unabdingbar ist. Dies liegt daran, dass die geomathematische Aufgabe, geologische Information des Erdinnern aus z. B. gravimetrischen oder seismischen Daten an der Erdoberfläche zu gewinnen, unabhängig von der angestrebten Tiefenlage stets zu einem im oben definierten Sinn schlecht gestellten inversen Problem führt, bei dem sogar alle drei Bedingungen (also Existenz, Eindeutigkeit und Stabilität) verletzt sind. In der Konsequenz sind somit nicht nur Probleme der Tiefen Geothermie, sondern eben auch der Oberflächennahen Geothermie aufgrund ihrer Schlechtgestelltheit stets eine echte Herausforderung aus explorativer Sicht. Allerdings ist nicht von der Hand zu weisen, dass es mit zunehmender Tiefe intensivierterer mathematischer Lösungspotenziale und Numerik in der Exploration bedarf.

Wie können wir nun trotz der Schlechtgestelltheit eines Problems (5.16) dennoch verwertbare Informationen gewinnen? Zur Behandlung schlecht gestellter inverser Probleme (*ill-posed problems*, IPP) wurde in der Tat in den letzten Dekaden eine Vielzahl von Methoden entwickelt. Der Grundgedanke bei den meisten Lösungsmethoden (zur näherungsweisen Lösung) der IPP besteht im Wesentlichen darin, eine „Lösung“ zu konstruieren, die physikalisch gesehen als sinnvolle Näherung akzeptabel ist sowie aus numerischer Sicht ausreichend stabil ist. Das Grundproblem bei der Modellierung schlecht gestellter Probleme stellt dabei folgende Feststellung dar: Je genauer das mathematische Modell das IPP beschreibt, desto schlechter ist die „Konditionszahl“ des zugeordeten Berechnungsproblems, d. h. desto anfälliger ist das Verfahren Fehlern gegenüber. Die Schwierigkeit bei schlecht gestellten Problemen besteht dabei insbesondere darin, zusätzliche Information, Kompromisse oder neue Ausblicke hilfreich und zielführend so in die bestehende Lösung zu integrieren, dass die Genauigkeit der Lösung auch tatsächlich verbessert wird. Üblicherweise spricht man von der sogenannten „Regularisierung eines schlecht gestellten Problems“ zur Beschreibung der verschiedenen Lösungsansätze zur Umgehung dieses Problems der fehlenden stetigen Abhängigkeit (ebenso wie die Untersuchung von Existenz- und Eindeutigkeitsaussagen). Grob gesprochen beinhaltet dies die Analyse des IPP durch Analyse entsprechender zugeordeteter gut gestellter Probleme, also einer Familie (üblicherweise eine Folge oder ein System) von gut gestellten Problemen, die sinnvolle Antworten auf das schlecht gestellte Problem liefern. Dabei sind nach Nashed (1981a), einem der Pioniere der Theorie der inversen Probleme, drei Aspekte bei der Regularisierung von Relevanz:

- *Strategie zur Lösung und Rekonstruktion,*
- *Regularisierung-Approximationsschema,*
- *Algorithmen zur Regularisierung.*

Wir verfolgen in diesem Artikel im Wesentlichen das Ziel, die verschiedenen Methoden und Ergebnisse voneinander abzugrenzen. Die *Strategie der Lösung und Rekonstruktion von schlecht gestellten Problemen* beinhaltet mindestens eine der folgenden intuitiven

Ideen (für nähere Einzelheiten sei auf die heutigen Lehrbücher der Theorie inverser Probleme verwiesen):

- Anpassung der Vorgabe an die Genauigkeit einer Lösung u (z. B. ε-Genauigkeit der Lösung: $\|Au - y\| \leq \varepsilon$ bei vorgegebenem ε; Quasi-Lösung: $\|Au - y\| \leq \|Ax - y\|$ für alle $x \in M$, einer vorgegebenen Teilmenge des Definitionsbereiches von A; kleinste-Quadrate-Lösung $\|Ax - y\|_Y = \inf\{\|Az - y\|_Y : z \in X\}$, best-approximierende Lösung $x^\dagger = A^\dagger y$ mit $\|x^\dagger\|_X = \inf\{\|z\|_X : z \text{ ist kleinste-Quadrate-Lösung von } Ax = y\}$ usw.),
- Modifizierung der Operatorgleichung oder des Problems selbst,
- Änderung der Räume und/oder der Topologie, in denen das Problem formuliert ist,
- Spezifierung der Art des Rauschens sowie deren Einbeziehung in den Lösungsvorschlag.

Die Philosopie der Lösung führt zur Verwendung von algebraischen Lösungen im Gegensatz zu Lösungen in Funktionenräumen, statistischen Lösungen im Gegensatz zu deterministischen Lösungen, starkem im Gegensatz zu schwachem Rauschen usw.

In Bezug auf *Regularisierung-Approximationsschemata* verweisen wir auf eine Reihe von Methoden, die bei schlecht gestellen inversen Problemen zum Einsatz kommenm, wie Tikhonov-Regularisierung, Projektionsmethoden, Multiskalenmethoden, iterative Approximation usw. Auf eine detaillierte Beschreibung dieser Verfahren sei hier verzichtet. Indem diese Schemata implementiert werden, führen sie zu bestimmten Algorithmen. Leider schließt dies die Festlegung eines geeigneten Wertes eines gewissen Parameters, der dem Schema zugeordet ist, ein (z. B. Regularisierungsparameter, Maschenweite, Dimension des Unterraumes beim Projektionsschema, Festlegung des Grades der Skalenräume, Klassifizierung des Rauschens usw.). Dies stellt sich als nichttriviales Problem heraus, da es in Folge einen Trade-off zwischen Genauigkeit und numerischer Stabilität gibt. Ein solcher Konflikt tritt in gut gestellten Problemen in der Regel nicht auf.

5.3.1 Regularisierung und Fehlerspezifikation

Das Konzept der *Regularisierer* spielt eine entscheidende Rolle bei der Gewinnung einer approximativen Lösung des IPP bei Verwendung von verrauschten Daten. Wir werden aufzeigen, dass es in der Tat ein generisches Konzept zur Vereinheitlichung einiger Prinzipien, die in zahlreichen Regularisierungs-Approximationsschemata vorkommen, ist (Tikonov-Regularisierung, abgeschnittene oder gefilterte Singulärwertzerlegung, iterative Methoden, Projektionsmethoden, Multiskalentechniken usw.).

Seien nun X, Y Hilbert-Räume und $A : X \to Y$ eine Eins-zu-Eins-Abbildung (nicht notwendigerweise linear). Ein *Regularisierer* zur Gleichung $Ax = y$ ist eine einparametrige Familie von Operatoren $\{R_\gamma : \gamma \in \Gamma\}$, wobei Γ eine Indexmenge reeller Zahlen mit $0 \in \overline{\Gamma}$ (Abschluss von Γ) ist, die die folgenden Bedingungen erfüllt:
(C1) Für jedes $\gamma \in \Gamma$ ist R_γ ein stetiger Operator von Y nach X.
(C2) Für jedes $x \in X$ gilt $\lim_{\gamma \to 0} \|R_\gamma Ax - x\|_X = 0$.

Schlecht gestellte Probleme sind in der mathematischen Praxis in der Regel in folgendem Sinne regularisierbar: Für jedes y aus dem Wertebereich (d. h. *range*) von A $\mathscr{R}(A)$ sei y^ε bekannt mit „Rauschlevel“ $\|y^\varepsilon - y\|_Y \leq \varepsilon$. Wir betrachten die Operatorgleichung

$$Ax = y^\varepsilon \tag{5.18}$$

zwischen den normierten Räumen X, Y. Die Existenz eines Regularisierers ermöglicht es uns, eine approximative Lösung x^ε mit $\|x^\varepsilon - A^{-1}y\|_X \to 0$ und $\|Ax^\varepsilon - y\|_Y \to 0$ zu berechnen. Wir erläutern diese Tatsache genauer: Sei $x^\varepsilon = R_\gamma y^\varepsilon$. Dann gilt die Ungleichung

$$\|x^\varepsilon - A^{-1}y\|_X \leq \|R_\gamma y - A^{-1}y\|_X + \|R_\gamma y^\varepsilon - R_\gamma y\|_X, \tag{5.19}$$

wobei wir annehmen, dass beide Normen auf der rechten Seite von (5.19) bekannt sind. Zu beachten ist hierbei, dass $\|R_\gamma y - A^{-1}y\|_X$ die *Konvergenzrate* von $R_\gamma Ax$ zu x vermittelt und $\|R_\gamma y^\varepsilon - R_\gamma y\|_X$ eine Aussage über das *Ausmaß der Stetigkeit des Operators* R_γ in Y trifft. Weiterhin gilt, dass $\|R_\gamma y^\varepsilon - R_\gamma y\|_X \to 0$ strebt, wenn $\varepsilon \to 0$ geht für jedes feste γ. Für ein gegebenes $\varepsilon > 0$ wählen wir speziell $\gamma = \gamma(\varepsilon)$, um die rechte Seite von (5.19) zu mininieren. Dann erfüllt $x^\varepsilon = R_{\gamma(\varepsilon)}y^\varepsilon$ die geforderte Bedingung, weil $\|R_{\gamma(\varepsilon)}y^\varepsilon - A^{-1}y\|_X \to 0$ geht wenn $\varepsilon \to 0$ strebt.

Wir sind nun zunächst an dem Fall interessiert, dass A linear ist. Der Einfachheit halber nehmen wir außerdem an, dass auch R_γ linear ist. Dann gilt wegen $\|y^\varepsilon - y\|_Y \leq \varepsilon$:

$$\|x^\varepsilon - A^{-1}y\|_X \leq \|R_\gamma y - A^{-1}y\|_X + M(\gamma)\varepsilon, \tag{5.20}$$

wobei die Norm des Operators $\|R_\gamma\|$ kleiner als eine von γ abhängende Konstante $M(\gamma)$ gemacht werden kann, d. h. $\|R_\gamma\| \leq M(\gamma)$ gilt. Es ist zu beachten, dass die Operatoren R_γ nicht gleichmäßig beschränkt sind, weil A^{-1} unbeschränkt ist, sodass $M(\gamma) \to \infty$ strebt, wenn $\gamma \to 0$ geht.

Die Vorgehensweise eines Regularisierers kann leicht auf kleinste-Quadrate-Probleme ausgeweitet werden. Wir nennen ein Problem wie in Gleichung (5.18), oder gleichwertig $A^\dagger$ regularisierbar, wenn eine ein-parametrige Familie linearer Operatoren $\{R_\gamma : \gamma \in \Gamma\}$ mit $\mathscr{R}(R_\gamma) \subset M$ existiert, die $\lim_{\gamma\to 0} \|R_\gamma Ax - x\|_X = 0$ für $x \in M$ erfüllt und für die R_γ für jedes $\gamma > 0$ beschränkt ist. Auch hier gilt, dass die Familie $\{R_\gamma\}$ nicht gleichmäßig beschränkt für γ ist, weil $\mathscr{R}(A)$ nicht abgeschlossen ist. Die Existenz eines Regularisierers gewährleistet uns allerdings eine Familie von approximativen Lösungen, die mithilfe eines zugeordeten gut gestellten Problems bestimmt wird. Bei verrauschten Daten y, beispielsweise $\|y^\varepsilon - y\| \leq \varepsilon$, erfüllt der Fehler $\|R_\gamma y^\varepsilon - A^\dagger y\|_X \to \infty$ mit $\gamma \to 0$ (er bläht sich gewissermaßen auf). Fordert man nun die Bedingung, dass der Fehler minimiert wird, so folgt:

$$\begin{aligned}\|R_\gamma y^\varepsilon - A^\dagger y\|_X &\leq \|R_\gamma y - A^\dagger y\|_X + \|R_\gamma(y^\varepsilon - y)\|_X \\ &\leq \|R_\gamma y - A^\dagger y\|_X + C_\gamma \varepsilon.\end{aligned} \tag{5.21}$$

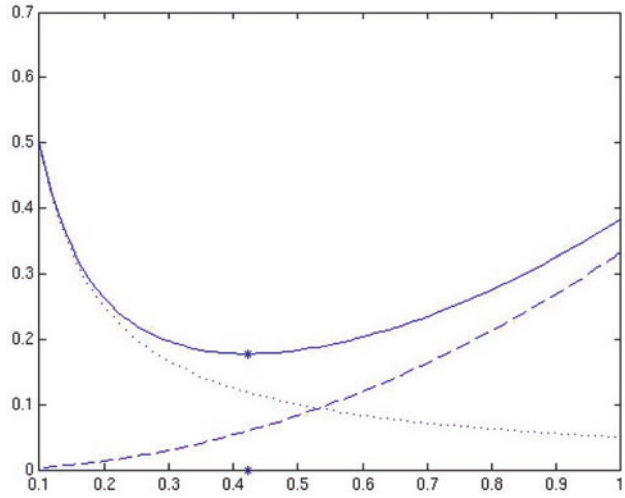


Abb. 5.1 Verhalten des Regularisierungsfehlers (gestrichelte Linie), des Rauschfehlers (punktierte Linie) sowie des gesamten Fehlers (durchgezogene Linie) sowie Markierung des optimalen Regularisierungsparameters γ

Der erste Term (der sogenannte *Regularisierungsfehler*) geht mit $\gamma \to 0$ gegen Null, wohingegen der zweite Term (die sogenannte *Magnifikation des Rauschfehlers* aufgrund der Schlechtgestelltheit) gegen ∞ geht (siehe auch Abb. 5.1):

$$\gamma \to 0 \quad \begin{cases} \nearrow & \|A^\dagger y - R_\gamma y\|_X \longrightarrow 0 \\ \searrow & \|R_\gamma (y - y^\varepsilon)\|_X \leq \|R_\gamma\| \varepsilon \longrightarrow \infty \end{cases} \tag{5.22}$$

$$\gamma \to \infty \quad \begin{cases} \nearrow & \|A^\dagger y - R_\gamma y\|_X \longrightarrow \infty \\ \searrow & \|R_\gamma (y - y^\varepsilon)\|_X \leq \|R_\gamma\| \varepsilon \longrightarrow 0 \end{cases} \tag{5.23}$$

Wenn wir eine Fehlerabschätzung für den ersten Term sowie eine Abschätzung des Wachstums für C_γ kennen, so können wir ein geeignetes γ festlegen. Eine solche Abschätzung kann für bestimmte Regularisierer ermittelt werden, indem man zusätzliche Information zur Lösung $A^\dagger y$ einfließen läßt, beispielsweise Glattheit oder Robustheitsbedingungen an C_γ (z. B. lässt sich eine Abschätzung angeben, dass $C_\gamma \leq d(\gamma)$ eine bekannte Funktion ist, die gegen ∞ strebt wenn $\gamma \to 0$ geht und $\|R_\gamma y - A^\dagger y\|_X \leq b(\gamma)$ mit $b(\gamma) \to 0$ wenn $\gamma \to 0$ geht). In diesem Fall kann ein optimales γ berechnet werden, für welches $R_\gamma y^\varepsilon \to A^\dagger y$ mit $\varepsilon \to 0$ gilt (vgl. Abb 5.1). Zahlreiche Konkretisierungen von Regularisierern sind in Form von Regularisierungs- und Projektionsmethoden sowie

iterativen Methoden gegeben. Im Falle eines iterativen Schemas stellt $\gamma = 1/n$, $x_n = R_\gamma y$ die n-te Iteration des Prozesses dar, die in Abwesenheit von Rauschen in den Daten y gegen $A^\dagger$ (oder A^{-1}) konvergiert. Bei Projektionsmethoden ist ebenfalls $\gamma = 1/n$, wobei n die Dimension des approximativen Unterraumes ist. Bei finiten Differenzen stellt γ die Maschenweite h dar.

Die vorangehenden Ausführungen zeigen, wie man stabile approximative Lösungen bei verrauschten Daten y und unter Gewährleistung der Abschätzung (5.21) erzielen kann, häufig jedoch ohne zu wissen, ob die getroffenen Vereinbarungen zur Wirklichkeitsnähe führen.

5.3.2 Stetige und diskrete Regularisierung

Die numerische Analyse von schlecht gestellten Problemen beinhaltet letztendlich die Lösung von endlich-dimensionalen Problemen, um numerische Approximationen zu erhalten. Dies hat häufig eine *zweistufige Regularisierung* zur Folge. Zunächst „regularisiert" man beispielsweise das Regularisierungsproblem in Funktionenräumen und wendet anschließend numerische Methoden zur Approximation der Lösung eines gut gestellten Problems an (oder einer Familie solcher Probleme). Oder man „diskretisiert" oder approximiert möglicherweise das IPP durch endlich-dimensionale Probleme und beseitigt anschließend die numerische Instabilität dieser Probleme durch Methoden der numerischen linearen Algebra, die für diskrete schlecht gestellte Probleme geeignet sind (siehe z. B. frühe Arbeiten von Björck und Elden (1981); Nashed (1976a); Varah (1973)). Diese beiden alternativen Wege werden in folgendem Diagramm dargestellt:

$$\begin{array}{ccccc} & P & \overset{\mathbf{c\ r}}{\rightarrow} & P_\gamma & \\ p \swarrow & & \searrow p & & \searrow p \\ F_n & \rightarrow & P_n & \overset{\mathbf{d\ r}}{\rightarrow} \; P_{n,\gamma} & P_{\gamma,n} \end{array}$$

Dabei ist P das gegebene schlecht gestellte Problem und P_γ ist eine „regularisierte" Version von P, die durch Anwendung eines gewissen Regularisierungsschemas in einem gewissen Funktionenraum entstanden ist. F_n ist ein Problem in einem endlich-dimensionalen Funktionenraum und P_n ist ein endlich-dimensionales algebraisches Problem, wobei beide durch Approximation von P gewonnen wurden; weiterhin bezeichnet $P_{n,\gamma}$ eine „Regularisierung" des (numerisch instabilen) Problems P_n und $P_{\gamma,n}$ ist eine numerische Approximation des Problems P_γ, das für nicht zu kleine γ numerisch stabil ist. Im Diagramm bedeutet außerdem „**c r**" stetige Regularisierung (*continuous regularization*), „**d r**" diskrete Regularisierung (*discrete regularization*) und „p" bezeichnet eine generische „Projektion" (Diskretisierung, Projektionsmethode etc.). Mit dem bisherigen Kenntnisstand über Regularisierungsmethoden können wir an dieser Stelle nur einige Verfahren dem Namen nach erwähnen, die konkrete Realisierungen dieses Schemas bereitstellen (für detailliertere Studien sei auf die mathematische Spezialliteratur verwiesen):

$P \to P_\gamma$	Tikhonov-Regularisierung, Regularisiereroperatoren in Funktionenräumen, quasireversible Methoden, Ersetzung des IPP durch ein stabiles Minimierungsproblem, das von einem Parameter abhängt, iterative Methoden in Funktionenräumen;
$P \to F_n$	Abgeschnittene Singulärwertzerlegung (TSVD), abgeschnittene Reihenentwicklung, Momentumdiskretisierung, Projektionsmethoden;
$P \to P_n$	Finite-Differenzen-Methoden mit Kollokation, Reduzierung von F_n zu algebraischen Gleichungen;
$P_n \to P_{n,\gamma}$	Zerlegungsmethoden oder Regularisierung für lineare algebraische Gleichungen, TSVD für Matrizen;
$P_\gamma \to P_{\gamma,n}$	zahlreiche numerische Methoden zur Lösung gut gestellter Probleme, z. B. Diskretisierung, Projektionsmethoden, Multiskalentechniken usw.

Wir kehren nun zum allgemeinen Schema zurück und bezeichnen mit x, x_γ, x_n, $x_{\gamma,n}$, $x_{n,\gamma}$ jeweils die „Lösung“ (im klassischen oder kleinste-Quadrate-Sinne) des Problems P, P_γ, P_n, $P_{\gamma,n}$, $P_{n,\gamma}$ bei unverrauschten Daten, während wir mit x^ε, x_γ^ε usw. die zugehörige Lösung bei verrauschten Daten bezeichnen (y wird dabei ersetzt durch y^ε, wobei $\|y^\varepsilon - y\|_Y \le \varepsilon$ für ein $\varepsilon > 0$). Wenn wir annehmen, dass die verschiedenen Regularisierungsschemata ohne Fehler konvergent sind (z. B. $x_\gamma \to x$ wenn $\gamma \to 0$, $x_{n,\gamma} \to x_n$ wenn $\gamma \to 0$ für jedes feste n, $x_n \to x$ wenn $n \to \infty$ usw.), so kann man ähnlich wie in (5.20) und (5.21) Abschätzungen verwenden, um wie zuvor eine „approximative Lösung“ x^ε zu berechnen, beispielsweise

$$\|x_{\gamma,n}^\varepsilon - x\|_X \le \|x_{\gamma,n}^\varepsilon - x_\gamma^\varepsilon\|_X + \|x_\gamma^\varepsilon - x_\gamma\|_X + \|x_\gamma - x\|_X. \tag{5.24}$$

Hierbei stellt $\|x_{\gamma,n}^\varepsilon - x_\gamma^\varepsilon\|_X$ eine *approximative Fehlerabschätzung* dar, die einen Konvergenzbereich des Approximationsschemas für gut gestellte Probleme P_γ bei festem γ liefert. $\|x_\gamma^\varepsilon - x_n\|_X$ ist eine *Abschätzung für den Fehler aufgrund des Rauschens*, die bei bekannter Robustheit von P_γ angeben werden kann und $\|x_\gamma - x\|_X$ ist der *Regularisierungsfehler*. Gleichermaßen gilt

$$\|x_{n,\gamma}^\varepsilon - x\|_X \le \|x_{n,\gamma}^\varepsilon - x_n^\gamma\|_X + \|x_n^\gamma - x_n\|_X + \|x_n - x\|_X. \tag{5.25}$$

Es ist zu beachten, dass in diesem Fall $\|x_{n,\gamma}^\varepsilon - x_n^\gamma\|_X$ eine Abschätzung des *Regularisierungsfehlers des Problems* P_n darstellt und $\|x_n^\varepsilon - x_n\|_X$ der *Fehler aufgrund der Rauschübertragung in das diskrete System* ist usw.

5.3.3 Dilemmata und Methodologien

Die Dilemmata und Methodologien der mathematischen und numerischen Analyse der IPP beinhalten die folgenden Feststellungen und Beobachtungen:

- Für die meisten Regularisierungs- und Approximationsschemata gilt im rauschfreien Fall

$$\lim_{\gamma \to 0} x_\gamma = x \tag{5.26}$$

und

$$\lim_{n\to\infty} x_n = x. \tag{5.27}$$

Für einige Approximationsschemata (Projektionsschemata) kann auch ohne Rauschen möglicherweise keine Konvergenz eintreten.

- Weder der doppelte Grenzwert

$$\lim_{\substack{\gamma\to 0\\ n\to\infty}} x^{\varepsilon}_{\gamma,n}, \tag{5.28}$$

noch die iterierten Grenzwerte ($\lim_{n\to\infty}\lim_{\gamma\to 0}$ und $\lim_{\gamma\to 0}\lim_{n\to\infty}$) von $x^{\varepsilon}_{\gamma,n}$ und $x^{\varepsilon}_{n,\gamma}$ existieren. In der Tat blähen sich $\|x^{\varepsilon}_{\gamma,n}\|_X$ und $\|x^{\varepsilon}_{n,\gamma}\|_X$ auf, wenn $n \to \infty$ und $\gamma \to 0$ geht. Es soll in diesem Zusammenhang betont werden, dass dieses *Sich-Aufblähen intrinsisch allen IPPs innewohnt, unabhängig von jedem Regularisierungs-Approximations-Schema*. Somit kann bei einer numerischen Lösung eines IPP bestenfalls der Fehler $\|x - x^{\varepsilon}_{\gamma,n}\|_X$ oder $\|x - x^{\varepsilon}_{n\gamma}\|_X$ minimiert werden oder es können „Pfade" gesucht werden, entlang denen $x_{\gamma,n}$ und $x_{n,\gamma}$ gegen x konvergieren, wenn $\varepsilon \to 0$ geht.
- Das Diagramm der alternativen Wege ist im allgemeinen *nicht-kommutativ*. Es ist nicht immer klar, welcher Weg entlang des Diagramms der effektivste ist. Man muss die minimalen Fehler von $\|x - x^{\varepsilon}_{\gamma,n}\|_X$ und $\|x - x^{\varepsilon}_{n,\gamma}\|_X$ vergleichen und außerdem die rechnerische Komplexität beider Pfade abwägen. Für einige einfache Schemata ist das Diagramm kommutativ (z. B. kommutieren Tikhonov-Regularisierung und TSVD für kompakte Operatoren).
- Präzise Lösungen eines schlecht gestellten Problems (d. h. ein optimaler Kompromiss zwischen Genauigkeit und numerischer Stabilität) hängen von einem „Kriterium zur optimalen Parameterwahl" (für γ und n) ab. Oft gibt es (aufgrund fehlender Konvergenzradien in ausreichender Genauigkeit in den vorangehenden Abschätzungen) keine analytischen Kriterien für diese Wahl, mit Ausnahme der Tikhonov-Regularisierung oder ähnlicher Methoden, die auf einfachen Variationsprinzipien beruhen. Oft werden die Parameter durch ein interaktives Berechnungsschema ermittelt, das auf groben analytischen Abschätzungen beruht.

5.3.4 Grobe Eingruppierung der Regularisierungsmethoden

Vom Standpunkt der mathematischen und numerischen Analyse kann man die „Regularisierungsmethoden" in drei Kategorien einteilen.

- *Regularisierungsmethoden in Funktionenräumen*. Diese beinhalten Regularisierung vom Tikhonov-Typ, die Methode der Quasireversibilität, die Verwendung bei gewissen Funktionenräumen wie den Skalenräumen bei der Multiresolution, die Methode der verallgemeinerten Inversen in Hilbert-Räumen mit Reprokernen sowie Regularisierung innerhalb einer Multiskalentechnik mit Wavelets.

- *Lösung schlecht gestellter Probleme durch „Kontrolle der Dimensionalität“.* Dies beinhaltet Projektionsmethoden, Diskretisierung und Momentumdiskretisierungsschemata. Der Erfolg dieser Methoden hängt von der Möglichkeit ab, eine approximative Lösung zu erzielen, während die Dimension des endlich-dimensionalen Problems im Bereich der numerischen Stabilität bleibt.
- *Iterative Methoden und Filtermethoden.* Diese Methoden können entweder auf Probleme in Funktionenräumen oder auf eine diskrete Version angewandt werden. Der entscheidende Faktor bei iterativen Methoden ist es, die Iteration zu beenden, bevor numerische Instabilitäten aufkommen. Aus diesem Grund müssen iterative Methoden modifiziert oder verbessert werden, um eine geforderte Genauigkeit zum Zeitpunkt der Abbruchvorschrift sicherzustellen. Filtermethoden sind Verfahren, bei denen beispielsweise singuläre Funktionen und Singulärwerte, die stark oszillierende Lösungen produzieren, entfernt werden. Selbstverständlich können verschiedene Tiefpassfilter angewandt werden.

Schon länger gilt die Verwendung von *a-priori-Grenzen* (oder allgemeiner a-priori-Information) bei der Lösung eines schlecht gestellten Problems als wesentlich, um die stetige Abhändigkeit zu verbessern (also einen Regularisierungseffekt zu erzielen). Zu Beginn der Studien schlecht gestellter Probleme machte Tikhonov die entscheidende Beobachtung (siehe Tikhonov (1943, 1963)), dass die Einschränkung auf eine kompakte Menge Wohlgestelltheit gewährleistet. Genauer, wenn X und Y metrische Räume sind, $F : X \to Y$ eine stetige Injektion und $C \subset X$ kompakt, dann ist $F^{-1} : F(C) \to C$ stetig.

Die Methode sukzessiver Approximationsgradienten und relative iterative Methoden können zur Suche einer approximativen Lösung schlecht gestellter Probleme verwendet werden. Eine Konvergenzanalyse einiger iterativer Methoden für Integral- und Operatorgleichungen der ersten Art sowie für Gleichungen zweiter Art bei einem charakteristischen Wert ist z. B. in Kammerer und Nashed (1972) zu finden. Diese Methoden beinhalten als Spezialfall das, was man manchmal als Landweber-Iteration bezeichnet (Strand (1974)), wobei diese tatsächlich identisch ist mit der Methode der sukzessiven Approximation angewandt auf Normalgleichungen, d. h. wir haben $x_{n+1} = x_n - A^*Ax_n - A^*y$ für die Operatorgleichung $Ax = y$. Wenn eine iterative Methode zur numerischen Approximation eines Problems (egal ob gut oder schlecht gestellt) angewendet wird, muss eine Abbruchvorschrift zum Beenden des Verfahrens entwickelt werden. Berücksichtigt werden müssen hierbei Rundungsfehler und die Toleranz des Approximationsfehlers (d. h. was man als „Null“ betrachtet vom Standpunkt der Approximation her). Für schlecht gestellte Probleme ist die Abbruchvorschrift aufgrund der durch die Schlechtgestelltheit bedingten numerischen Instabilität deutlich komplizierter. Für den Fall, dass y verrrauscht ist, also $y^\varepsilon = y + u$ mit $\|u\| \leq \varepsilon$, müssen die Approximationen

$$x_{n+1} = x_n - \beta(A^*Ax_n - A^*y - A^*u) \tag{5.29}$$

(wobei β ein Parameter ist, für den diese Iteration konvergiert, wenn $u = 0$ ist) nicht gegen $A^\dagger$ konvergieren. Gleiches gilt für die Methode des stärksten Abstiegs, wenn γ durch γ_n

ersetzt wird, welches der Wert ist, bei dem $\|Ax_{n+1} - y^\varepsilon\|$ minimiert wird. Natürlicherweise hängt das Abbruchkriterium vom Residuum als beobachtbare Größe ab. Wählt man $\delta > 0$ (Abbruchlevel), so erhält man zu Beginn der Iteration

$$\|Ax_n - y^\varepsilon\|_Y > \delta,\ n < m,\ \|Ax_m - y^\varepsilon\|_Y \leq \delta. \tag{5.30}$$

Wir nehmen an, dass der Abbruchlevel $\delta = \delta(\varepsilon)$ dieses iterativen Prozesses für $\delta(\varepsilon) \to 0$ die Bedingung $\delta(\varepsilon) > \varepsilon$ erfüllt. Dann ist es leicht zu zeigen, dass

$$\lim_{\varepsilon \to 0} \sup_{\|u\| \leq \varepsilon} \|x_M - A^\dagger y\| = 0 \tag{5.31}$$

gilt, wobei $x_M = x_M(\delta, u, x_0)$ die approximative Lösung ist, die man aus (5.29) mit Abbruchlevel δ erhält. Damit ist gezeigt, dass man den iterativen Prozess unter diesen Voraussetzungen als Regularisierungsschema anwenden kann. Das Ergebnis (5.31) bedeutet, dass die Familie $\{B_n\}$, wobei B_n der Operator (also die Iterationsvorschrift) ist, der y auf x_{n+1} abbildet, ein Regularisierer ist. In diesem Fall übernimmt $1/n$ die Rolle des Parameters γ.

Zum Abschluss wollen wir schließlich noch erwähnen, dass bei iterativen Methoden die Funktion $x_n(\delta(\varepsilon), u, x_0)$ als „optimale“ Approximationslösung, die einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Stabilität darstellt, verwendet werden kann. Da x_n eine Linearkombination einer endlichen Anzahl von Funktionen darstellt (rekursiv eingeführt in Lieusternik und Sobolev (1961)), folgt, dass regularisierende iterative Schemata im Rahmen der Auflösung durch Kontrolle der Dimensionalität betrachtet werden können. In diesem Fall sind die Funktionen allerdings nicht a-priori gegeben, sondern sie werden rekursiv durch wiederholte Filterung einer anfänglichen Approximation x_0 erzeugt. Der Schwerpunkt liegt dann auf den Filteroperatoren durch Verwendung der Adjungierten und auf der Wahl von x_0.

Ein Ansatz zur Lösung schlecht gestellter Probleme ist, eine Approximation der Lösung (des inversen Problems oder des Identifikationssproblems) durch eine Linearkombination einer „kleinen“ Anzahl von umsichtig ausgewählten Funktionen zu suchen. Das Problem reduziert sich dann auf auf die beste Approximation mit „wenigen“ Parametern. Für gewisse schlecht gestellte Probleme kann eine geschickte Wahl der Funktionen getroffen werden.

Die Idee der *Regularisierung durch Diskretisierungs- oder Projektionsmethoden* ist in der numerischen Analyse von schlecht gestellten inversen Problemen sehr populär. Die Idee ist (vom Prinzip her) einfacher als die anspruchsvolle Methode der Tikhonov-Regularisierung. Die Anwendung solcher Methoden liegt zeitlich vor der Einführung der Regularisierung. Bei dieser Gelegenheit soll nicht unerwähnt bleiben, dass Maxwell unter den ersten Wissenschaftlern war, der 1879 beim Versuch, die Kapazität einer quadratischen Metallplatte unter Verwendung von Integralgleichungen zu bestimmen, ein inverses Problem formulierte und löste. Sein numerischer Ansatz war im Grunde eine Kollokation. Der Aufbau von Antennensystemen und zahlreichen elektromagnetischen Apparaten war ebenfalls mit der Entwicklung von Projektionsmethoden verknüpft.

Ein Rahmenkonzept zur Reduzierung inverser Probleme und Identifikationssprobleme zu endlich-dimensionalen Problemen existiert innerhalb der klassischen Projektionsmethoden. Wir wählen eine Familie von endlich-dimensionalen Unterräumen $X_n \subset X$, $Y_n' \subset Y'$, die dem Problem $Ax = y$ zugeordnet sind, wobei $A : X \to Y$ und Y' der Dualraum von Y ist (also der Raum aller stetigen linearen Abbildungen von Y nach $\mathbb{R}$). Wir nehmen der Einfachheit halber an, dass $\mathscr{R}(A)$ dicht in Y liegt und $y \in \mathscr{R}(A)$ ist. Die Approximationen $x_n \in X_n$ für $x = A^{-1}y$ werden durch die Bedingung

$$\psi_n(Ax_n - y) = 0, \quad \psi_n \in Y_n' \tag{5.32}$$

festgelegt. Bei Einsatz von verrauschten Daten, also Ersetzung von y durch y^ε und bei Verwendung der Projektionsmethode haben wir die folgende grundlegende Abschätzung:

$$\|x_n^\varepsilon - x\|_X \leq (1 + \|P_n\|_X) d(x, X_n) + \|Q_n\|_X \varepsilon. \tag{5.33}$$

Hierbei sind die linearen Abbildungen $P_n : X \to X_n$ und $Q_n : Y \to X_n$ definiert durch $\psi_n A P_n = \psi_n A$ und $\psi_n A Q_n = \psi_n$ für alle $\psi_n \in Y_n'$ und mit $d(x, X_n) = \inf\{\|x-u\|_X : u \in X_n\}$. Der erste Teil der rechten Seite von (5.33) ist der *Projektions- (oder Diskretisierungs-) Fehler*. Wenn $\|P_n\|$ gleichmäßig beschränkt in n ist, d. h. wenn das Verfahren in der Sprache der Finite-Elemente-Projektion quasi-optimal ist, dann ist die Ordnung unabhängig von ψ_n und hängt nur davon ab, wie gut x in X_n approximiert werden kann. Der zweite Teil von (5.33) ist der *Fehler aufgrund des Rauschens* verstärkt durch die Schlechtgestelltheit. Man kann zeigen, dass $\|Q_n\| \geq a(n)$ ist, wobei

$$a(n) = \sup\{\|u\| : u \in X_n, \|Au\| = 1\} \tag{5.34}$$

von X_n abhängt, aber nicht von ψ_n. Für schlecht gestellte Probleme geht $a(n) \to \infty$ wenn $n \to \infty$ strebt, weil die Norm der inversen Matrix, die sich aus dem System von algebraischen linearen Gleichungen ergibt, die aus (5.33) resultieren, nicht gleichmäßig beschränkt ist. Wenn $\|Q_n\|$ mit $n \to \infty$ nicht schneller wächst als $a(n)$, dann heißt das Projektionsschema robust. Wenn ein Projektionsschema sowohl quasi-optimal als auch robust ist, so gilt:

$$\|x_n^\varepsilon - x\|_X \leq C\{d(x, X_n) + \varepsilon a(n)\}. \tag{5.35}$$

Diese Abschätzung kann durch eine geschicktere Wahl von ψ_n nicht verbessert werden. Weiterhin kann durch Minimierungs der rechten Seite im Hinblick auf n ein Kompromiss erzielt werden. Zahlreiche konkrete Realisierungen innerhalb dieses Schemas von Projektionsmethoden werden z. B. in Natterer (1977) erzielt. In Nashed (1981b) wird eine detaillierte Analyse verschiedener Projektionsmethoden gemacht.

Projektionsmethoden (unter Verwendung von Spline-, Wavelet- oder Finite-Elemente-Funktionen) können, wie im oben beschriebenen Fall, entweder direkt auf das IPP angewandt werden oder auf das regularisierte Problem, d. h. auf das Problem der Minimierung

des Funktionals $J(x) = \|Ax - y\|^2 + \gamma \|LX\|^2$, $a > 0$. Verschiedene Konvergenzergebnisse werden schon im frühen Stadium der IPP-Theorie in Marti (1980); Natterer (1977); Song (1978) gezeigt. In der Literaturliste finden sich ebenso noch weiter nützliche Referenzen zu Projektions- und Finite-Element-Methoden für IPPS.

Die Momentumdiskretisierungs- (oder Semi-Diskretisierungs-) Methode für Integralgleichungen der ersten Art und für IPPs in Hilbert-Räumen mit Reprokernstruktur (siehe Nashed (1976b); Nashed und Wahba (1974a,b)) ist im Sinne einer Projektionsmethode sowohl quasi-optimal als auch robust. Sie ist besonders geeignet, wenn nur an endlich vielen Punkten Werte der Datenfunktion bekannt sind. Diese Eigenschaften sind in Verbindung mit Konvergenz- und Kommutativitätseigenschaften, die in Nashed (1976c) gezeigt werden, verantwortlich für das unkomplizierte Verhalten dieser Methoden bei der numerischen Implementierung.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von Lehrbüchern über IPPs mit umfassenden und tiefgehenden Resultaten, z. B. Anger (1990); Baumeister (1987); Engl (1997); Engl et al. (1997, 1996); Groetsch (1984); Hadamard (1902); Kirsch (1996); Louis (1989); Morozov (1984); Nashed (1971); Nashed und Scherzer (2002), um nur einige zu nennen.

5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Inverse Probleme liefern aufgrund ihrer mathematischen Besonderheit nie eine absolute Gewissheit bei der Lösung. Insbesondere ist in der heutigen Geothermie ein gewisses Restrisiko selbst bei noch so gewissenhaften Explorationsuntersuchungen und der kombinierten Anwendung verschiedener Methodiken, d. h. Operatorgleichungen, kanonisch und unvermeidbar. Der Grund liegt im spezifischen Charakter inverser Probleme (wie etwa gravitativer und magnetischer Potentialverfahren, seismischer Tomographie), die den Schluss von indirekt gemessener Wirkung auf die geologisch reale Ursache für ein Innengebiet der Erde vollziehen müssen, das sich zu Beginn eines Geothermieprojektes gänzlich der unmittelbaren Beobachtung entzieht. Dieser Umstand impliziert unabdingbar das „Auftreten methodisch bedingter Geister (*ghosts*)“ bei der Lösung eines inversen (Operator-)Problems, die „Schrecken“ aller Explorationsbemühungen darstellen und selbst bei Kombination jeglicher Explorationsmöglichkeiten, d. h. Operatorgleichungen, niemals vollständig zu „verscheuchen“ sind. Es kann daher nur das Ziel moderner geomathematischer Forschung sein, die aufgrund der Datenlage außerhalb der „Geisterareale“ extrahierbare Information soweit als möglich zugänglich zu machen. Substantielle Verbesserungen lassen sich nur durch Ausbeutung neuer Mess- und Beobachtungsmethoden sowie innovative Kombinierung mathematischer Konzepte des Modellierens und Simulierens (z. B. mit neuartigen Ansatzfunktionen zur Dekorrelation langwelliger Trend- und kurzwelliger Anomaliensignalanteile und/oder Verwendung neuer Observablen) gewinnen. Es gilt noch intensiver als bisher, Modellierungen und Simulationen zu vernetzten Daten- und Observablenstrukturen anzustreben. Als Idealzustand muss gelten, die methodisch bedingten Geister (*ghosts*) eines Explorationsverfahrens komplementär

durch ein alternatives Verfahren sichtbar zu machen. Nur in vollständiger Komplementarität reduziert sich das Restrisiko in dem Maße, dass explorative Falschaussagen und Fehlinterpretionen vermieden werden könnten. Mehr noch, für die inverse Datenauswertung ist festzuhalten, dass die überkommenen mathematischen Verfahren in Zukunft weder in Theorie noch in Numerik in der Lage sein werden, die neuen Datenmengen – insbesondere unter dem wichtigen Aspekt einer vertieften räumlich-zeitlichen Behandlung – zu beherrschen. Gefordert ist vielmehr eine Aufbereitung der geowissenschaftlich relevanten Größen in konstituierende Bausteine, die durch drei wesentliche Merkmale charakterisiert ist: Gute Approximationseigenschaft, geeignetes Dekorrelationsvermögen und schnelle Algorithmen. Diese Eigenschaften sind der Schlüssel für eine Vielzahl von Fertigkeiten, insbesondere Datenkompression und -transmission, Entrauschung (*denoising*) sowie selektive Multisresolution beispielsweise geologischer Strukturen.

Alles in allem bleibt festzuhalten: Geomathematik zur Behandlung inverser Probleme ist und bleibt eine Schlüsseltechnologie auch in Oberflächennaher Geothermie. Auch wenn große Fortschritte in der Exploration in den letzten Dekaden gemacht wurden und für die Zukunft zu erwarten sind, so ist doch auf absehbare Zeit der mathematische Kreislauf (vgl. Freeden (2015)) bestehend aus

- mathematischer Modellbildung,
- mathematischer Analyse der „Wohlgestelltheit“,
- Entwicklung und Ausführung eines mathematischen Lösungsverfahrens,
- Rückübertragung in die geothermische Anwendung,

unabdingbar und unverzichtbar sowie gegebenenfalls hinreichend oft iterativ anzuwenden.

Für die Beurteilung der Exploration heutzutage führt der funktionierende Validierungskreislauf perspektivisch zu der Überzeugung: Auch wenn immer intrinsisch bedingt ein Restrisiko bleibt, die Anwendung geeigneter geomathematischer Löser und terrestrisch/satellitenbasierte Datensysteme werden ein weitreichend verbessertes Kosten-Risiko-Verhältnis in beachtlichem Maße erreichbar machen. Geothermie wird langfristig ihren adäquaten Platz als eine führende Nutzform in der zukünftigen Energie-/Wärmegewinnung erlangen.

Danksagung: Die Autoren sind Herrn Prof. Dr. M. Z. Nashed, University of Central Florida, Orlando, für den Hinweis dankbar, dass die von ihm in der Antennentheorie der Elektrotechnik entwickelten Konzepte und Methoden (vgl. Nashed (1981a)) sich im Wesentlichen auch auf den geothermischen Fall fortschreiben und auf den heutigen Stand wissenschaftlicher Erkenntis kanonisch weiter entwickeln lassen.

Weiterhin danken die Autoren dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie dem Projektträger Jülich für die Förderung im Rahmen des Verbundprojektes „GEOFÜND“ (PI: Prof. Dr. W. Freeden, FKZ: 0325512A) für den Bereich der seismischen Erkundung sowie des Projektes „SPE“ (PI: Prof. Dr. W. Freeden, FKZ: 0324061) für den Bereich der Potenzialmethoden. Insbesondere danken wir Herrn Dr. Schreiber, Projektträger Jülich, für seine kontinuierlich kompentente Unterstützung.

Literatur

Anger, G.: A characterization of the inverse gravimetric source problem through extremal measures. Rev. Geophys. Space Phys. **19**, 299–306 (1981)

Anger, G.: Inverse problems in differentail equation. Akademie Verlag, Berlin und Plenum Press, London (1990)

Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.): Handbuch Tiefe Geothermie: Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung. Springer, Berlin Heidelberg (2014)

Baumeister, J.: Stable solution of inverse problems. Vieweg Braunschweig (1987)

Biondi, B. L.: Three-dimensional seismic imaging. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (2006)

Björck, Å. Elden, L.: Ill-Posed Problems: Theory and Practice, Kap. Methods in Numerical Algebra for Ill-Posed Problems. Reidel, Dodrecht and Boston (1981)

Blakely, R.: Potential theory in gravity and magnetic application. Cambridge University Press, Cambridge (1996)

Blick, C.: Multiscale Potential Methodes in Geothermal Research. Dissertation, AG Geomathematik, TU Kaiserslautern (2015)

Blick, C., Freeden, W., Nutz, H.: Gesteigerte Investmentsicherheit durch geomathematische Verfahren. Sonderveröffentlichung des GDMB Verlag GmbH S. 1–22 (2015)

Carlslaw, H. S., Jaeger, J. C.: Conduction of heat in solids, 2. Aufl. Oxford University Press, Oxford (1959)

Engl, H.: Integralgleichungen. Springer, Berlin (1997)

Engl, H. W., Hanke, M., Neubauer, A.: Regularization of inverse problems. Kluwer, Dordrecht (1996)

Engl, H., Louis, A.K., Rundell, W. (Hrsg.): Inverse problems in geophysical applications. SIAM, Philadelphia (1997)

Freeden, W.: Multiscale modelling of speaceborne geodata. Teubner, Stuttgart (1999)

Freeden, W.: Geomathematics: Its role, its aim, and its potential. In: Freeden, W., Nashed, M. Z., Sonar, T. (Hrsg.) Handbook of Geomathematics, Bd. 1, 2. Aufl., S. 3–78. Springer, Heidelberg (2015)

Freeden, W., Blick, C.: Signal decorrelation by means of multiscale methods. World of Mining. **65**(5), 304–317 (2013)

Freeden, W., Gerhards, C.: Geomathematically oriented potential theory. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton (2013)

Freeden, W., Mayer, C.: Stokes problem, layer potentials and regularizations, and multiscale applications. In: Freeden, W., Nashed, M. Z., Sonar, T. (Hrsg.) Handbook of geomathematics, Bd. 1, 2. Aufl., S. 1155–1254. Springer, Heidelberg (2015)

Freeden, W., Nutz, H.: Mathematik als Schlüsseltechnologie zum Verständnis des Systems "Tiefe Geothermie". Jahresber Dtsch Math-Ver., Springer, Berlin. Heidelberg. **117**(1), 45–84 (2014a)

Freeden, W., Nutz, H.: Mathematische Methoden.In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie, S. 125–221. Springer Spektrum, Heidelberg (2014b)

Gehlin, S.: Thermal response test method development and evalutation. Dissertation, Luleå tekniska universitet (2002)

Grasmair, M., Haltmeier, M., Scherzer, O.: Sparsity in inverse geophysical problems. In: Freeden, W., Nashed, M. Z., Sonar, T. (Hrsg.) Handbook of Geomathematics, 2. Aufl., S. 1659–1687. Springer, Heidelberg (2015)

Groetsch, C.: The theory of Tikhonov regularization for Fredholm equations of the first kind. Pitman, Boston (1984)

Hadamard, J.: Sur les problèmes aux dérivés partielles et leur signification physique. Princeton Univ. Bull. **13**, 49–52 (1902)

Hadamard, J.: Lectures on the Cauchy problem in linear partial differential equations. Yale University Press, New Haven (1923)

Jacobs, F., Meyer, H.: Geophysik – Signale aus der Erde. Teubner, Stuttgart (1992)

Kammerer, W., Nashed, M. Z.: Iterative methods for best approximate solutions of linear integral equation of the first and second kind. J. Math. Anal. Appl. **40**, 547–573 (1972)

Kellogg, O.: Foundations of potential theory. Frederick Ungar Publishing Company, New York (1929)

Kirsch, A.: An introduction to the mathematical theory of inverse problems. Springer, Heidelberg (1996)

Lieusternik, L. A., Sobolev, V. J.: Elements of Functional Analysis. Ungar, New York (1961)

Louis, A. K.: Inverse und schlecht gestellte Probleme. Teubner, Stuttgart (1989)

Marti, J. T.: On the convergence of an algorithm computing minimum-norm solutions of ill-posed problems. Math. Comp. **34**, 521–527 (1980)

Menke, W.: Geophysical data analysis. Discrete inverse theory. Academic Press, Orlando (1984)

Morozov, V. A.: Methods for solving incorrectly posed problems. Springer, New York (1984)

Müller, C.: Foundations of the Mathemaical Theory of Electromagnetic Waves. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1969)

Möhringer, S.: Deccorrelation of gravimetric data. Dissertation, AG Geomathematik. TU Kaiserslautern (2014)

Nashed, M. Z.: Generalized inverse, normal solvability and iteration for singular operator equations. In: Rall, L. B. (Hrsg.) Nonlinear functional analysis and applications, S. 311–359. Academic, New York (1971)

Nashed, M. Z. (Hrsg.): Generalized Inverses and Applications. Academic Press, New York (1976a)

Nashed, M. Z.: Generalized Inverses and Applications, Kap. Aspects of Generalized Inverses in Analysis and Regularization, S. 193–244. Academic Press, New York (1976b)

Nashed, M. Z.: On moment-discretization and least-squares solutions of linear integration equations of the first kind. J. Math. Anal. Appl. **53**, 359–366 (1976c)

Nashed, M. Z.: Operator-theoretic and computational approaches to ill-posed problems with application to antenna theory. IEEE Trans. Antennas Propagation. **29**, 220–231 (1981a)

Nashed, M. Z.: Ill-Posed Problems: Theory and Practice, Kap. Analysis and Implementation of Projection-Regularization Methods for Ill-Posed Problems. Reidel, Dordrecht and Boston (1981b)

Nashed, M. Z., Scherzer, O.:Inverse problems, image analysis and medical imaging (contemporary mathematics). Amer. Math. Soc. **313** (2002)

Nashed, M. Z., Wahba, G.: Convergence rate of approximate solutions to linear operator equations of the first kind. Math. Comp. **28**, 69–80 (1974a)

Nashed, M. Z., Wahba, G.: Regularization and approximation of linear operator equations in reproducing kernel spaces. Bull. Amer. Math. Soc. **80**, 1213–1218 (1974b)

Natterer, F.: The finite element method for ill-posed problems. RAIRO Analyse Numerique. **11**, 271–278 (1977)

Nettleton, L.: Gravity and magnetics in oil prospecting. McGraw-Hill, New York (1976)

Scherzer, O. (Hrsg.):Handbook of mathematical methods in imaging, 2. Aufl., Springer Science & Business Media, New York (2015)

Snieder, R.: The perturbation method in elastic wave scattering, scattering and Inverse scattering in pure and applied science, Kap. General theory of elastic wave scattering, S. 528–542. Academic Press, San Diago (2002)

Song, M.: Regularization-Projection Methods and Finite Element Approximations for Ill-Posed Linear Operator Equations. Dissertation, Univ. Michigan, Ann Arbor (1978)

Strand, O. N.: Theory and methods related to the singular function expansion and landweber's iteration for integral equations of the first kind. SIAM J. Numer. Anal. **11**, 798–825 (1974)

Symes, W. W.: Kinematics of reverse time s-g migration. Technical report, Technical report, Rice University, Houston (2003)

Symes, W. W.: Reverse time migration with optimal checkpointing. Geophys., **72**, SM213–SM221 (2007)

Tarantola, A.: Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. Geophys. **49**, 1259–1266 (1984)

Tikhonov, A. N.: On the stability of inverse problems. Dokl. Akad. Nauk SSSR. **39**, 195–198 (1943)

Tikhonov, A. N.: On the solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. Dokl. Akad. Nauk SSSR. **151**, 501–504 (1963)

Varah, J.: On the numerical solution of ill-conditioned linear systems with applications to ill-posed problems. SIAM J. Numer. Anal. **10**, 257–267 (1973)

Yilmaz, O.: Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (1987)

6 Auswirkungen der Grundwasserbeschaffenheit auf Bau und Betrieb Oberflächennaher Geothermieanlagen

Lena Eggeling und Jochen Schneider

Inhaltsverzeichnis

6.1 Einleitung 282
6.2 Offene Systeme 283
6.2.1 Probenahme und Analytik 283
6.2.2 Einfluss der Wasserqualität auf den Betrieb 284
6.3 Geschlossene Systeme 286
6.3.1 Analysenkonzepte zur Charakterisierung sulfathaltiger Gesteine 286
6.3.2 Chemische Zusammensetzung von Wärmeträgerfluiden 289
6.3.3 Temperaturinduzierte Änderungen der Chemie 290
Literatur 292

Zusammenfassung

In Abhängigkeit des genutzten Systems – offene oder geschlossene Anlagen – ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Beschaffenheit des Wärmeträgermediums. Die Grundwasserbeschaffenheit spielt besonders bei offenen Systemen eine wesentliche Rolle und beeinflusst Bau, Betrieb und die Lebensdauer bei brunnengekoppelten Anlagen. Aus diesem Grund sollten die Konzentrationen der relevanten Wasserinhaltsstoffe als auch die wesentlichen Vor-Ort-Parameter bekannt sein, da ungünstige hydrochemische Eigenschaften sich nachteilig auf die Förderleistung der Brunnen auswirken können. Die häufigste Ursache für eine frühzeitige Brunnenalterung ist die

Lena Eggeling (✉)
Geowissenschaftliches Zentrum, Georg-August-Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 3, 37077 Göttingen, Deutschland
e-mail: lena.eggeling@geo.uni-goettingen.de

Jochen Schneider
Hydrosion GmbH, Tizianstr. 96, 80638 München, Deutschland
e-mail: jochen.schneider@enerchange.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_6

biologische Verockerung, die im Zusammenhang mit der Nutzung eisen- respektive manganhaltiger Grundwässer auftreten kann. Grundwässer, die über hohe Konzentrationen aggressiver Inhaltsstoffe verfügen, weisen einen korrosiven Charakter auf. Bei geschlossenen Systemen sollte neben der Kenntnis der Grundwasserbeschaffenheit auch die chemische Zusammensetzung synthetischer Wärmeträgermedien bekannt sein, da sie im Fall einer Leckage in das Grundwasser eintreten können. In der Praxis werden Erdwärmesondenanlagen üblicherweise mit einer Wasser-Glykol-Mischung im Verhältnis 4:1 befüllt. Die eingesetzten Glykole (vornehmlich Ethylenglykol aber auch Propylenglykol) gelten als schwach wassergefährdend. Die durch Erdwärmesonden induzierte Temperaturänderung im Untergrund ist vergleichsweise gering und wirkt sich nur unwesentlich auf die Grundwasserbeschaffenheit und Ökosystemfunktionen aus.

Schlüsselwörter

Grundwasserbeschaffenheit · Wasserinhaltsstoffe · Vor-Ort-Parameter · Verockerung · Versinterung · Korrosion · Gips · Anhydrit

6.1 Einleitung

Die Oberflächennahe Geothermie stellt in der Energieversorgung sowohl für Privathaushalte als auch für größere Gewerbe- und Industriegebäude eine der wenigen Möglichkeiten einer nahezu CO_2-freien Wärmeversorgung dar. Für die Wärmeversorgung nutzt die Oberflächennahe Geothermie ein flüssiges Trägermedium (Wasser, Alkohol, Kohlendioxid), das aus dem Untergrund zur Wärmegewinnung gefördert wird.

Es können offene und geschlossene Systeme unterschieden werden. Offene Systeme nutzen direkt flüssige Trägermedien, meist Grundwasser, denen die Wärme entzogen wird. Hierbei kann es sich um stationäre Grundwasserspeicher, wie auch um Grundwasserbrunnen in hochdurchlässigen Aquiferen handeln (Griebler 2015). Im Folgenden werden die hochdurchlässigen Aquifere betrachtet, da die Grundwasserspeicher in Deutschland bisher keine große Rolle spielen und aufgrund der hohen Temperaturverschiebungen bis über 90 °C und der daraus folgenden komplexen vor allem mikrobiologischen Prozesse im Aquifer einer separaten Betrachtung bedürfen.

Geschlossene Systeme, meist Erdwärmesonden oder -kollektoren, zirkulieren in einem versiegelten Kreislauf flüssige oder zum Teil gasförmige Trägermedien, die sich während der Zirkulation im Untergrund erwärmen und in der übertägigen Wärmepumpe die Wärme über einen Wärmetauscher auf den Heizkreislauf übertragen.

Die zwei Systeme haben hinsichtlich der Beschaffenheit des Wärmeträgermediums unterschiedliche Anforderungen. Während in offenen Systemen ein natürliches Wärmeträgermedium genutzt wird, dessen Zusammensetzung von der Geologie und den Wasser-Gas-Gesteins-Wechselwirkungen bestimmt wird, nutzen geschlossene Systeme meist ein synthetisches Wärmeträgermedium. Aus diesem Grund sind vor allem für offene Systeme die analytische Kenntnis der Zusammensetzung und die Abstimmung mit

den grundwasserberührten Installationen eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb.

6.2 Offene Systeme

Bei offenen Systemen handelt es sich beispielsweise um einen oder mehrere Grundwasserbrunnen in einem Aquifer, denen Wasser entnommen und über einen zweiten oder mehrere Brunnen wieder in das untertägige System zurückgegeben wird.

6.2.1 Probenahme und Analytik

Die Grundwasserbeschaffenheit beeinflusst Lebensdauer, Funktionstüchtigkeit und Wirkungsgrad von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen. Dabei kann es innerhalb eines Aquifers sowohl zu räumlichen als auch zu zeitlichen Änderungen der Grundwasserbeschaffenheit kommen.

Einen Überblick über die am Standort zu erwartende Wasserqualität geben unter anderem die Kartenwerke der Länder, welche zum Beispiel über die flächenhafte Konzentrationsverteilung relevanter chemischer Elemente im Grundwasser informieren. Zusätzlich empfiehlt sich bei offenen Fragen eine standortspezifische hydrochemische Bestandsaufnahme.

Eine fachgerechte Probenahme ist dabei eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine gute Analytik und damit auch relevant für die Interpretation der Ergebnisse. DIN EN ISO 5667-3 (2004) definiert die Probenahmegefäße, die fachgerechte Konservierung, die Lagerung und den Transport der Proben sowie die parameterspezifisch einzuhaltenden Zeiten bis zur Analytik. Die entnommenen Proben werden idealerweise in einem akkreditieren Analyselabor auf die entsprechenden Parameter mit unterschiedlichen Methoden untersucht.

Tab. 6.1 zeigt alle relevanten Wasserinhaltsstoffe sowie die zu messenden Vor-Ort-Parameter mit ihren zugehörigen Richtwerten. Von einer Direktnutzung des Grundwassers muss abgeraten werden, wenn Grenzwerte nicht eingehalten werden können und ein störungsfreier Betrieb der Anlage nicht sichergestellt werden kann.

Die zu untersuchenden Wasserinhaltsstoffe sind Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan sowie Chlorid, Sulfat, Nitrat, Phosphor, Hydrogencarbonat und Ammonium. Die zu bestimmenden Vor-Ort-Parameter sind:

- die Grundwassertemperatur,
- der pH-Wert,
- die spezifische elektrische Leitfähigkeit,
- das Redoxpotenzial,
- und der Sauerstoffgehalt.

Tab. 6.1 Richtwerte, die nicht überschritten werden sollen. (Walker-Hertkorn und Tholen 2007)

pH-Wert	7,5–9
Chloride (Cl^-)	300 mg/l
Sulphid (SO_3), freies Chlorgas (Cl_2)	1 mg/l
Nitrat (NO_3), gelöst	100 mg/l
Sulfate (SO_4^{2-})	70 mg/l
Hydrogencarbonat (HCO_3^-)	70–300 mg/l
Freie aggressive Kohlensäure (CO_2)	5–20 mg/l
Eisen und Mangan	0,5 mg/l *
Sauerstoff	2 mg/l
Elektrische Leitfähigkeit	10–500 µS/cm
Gesamthärte	4,0–8,5 °dH

*Zu Eisen und Mangan gibt es unterschiedliche Empfehlungen seitens der Wärmepumpenhersteller

Die vor Ort durchgeführten Messungen sind oft genauer als die Analysen der Proben nach dem Transport ins Labor, da dann schon erste Veränderungen der Proben stattgefunden haben können.

6.2.2 Einfluss der Wasserqualität auf den Betrieb

Die Wasserqualität nimmt unmittelbaren Einfluss auf die Förderleistung der Brunnen von Wasser-Wasser-Anlagen. Die häufigste Ursache für die Alterung der Brunnen sind Verockerungserscheinungen (80 %). Weitere Ursachen sind Korrosion (5 %), Versinterung (3 %) und Verschleimung (2 %) (Walker-Hertkorn und Tholen 2007).

6.2.2.1 Verockerung

Im Falle der biologischen Verockerung ist der beobachtete Leistungsrückgang der Brunnenanlage eng mit einem bakteriellen Wachstum verknüpft. Dabei werden im Grundwasser gelöstes zweiwertiges Eisen und Mangan durch eisen- und manganoxidierende Bakterien zu schwer löslichen Hydroxidverbindungen oxidiert:

Eisenoxidation

$$4\,Fe^{2+} + O_2 + 10\,H_2O \leftrightarrow 4\,Fe(OH)_3 \downarrow + 8\,H^+$$

Manganoxidation

$$4\,Mn^{2+} + O_2 + 6\,H_2O \leftrightarrow 4\,MnOOH \downarrow + 8\,H^+$$

$$2\,Mn^{2+} + O_2 + 2\,H_2O \leftrightarrow 2\,MnO_2 \downarrow + 4\,H^+$$

Wie aus den chemischen Gleichungen hervorgeht, kann die Verockerung nur im Beisein von Sauerstoff stattfinden, das heißt unter oxidierenden Bedingungen im Grundwasser. Die Oxidation von Eisen (bzw. Mangan) dient den eisenoxidierenden (manganoxidierenden)

Bakterien zur Energiegewinnung für ihre Stoffwechselaktivitäten. Bei dem Oxidationsprozess gibt das Eisen(II)-Ion ein Elektron ab. Anschließend hydrolisieren die Eisenionen und es bilden sich schwer lösliche Eisenhydroxidverbindungen. Die Bildung dieser Hydroxidverbindungen kann auch rein chemisch geschehen. Voraussetzung ist ein ausreichend hoher Sauerstoffgehalt im Grundwasser (Thronocker und Szewzyk 2013).

Die biologische Verockerung ist eine Art von Biofilm. Die Mikroorganismen sind dabei in einer schleimigen Grundmasse aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) eingebettet. Die mikrobiellen Prozesse sind nicht durch das Ausbaumaterial der Brunnenanlage beeinflussbar, vielmehr ist die biologische Verockerung die häufigste Art der Brunnenalterung. Die gebildeten Hydroxide können sich sowohl in Ausbaurohren unterhalb des Wasserspiegels als auch an der Pumpe als ein bräunlicher Belag ablagern, dessen Dicke von einigen Mikrometern bis zu mehreren Zentimetern reichen kann.

Ist die Leistungsfähigkeit eines Brunnes durch Verockerungserscheinungen beeinträchtigt, kann dieser Entwicklung mittels Regenerierungsmaßnahmen entgegen gewirkt werden. Ein geeignetes Verfahren ist zum Beispiel die mechanische Reinigung.

6.2.2.2 Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC)

Die im Biofilm aktiven Mikroorganismen können neben der Verockerung auch zur Korrosion von Anlagenteilen beitragen. Korrosionsschäden treten zumeist an metallischen Materialien oder kunststoffbeschichteten Stählen auf (Tostmann 2001).

Die thermodynamischen Hintergründe sind bei dieser sogenannten mikrobiell induzierten Korrosion die gleichen wie bei der chemischen Korrosion. Die MIC wird durch die Stoffwechselaktivität von Bakterien ausgelöst, die korrosiv wirkende organische und anorganische Säuren produzieren. Die mikrobiell induzierte Korrosion ist somit eine Folge von bakteriellen Stoffwechselprodukten und weniger eine direkte Wechselwirkung zwischen Mikroorganismen und Werkstoff (Gümpel et al. 1996).

Während die meisten Korrosionsvorgänge an die Zufuhr von Sauerstoff als Oxidationsmittel gebunden sind, können bei der mikrobiell induzierten Korrosion die Korrosionsvorgänge auch im anaeroben Milieu stattfinden, beispielsweise durch die Anwesenheit sulfatreduzierender Bakterien (SRB), wie *Desulfovibrio desulfuricans*. Die Sulfatreduzierer setzten das Sulfat zu Schwefelwasserstoff um:

Sulfatreduktion

$$8\,H + 2\,H^{+} + SO_4^{2-} \rightarrow H_2S + 4\,H_2O$$

Die Sulfatreduktion ist einer der verbreitetsten mikrobiologischen Prozesse. Die lokale Säurebildung begünstigt eine rasche Korrosion des Werkstoffs.

6.2.2.3 Versinterung

Unter Versinterung versteht man die Bildung von karbonatischen Ausfällungen. Sie ist auf eine Verschiebung im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht infolge geänderter thermodynamischer Parameter zurückzuführen. Für das Gleichgewicht sind folgende Reaktionsgleichungen von Belang:

(a) Reaktionen des Kohlendioxids mit Wasser

(1) $CO_{2(g)} + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$

(2) $H_2CO_3 + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + HCO_{3^-}$ (Dissoziationsstufe 1)

(3) $HCO_3^- + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + CO_3^{2-}$ (Dissoziationsstufe 2)

(b) Lösungsreaktion von $CaCO_3$

(4) $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_{3^-}$

Die Löslichkeit von Kohlendioxid ist abhängig von seinem Partialdruck bzw. der Zusammensetzung der Gasphase und ihrem Gesamtdruck.

Die karbonatischen Inkrustationen treten überwiegend auf der Reinjektionsseite auf. Dabei bilden sich zumeist in der Filterkiesschüttung oder in den Filterschlitzen Karbonatausfällungen. Die Ablagerungen lassen sich jedoch in der Regel durch mechanische/chemische Reinigungsmaßnahmen beseitigen.

6.3 Geschlossene Systeme

Bei geschlossenen Systemen werden Wärmeträgermedien in einem Kreislauf zirkuliert: die kühlen Fluide nehmen in der Tiefe die Umgebungswärme auf und transportieren sie zur Entwärmung über einen Wärmetauscher an die Erdoberfläche. Die Wärmeträgermedien sind dabei sehr gut auf die Zirkulation abgestimmt. Schädigung der geschlossenen Systeme ist vorwiegend durch Wechselwirkungen mit der natürlichen Umgebung im Untergrund möglich.

6.3.1 Analysenkonzepte zur Charakterisierung sulfathaltiger Gesteine

Eine qualitativ hochwertige Verpressung des Bohrlochs gewährt zum einen einen optimalen Wärmeübergang zwischen dem Untergrund und der Erdwärmesonde, zum anderen dient dieser Vorgang als Schutzmaßnahme vor Beschädigung des Sondenrohrs während des Betriebes. Die richtige Wahl des Verpressmaterials spielt hierbei eine entscheidende Rolle für den Erfolg einer dauerhaften Abdichtung (Walker-Hertkorn und Tholen 2007).

Grundwässer, die über hohe Konzentrationen aggressiver Inhaltsstoffe wie Chlorid, Sulfat oder Kohlensäure verfügen, weisen einen korrosiven Charakter auf. DIN 4030-1 (2008) definiert das Angriffspotential von Wasser, Boden und Gas auf Beton. In Tab. 6.2 sind die Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Grundwässer und Böden aufgeführt.

Zementangreifende Wässer können eine aus herkömmlichem Zement hergestellte Abdichtung schädigen. In Gips- bzw. Anhydritgestein und stark betonaggressivem Grundwasser ist daher für die Suspensionsherstellung sulfatbeständiger Zement zu verwenden.

Die Anwesenheit sulfathaltiger Gesteine im Untergrund kann einen wesentlichen Einfluss auf den weiteren Projektverlauf nehmen. Hierbei kann durch eine rein visuelle

Tab. 6.2 Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwässer nach DIN EN 206-1

Chemisches Merkmal	XA1 (schwach angreifend)	XA2 (mäßig angreifend)	XA3 (stark angreifend)
Grundwasser			
pH-Wert	6,5–5,5	< 5,5–4,5	< 4,5 od. ≥ 4,0
CO_2 (mg/l)	15–40	> 40–100	>100 bis zur Sättigung
NH_4^+ (mg/l)	15–30	> 30–60	> 60–100
Mg^{2+} (mg/l)	300–1000	> 1000–3000	> 3000 bis zur Sättigung
SO_4^{2-} (mg/l)	200–600	> 600–3000	>3000 und ≤6000
Boden			
SO_4^{2-} (mg/l)	2000–3000	> 3000–12000	>12000 und ≤24000
Säuregrad	>200 Bauman-Gully	In der Praxis nicht anzutreffen	

Charakterisierung der Gesteinsproben zwischen den Sulfatmineralen Gips und Anhydrit nicht immer eindeutig unterschieden werden. Kommt es im Beisein von Wasser zur Umwandlung von Anhydrit ($CaSO_4$) zu Gips ($CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$), so kann es durch die damit verbundene Volumenzunahme von 60 % in anhydritführenden Gesteinsformationen zur Ausbildung eines Kristallisationsdrucks kommen (Anagnostou et al. 2010).

Zur Risikominimierung sind insbesondere analytische Methoden geeignet, die zeitnah eine qualitative und quantitative Analyse mit ausreichend hoher Sicherheit gestatten. Durch die Röntgendiffraktometrie (RDA oder XRD) kann die mineralogische Zusammensetzung von Gesteinsproben zur Charakterisierung bestimmt werden. Für die Messung muss das Probematerial zunächst pulverisiert und anschließend auf den gerätespezifischen Probenträger aufgebracht werden. Die Sulfatminerale Gips und Anhydrit weisen über charakteristische Beugemuster der Röntgenstrahlen auf und können daher nebeneinander identifiziert werden (Abb. 6.1) (Scheiber et al. 2011).

Eine weitere Analysenmethode stellt Infrarotspektroskopie dar, bei der Moleküle chemischer Verbindungen durch elektromagnetische Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich durch Energieübertragung zu spezifischen Schwingungen angeregt werden. Dabei werden bestimmte Wellenlängen der Strahlung durch das Probenmaterial absorbiert. Die unterschiedliche strukturelle Anordnung des Sulfat-Ions SO_4^{2-} in den beiden Sulfatmineralen Anhydrit und Gips führt zu spezifisch ausgebildeten Schwingungszuständen des Moleküls im jeweiligen Mineral (Abb. 6.2) (Scheiber et al. 2011).

Beide Analysemethoden lassen eine Unterscheidung von Anhydrit und Gips ab einem Anhydritgehalt von 0,5 Gew.-% Anhydrit im Probenmaterial zu. Einschränkungen ergeben sich im Wesentlichen durch die Matrix des Probenmaterials. So ist die Infrarotspektroskopie für die Detektion von Anhydrit in einer Tonsteinmatrix der Röntgendiffraktometrie vorzuziehen, da die Leistungsfähigkeit der XRD durch die Anwesenheit von Schichtsilikaten stark eingeschränkt wird. Bei hohen Gipsgehalten, wie sie in Gesteinen des

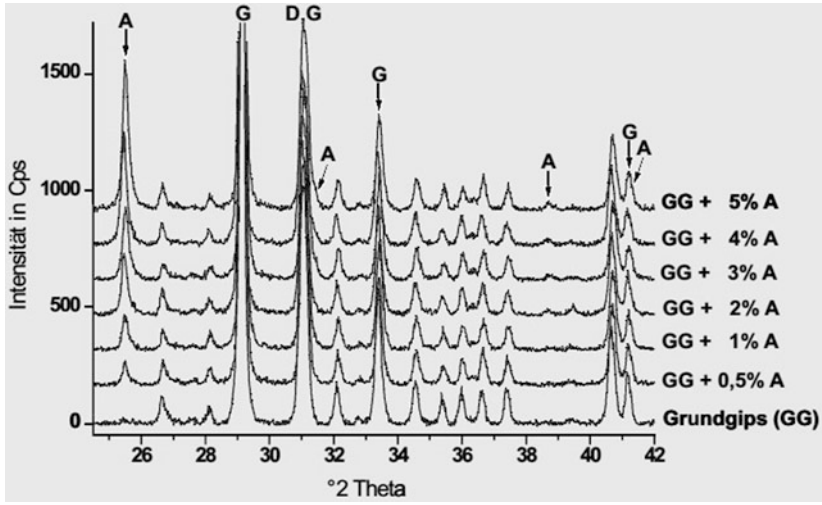


Abb. 6.1 Diffraktogramme der Mischungen von Grundgips (GG) und Anhydrit (A). Markiert sind relevante Peaks von Gips (G) und Dolomit (D). (Scheiber et al. 2011)

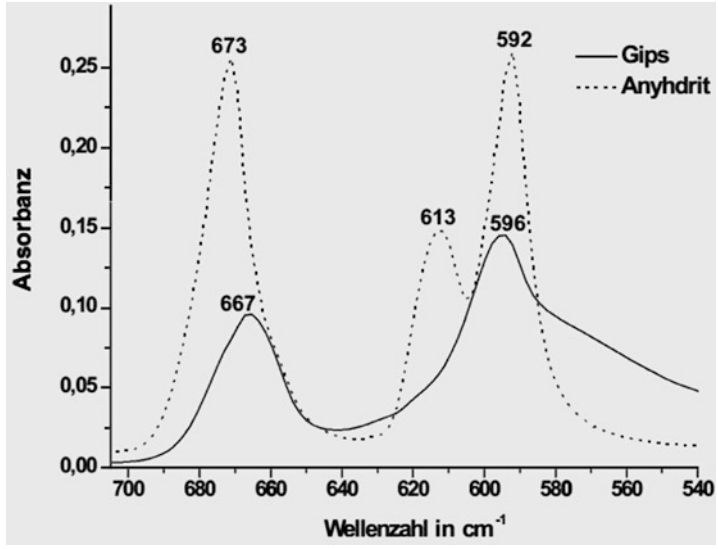


Abb. 6.2 ATR-Spektren der reinen Minerale Gips (G) und Anhydrit (A). (Scheiber et al. 2011)

Grundgipses vorkommen, ist die Identifizierung von Anhydrit mittels Infrarotspektroskopie nur stark eingeschränkt möglich und die Röntgendiffraktrometrie das zu bevorzugende Verfahren (Scheiber et al. 2011).

6.3.2 Chemische Zusammensetzung von Wärmeträgerfluiden

Im Falle einer Leckage an der Erdwärmesonde kann es zu einem Eintrag der Wärmeträgerflüssigkeit in das Grundwasser kommen. Es ist daher notwendig, das Verhalten der eingesetzten Stoffe im Untergrund auch hinsichtlich des Grundwassergefährdungspotenzials und der Abbaubarkeit prognostizieren und bewerten zu können.

Wasser ist mit einer spezifischen Wärmekapazität von 4,2 KJ/(kg·K) eine wirksame Wärmeträgerflüssigkeit. Um das Einfrieren der Wärmeträgerflüssigkeit in den Wintermonaten im oberflächennahen Untergrund zu vermeiden, ist die Beimischung von Frostschutzmitteln üblich. Dabei stellen Glykole, insbesondere Ethylenglykol oder Propylenglykol, die gängigsten Frostschutzkomponenten dar. Tab. 6.3 zeigt die wichtigsten physikalisch-chemischen Eigenschaften von Ethylenglykol und Propylenglykol. Beide Glykole sind nach der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe des Bundes vom 17. Mai 1999 der Wassergefährdungsklasse 1 (= schwach wassergefährdend) zuzuordnen (VwVwS 1999).

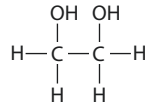
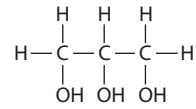
Glykole gelten unter oxischen und anoxischen Bedingungen als mikrobiell abbaubar. Als Stoffwechseltypen treten vor allem Gärung, aber auch anaerobe Atmung mit Sulfat auf. Als Stoffwechselprodukte bilden sich meist Alkohol und Karbolsäure, seltener Aldehyde sowie Karbonsäuren bei der Sulfat-Atmung. Diese Abbauprodukte zeichnen sich durch eine sehr geringe Toxizität aus und sind auch unter sauerstoffarmen Bedingungen biologisch gut abbaubar. Es ist daher zu erwarten, dass die Glykole letztendlich zu CO_2 und H_2O minimalisiert werden (Klotzbücher et al. 2007).

Alternativ zu glykolischen Wärmeträgern kann Betain (*N*,*N*,*N*-Trimethylammonioacetat), eine natürlich vorkommende Aminosäure, im Wärmeträgerfluid einsetzt werden. Da sich jedoch toxikologisch bedenkliche Stoffe wie Trimethylamin als Stoffwechselprodukt des anaeroben Betain-Abbaus bilden, ist der Einsatz von Betain nicht zu empfehlen. Trimethylamin ist der Wassergefährdungsklasse 2 (= wassergefährdend) zuzuordnen (Klotzbücher et al. 2007).

Neben dem Frostschutzmittel sind dem Wärmeträgerfluid weitere Begleitstoffe, sogenannte Additive, beigesetzt. Sie fungieren unter anderem als Korrosionsschutz anfälliger Bauteile. Die Umweltverträglichkeit hängt dabei von den jeweiligen Verbindungen ab, welche von Hersteller zu Hersteller variieren können. Je nach chemischer Struktur können manche Begleitstoffe mikrobiell nicht abgebaut werden.

In der Praxis wird die Erdwärmesondenanlage üblicherweise mit der Wasser-Glykol-Mischung im Verhältnis 4:1 (Wasser:Glykol) befüllt. Zusätzlich wird das Frostschutzmittel, wie oben beschrieben, zu einem sehr geringen Anteil (circa 1 %) mit einem Korrosionsinhibitor versehen (Walker-Hertkorn und Tholen 2007).

Tab. 6.3 Physikalisch-chemische Eigenschaften von Ethylenglykol und Propylenglykol. (Klotzbücher 2006)

	Ethylenglykol	Propylenglykol
Strukturformel		
CAS-Nr.	107-21-1	57-55-6
Molekulargewicht (g/mol)	62,07	76,11
Dichte (g/ml)	1,1135 (20 °C)	1,0361 (20 °C)
Schmelzpunkt (°C)	-13	-60
Siedepunkt (°C)	197,6	187,6
Dampfdruck (mm Hg)	0,05 (20 °C)	0,07 (20 °C)
Henry-Konstante (atm $m^{-3}mol^{-1}$)	$6 \cdot 10^{-8}$(25 °C)	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$(25 °C)
Wasserlöslichkeit	Löslich; ≥ 10 g/100 ml bei 17,5 °C	Löslich
Log K_{ow} [1)](-)	–1, 93	–0, 92

[1)]Octanol-Wasser-Verteilungskonstante

Die im Falle einer Leckage austretende Menge an nicht abbaubaren Stoffen ist demnach sehr gering. Eine weitere Beschränkung ergibt sich durch betriebssichernde Maßnahmen. So werden Undichtigkeiten im Anlagesystem frühzeitig, beispielsweise mittels Druckwächter, erkannt und eine automatische Abschaltung der Anlage veranlasst.

6.3.3 Temperaturinduzierte Änderungen der Chemie

Die geothermische Nutzung Oberflächennaher Grundwasserleiter für Heiz- und Kühlzwecke verursacht lokale Temperaturänderungen im Grundwasser, die das chemische Gleichgewicht von Mineralen beeinflussen können. Man unterscheidet hierbei zwischen Mineralen, die sich durch ein prograde (die Löslichkeit nimmt mit steigender Temperatur zu) oder ein retrograde (die Löslichkeit nimmt mit steigender Temperatur ab) Löslichkeitsverhalten auszeichnen (Arning et al. 2006).

Zu den Mineralen mit einem retrograden Löslichkeitsverhalten zählen Carbonate wie Calcit, da sie über das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht mit der CO_2-Löslichkeit gekoppelt sind. Bei Temperaturen > 40 °C kann es je nach Grundwasserbeschaffenheit zu vermehrten Kalkausfällungen kommen. Da die absolute Wassertemperatur nach (VDI 4640 2001) maximal 20 °C betragen darf, ist bei der Nutzung der Oberflächennahen Geothermie die beschriebene Ausfällungsthematik jedoch vernachlässigbar.

Laborversuche mit Grundwasser- und Bodenproben zeigen zunehmende Konzentrationen von Kalium und Silizium mit steigender Temperatur zwischen 2 °C und 50 °C (Arning

et al. 2006) sowie abnehmende Sauerstoffgehalte mit steigender Temperatur zwischen 4 °C und 45 °C (Brielmann et al. 2009). Im Temperaturbereich zwischen 11 °C und 18 °C werden laut Brielmann et al. (2011) dagegen keine Veränderungen der Konzentrationen von gelöstem organischem Kohlenstoff, Sauerstoff, Phosphat, Chlorid, Nitrat, Sulfat, Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium beobachtet.

Die Erwärmung bzw. Abkühlung des Grundwassers um wenige Grad Celsius wirkt sich somit nur unwesentlich auf die Wasserbeschaffenheit und Ökosystemfunktionen aus. Eine Temperaturschwankung von ± 6 Kelvin relativ zur unbeeinflussten Grundwassertemperatur gilt als vertretbar (VDI 4640 2001).

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass eine Temperaturerhöhung des Grundwassers die mikrobiologischen Stoffwechselaktivitäten begünstigen kann, wobei die verschiedenen Bakterien unterschiedliche Anforderungen an ihre Umgebungstemperatur stellen. Die Spanne reicht von psychrophilen (kälteliebenden) Arten, die bei Temperaturen von knapp unter –5 °C bis circa 20 °C existieren, bis hin zu den hyperthermophilen (wärmeliebenden) Organismen, die bei Temperaturen zwischen etwa 85 °C und 110 °C anzutreffen sind. Letztere sind somit irrelevant für Oberflächennahe geothermische Anwendungen, sofern die Aquiferspeicher ausgenommen werden (Fuchs und Schlegel 2006).

Kleine Erdwärmesondenanlagen, wie sie für den Gebrauch bei Einfamilienhäusern typisch sind, werden zumeist zum Heizen, seltener zusätzlich auch zum Kühlen, eingesetzt. Auch wenn die Solerücklauftemperatur aus dem Erdreich bei Spitzenlasten im Winter bis in den Minusbereich geht, ist die durch Erdwärmesonden im Untergrund induzierte Temperaturänderung vergleichsweise gering. Grund dafür sind die verschiedenen thermischen Widerstände von Sondenrohr, Hinterfüllmaterial und Gebirge bzw. deren vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit. Dieser Aspekt ist im Hinblick auf potentielle Änderungen im hydrochemischen Milieu von Grundwässern von Bedeutung: Im Zu- und Abstrom sind nur unmittelbar an der Erdwärmesonde Temperaturänderungen zu erwarten, welche geeignet sind, Ausfällungen oder Lösungserscheinungen zu generieren. Abb. 6.3 zeigt dies beispielsweise für eine Erdwärmesonde in einem Grundwasserleiter mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 5 \cdot 10^{-4}$m/s und einer Porosität $n = 0,2$. Dargestellt sind vier verschiedene Spitzenlastfälle (Dauerbetrieb durchgehend von 24, 48, 120 und 240 Stunden), die so in der Realität schon wegen der Sperrzeiten der Stromnetzbetreiber nicht auftreten werden. Temperaturänderungen mit der Zeit von mehr als einem Kelvin finden sich dabei nur im Radius <1 m um die Erdwärmesonde. Für die dargestellten Temperaturkurven wurde das Verfahren der beweglichen Linienquellen (*moving line source*) für Erdreich und den thermischen Bohrlochwiderstand herangezogen. Näheres dazu findet sich bei Diao et al. (2003), Sutton et al. (2003) und Kölbel (2010).

Beim Bau von größeren Erdwärmesondenanlagen empfiehlt die UBA-Studie (Griebler 2015) eine enge Zusammenarbeit mit den Behörden sowie die Nutzung von Geoinformationssystemen. Um einen möglichen Eintrag von Bohrverunreinigungen in das Grundwassersystem zu verhindern, wird der vorsorgende Grundwasserschutz empfohlen. Im Betrieb ist nach Ansicht der Autoren der Wärmeeintrag und -entzug zu dokumentieren

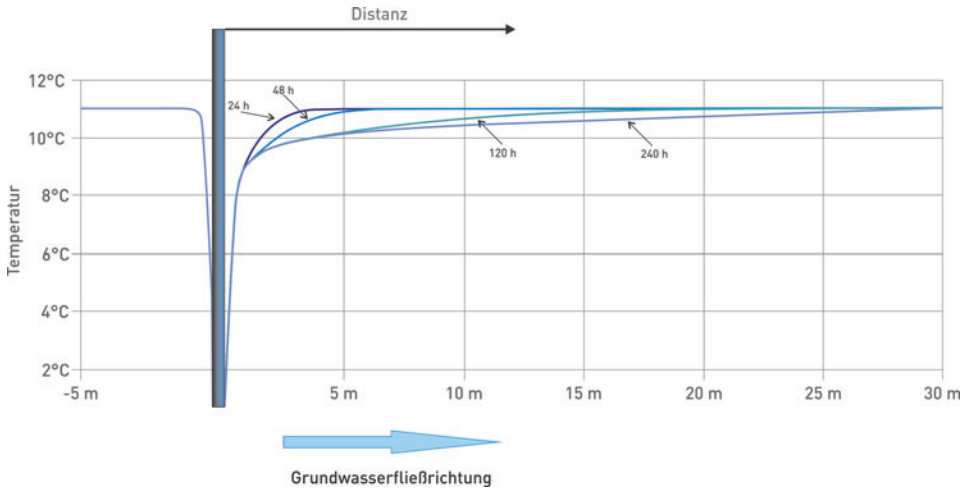


Abb. 6.3 Temperaturverlauf im Aquifer ($k_f = 5 \cdot 10^{-4}$m/s, $n = 0{,}2$) für verschiedene Spitzenlastszenarien einer Erdwärmesonde

und die Anlage ausgewogen zu betreiben, sodass der Temperatureintrag in den Untergrund in der Jahresenergiebilanz ausgeglichen wird (Griebler 2015).

Literatur

Anagnostou, G., Pimentel, E., Serafeimidis, K.: Swelling of sulphatic claystones - some fundamental questions and their practical relevance. Geomechanics and Tunnelling **3**(5), 567–572 (2010)

Arning, E., Kölling, M., Panteleit, B. et al.: Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. Grundwasser **1**, 27–39 (2006)

Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S. I. et al.: x Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. FEMS Microbiol. Ecol. **68**, 273–286 (2009)

Brielmann, H., Lueders, T., Schreglmann, K. et al.: Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. Grundwasser **16**, 77–91 (2011)

Diao, N., Li Q, Fang, Z.: An analytical solution of the temperature response in geothermal heat exchangers with groundwater advection. Journal Shandong Inst. Archit. Engng. **18**(3), 1–5 (2003)

DIN 4030-1 Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte. (2008)

DIN EN 206-1 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (2001)

DIN EN ISO 5667-3: Wasserbeschaffenheit – Probenahme – Teil 3: Anleitung zur Konservierung und Handhabung von Wasserproben (2004)

Fuchs, G., Schlegel, H. G.: Allgemeine Mikrobiologie, 8. Aufl. Thieme, Stuttgart (2006)

Griebler, C., Kellermann, C., Stumpp, C. et al.: Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. TEXTE 54/2015

Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Umweltbundesamt. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_54_2015_auswirkungen_thermischer_veraenderungen_infolge_der_nutzung_obenflaechennaher_geothermie_0.pdf (2015). Zugegriffen: 08. Apr. 2016

Gümpel, P., Kreikenbohm, R., Neumann, K.: Betrachtungen über mikrobiell induzierte Korrosionsvorgänge und deren biologischen Hintergrund. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik **27**(3), 122–128 (1996)

Klotzbücher, T.: Risikoeinschätzung bezüglich des Einsatzes von Glykol in Wärmeträgerflüssigkeiten bei der Gewinnung von oberflächennaher Geothermie – Untersuchungen zum anaeroben Abbau von Glykolen. Diplomarbeit, Universität Tübingen (2006)

Klotzbücher, T, Kappler, A, Straub, K. L. et al.: Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. Geothermics, **36**, 348–361 (2007)

Kölbel, T.: Grundwassereinfluss auf Erdwärmesondenanlagen: Geländeuntersuchungen und Modellrechnungen. Dissertation, KIT (2010)

Scheiber, J., Schwotzer, M., Kölbel, T. et al.: Detektion von Anhydrit in Bohrklein – Vergleich verschiedener Analysekonzepte. bbr Sonderheft 2011, 18–27 (2011)

Sutton, M., Nutter, D., Couvillion, R.: TA ground resistance for vertical bore heat exchangers with groundwater flow. J Energ Resour-Asme 125, 183–188 (2003)

Thronocker, O., Szewzyk, U.: Verockerungsanalytik für eine längere Brunnenlebensdauer. bbr **10**, 70–73 (2013)

Tostmann, K-H., Korrosion: Ursachen und Vermeidung, 1. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim (2001)

VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlage. Beuth, Berlin (2001)

VwVwS: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen. Bundesanzeiger 51(98a) (1999)

Walker-Hertkorn, S., Tholen, M.: Arbeitshilfen Geothermie: Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen, 1. Aufl. Wirtschafts- u. Verlagsges. Gas u. Wasser, Bonn (2007)

Risikomanagement bei Planung, Bau und Betrieb von Geothermieanlagen

7

Hans Jacobi und Thomas Neu

Inhaltsverzeichnis

7.1 Einführung 296
7.2 Risikomanagement: Definition und Methoden 296
7.3 Identifikation potenzieller Risiken in der Oberflächennahen Geothermie 298
7.4 Bewertung der Risiken 300
7.5 Maßnahmen zur Verringerung der Risiko-Eintrittswahrscheinlichkeit und zur Schadensminimierung 312
7.6 Schlussbetrachtung 321
Literatur 321

Zusammenfassung

Jede wirtschaftliche Tätigkeit ist Risiken unterworfen, die dann zu unerwarteten Verlusten führen, wenn sie überraschend auftreten und diejenigen, die die wirtschaftliche Tätigkeit ausüben, unvorbereitet treffen. Das wohl gravierendste Risiko in der Oberflächennahen Geothermie ist das sichere Beherrschen der Schnittstellen zu den anderen Systemkomponenten. Man geht davon aus, dass weltweit etwa 50 % aller Bohrungen zur Erschließung neuer Lagerstätten nicht fündig werden. Die „Fehlquote" bei Geothermiebohrungen in Deutschland wird mit 20–30 % deutlich geringer eingeschätzt. Intensive Vorbereitung unter Ausnutzung aller zur Verfügung stehenden Methoden, gründliche Auswertung aller vorhandenen Daten und realistische Abschätzung möglicher Restrisiken können die „Fehlquote" weiter verringern. Gleichwohl bleibt ein

Hans Jacobi (✉)
Jacobi & Partner Industrieberatung GmbH, Kennedyplatz 8, 45127 Essen, Deutschland
e-mail: hans@jacobi.pro

Thomas Neu
proG.E.O. Ingenieurgesellschaft mbH, Elisabethenstraße 3, 66119 Saarbrücken, Deutschland
e-mail: info@progeo-ing.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_7

Restrisiko, das den Investor einer einzelnen Geothermiebohrung als Energiequelle stärker treffen kann als den Investor einer größeren Anlage.

Schlüsselwörter
Risikoidentifikation bei Bau und Betrieb von Geothermieanlagen · Risiko-Kosten-Bewertung · Risikovermeidung · Schadensminimierung

7.1 Einführung

Im Folgenden werden die Risiken oberflächennaher Vorhaben betrachtet. Hierzu zählen insbesondere der Bau von Erdsondenanlagen bis einer Tiefe von 400 m oder die Nutzung des Grundwassers mittels Schluck- und Förderbrunnen. Auf andere Nutzungsformen gelten die folgenden Ausführungen sinngemäß.

7.2 Risikomanagement: Definition und Methoden

Risiken sind Ereignisse, die überraschend auftreten und einen wirtschaftlichen Schaden verursachen. Risiken werden dann teuer, wenn sie nicht vorhergesehen und beherrscht werden.

Allgemein unterscheidet man:

- spekulatives Risiko, das ist die Verlustgefahr durch unternehmerisches Handeln, z. B. Bau und Betrieb einer Geothermieanlage,
- reines Risiko, das ist die Gefahr des Vermögensverlustes durch Schadgefahren wie Feuer, Sturm, Havarie.

Der Gesetzgeber hat daher das Aktiengesetz (AktG) und das Handelsgesetzbuch (HGB) mit dem am 1. Mai 1998 in Kraft getretenen Gesetz zur Kontrolle und Transparenz (KonTraG) geändert und folgende Bestimmungen gesetzlich vorgegeben, die sinngemäß auch für den Bauherrn eines Einfamilienhauses gelten sollten, das mit einer Erdwärmesonde energetisch versorgt wird:

- Gemäß § 91 Abs. 2 AktG hat „der Vorstand einer Gesellschaft geeignete Maßnahmen zu treffen, insbesondere ein Überwachungssystem einzurichten, damit den Fortbestand der Gesellschaft gefährdende Entwicklungen früh erkannt werden“.
- Gemäß § 289 Abs. 1 HGB ist im Lagebericht „auch auf die Risiken der künftigen Entwicklung“ einzugehen.

In der Gesetzesbegründung zum KonTraG wird ausdrücklich klargestellt, dass die Verpflichtung aus § 91 Abs. 2 AktG bei Mutterunternehmen im Sinne von § 290 HGB

konzernweit zu verstehen ist und daher ein Mutterunternehmen im Rahmen seiner gesellschaftsrechtlichen Möglichkeiten auch diejenigen Tochtergesellschaften/ Beteiligungsgesellschaften in das Überwachungssystem einbeziehen muss, von denen bestandsgefährdende Entwicklungen ausgehen. Die rechtlichen Vorschriften gelten damit auch für Geothermiegesellschaften, die Tochterunternehmen großer Gesellschaften im Sinne des AktG sind.

Risikomanagement muss demnach bedeuten (siehe auch Abb. 7.1):

- Risiken aufdecken:
- Alle denkbaren Szenarien analysieren. Was kann passieren?

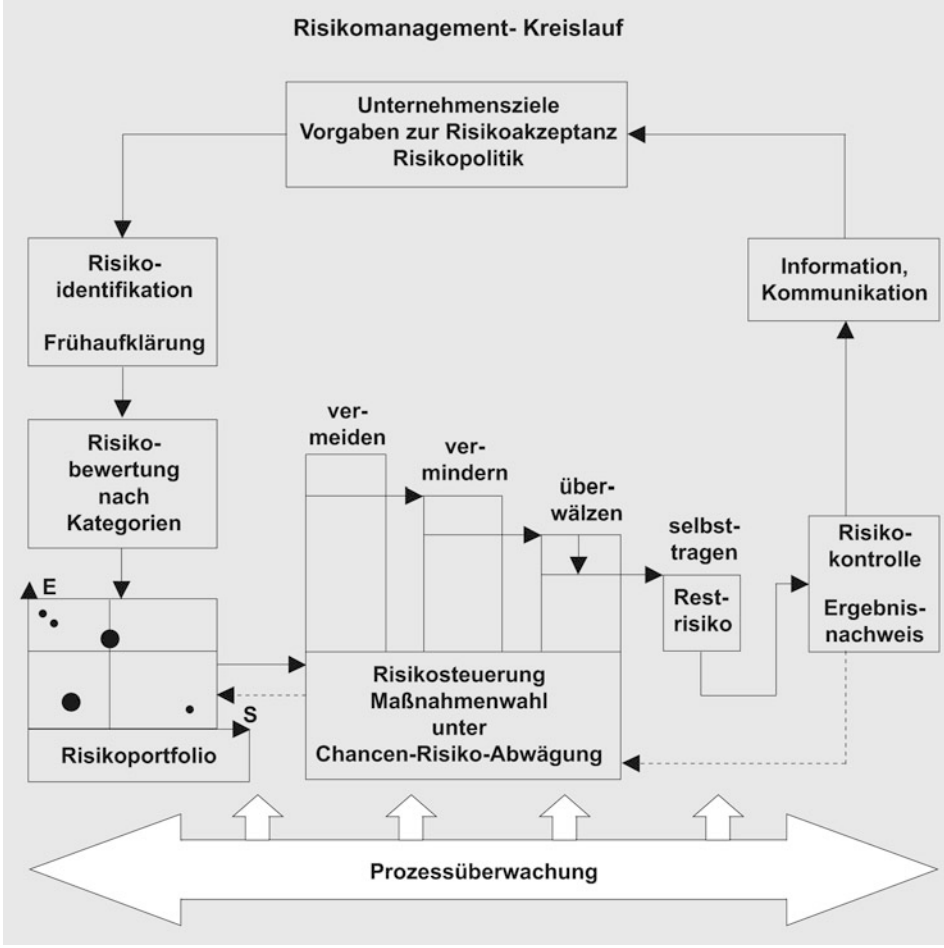


Abb. 7.1 Risikomanagement-Kreislauf, „Unternehmensziele“ sind hier gleichzeitig „Ziele des Bauherrn“ (http://wirtschaftslexikon.gabler.de/media/264/222636.png;abgerufenam02.02.2017)

- Risiken abwägen und bewerten:
  - Eintrittswahrscheinlichkeiten abschätzen, mögliche Schäden ermitteln,
  - Prioritäten aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schaden ableiten.
- Risikovorsorge treffen:
  - Maßnahmen zur Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit festlegen,
  - Maßnahmen zur Schadensminimierung erarbeiten,
  - Möglichkeiten der Schadensüberwälzung prüfen (z. B. Versicherungen),
  - geeignetes Frühwarnsystem einrichten.
- Risiken beherrschen.

7.3 Identifikation potenzieller Risiken in der Oberflächennahen Geothermie

Der wohl wichtigste und schwierigste Teil eines möglichst lückenlosen Risikomanagements ist die Identifikation möglicher Risiken (siehe Abb. 7.2).

Zur Risikoidentifizierung in der Geothermie sind kollektive und analytische Methoden geeignet. Die sicherste Methode einer lückenlosen Risikoerfassung sind Checklisten möglicher Szenarien (Szenarientechnik), die zu Risiken führen können. Die

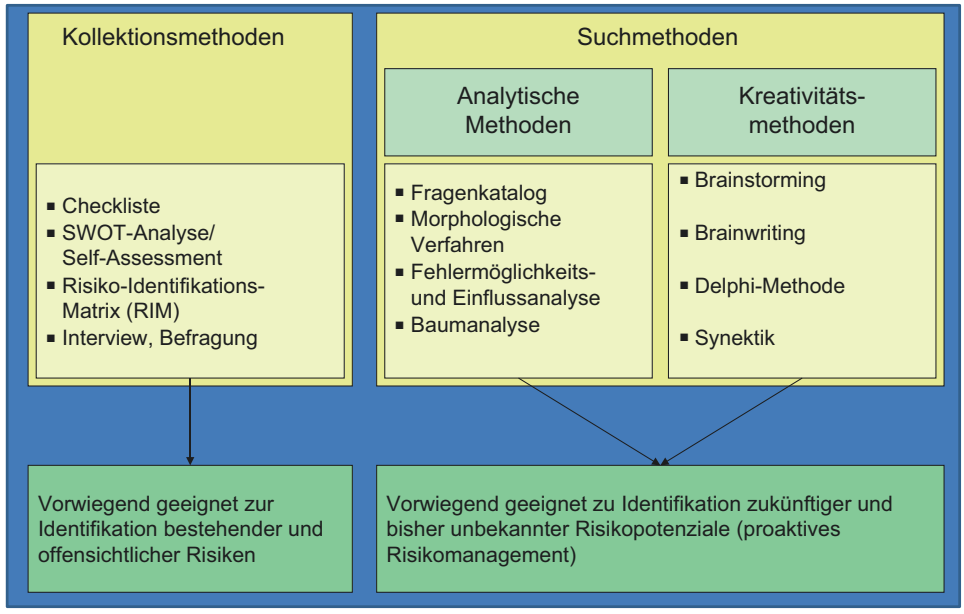


Abb. 7.2 Methoden der Risikoidentifikation

Checklistenmethode ist heute die gebräuchlichste Methode der Risikoidentifizierung, sie ist ideal für eine systematische Vorgehensweise. Im Folgenden werden an die Besonderheiten der Geothermie angepasste Checklisten zur Verfügung gestellt. Diese müssen dann projektbezogen systematisch in Hinblick auf Eintrittswahrscheinlichkeiten und mögliche Schadensschwere abgearbeitet werden.

Geeignete Methoden zur Identifizierung möglicher Risiken bei Geothermieprojekten sind:

- Checklisten-Risikokataloge,
- Szenariotechnik:
  Best Case, Worst Case, Trendanalyse,
- Expertenbefragungen:
  Auswertung aller vorhandenen geologischen und geotechnischen Informationen,
- Post-Mortem-Analyse:
  Erfahrungsberichte vorangegangener Projekte, alte Maßnahmen verifizieren,
- Erfahrungsaustausch in Tagungen und Fachausschüssen.
  Folgende Risikokatalogisierung für die Oberflächennahe Geothermie hat sich in Literatur und Vorträgen durchgesetzt (siehe Abb. 7.3):
- Querschnittsrisiken,
- Effektivitätsrisiken,
- Risiken bei Finanzen,
- Risiken beim Bohren,
- wirtschaftliche Risiken.

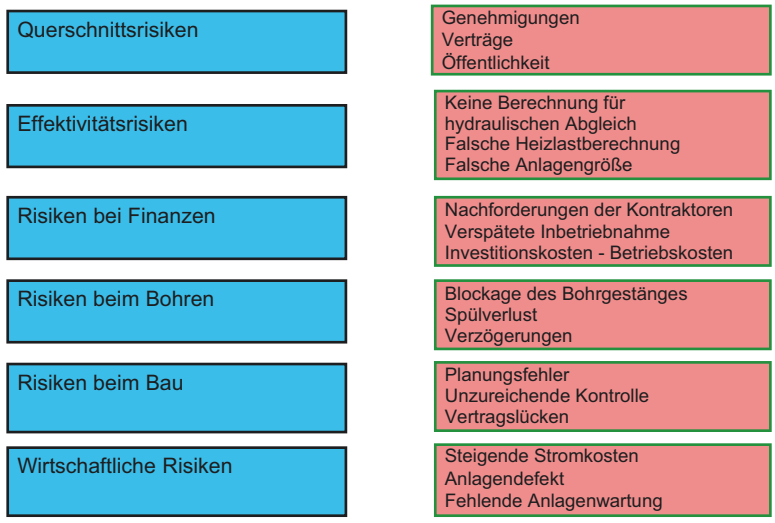


Abb. 7.3 Katalog möglicher Risiken in der oberflächennahen Geothermie

7.4 Bewertung der Risiken

Das Ergebnis einer wirtschaftlichen Risikoanalyse ist die Erfassung und Charakterisierung von Risikoereignissen in Form von Kosten (*risk identification and strategy using quantitative evaluation*, nach Bowden).

Elemente der Risikobewertung (siehe Abb. 7.4):

- Eintrittswahrscheinlichkeit,
- Möglicher wirtschaftlicher Schaden (Kosten oder Ertragseinbuße).

Zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit genügt eine grobe Einschätzung: unwahrscheinlich ca. 10 %, weniger wahrscheinlich ca. 40 %, wahrscheinlich ca. 70 %. Genauere Wahrscheinlichkeitsrechnungen sind u. U. möglich, bringen aber für einen Einzelfall bekanntlich keine exakten Erkenntnisse. Sie verleiten lediglich zur Vorspiegelung einer falschen Genauigkeit, da das Ereignis im Einzelfall eintreten oder auch nicht eintreten kann, gleichgültig, welche Wahrscheinlichkeit vorher errechnet wurde. Ein Wahrscheinlichkeitswert wird lediglich für die Erzeugung eines Finanz- oder Risikowertes als vergleichsgeeignete Kennzahl benötigt. Diese errechnet sich aus dem Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und wirtschaftlichem Schaden. Der so berechnete Finanzwert ist eine kostenorientierte Risikokenngröße für die Gewichtigkeit eines Risikoereignisses. Er sagt aus, welche Risiken bestandsgefährdend sind und welche Risiken in ihrer wirtschaftlichen Auswirkung vernachlässigbar sind. Mithilfe der Risikowerte kann eine

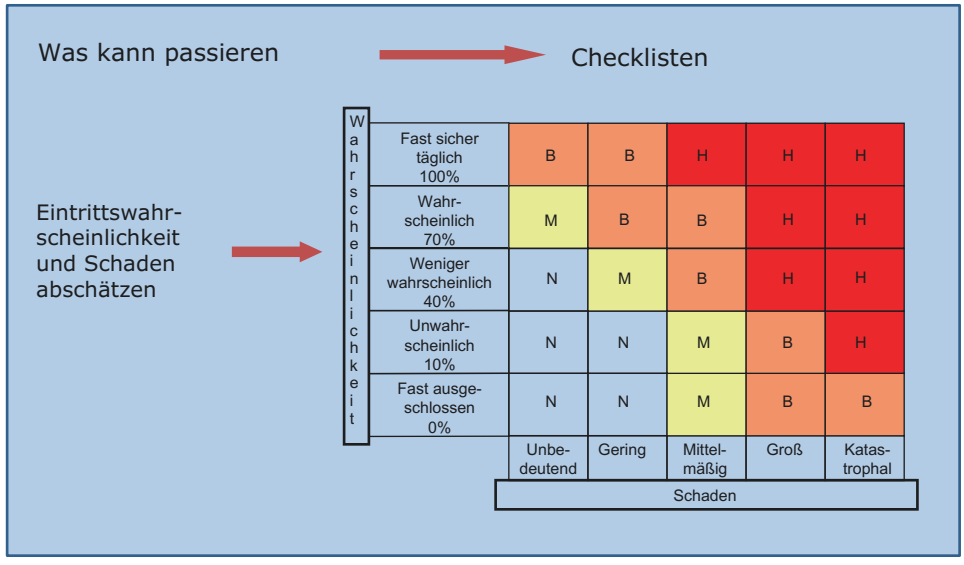


Abb. 7.4 Risikobewertung

Prioritätenliste erzeugt werden, diese ist Grundlage für die Intensität der vorbereitenden Arbeiten sowie der zielgerichteten Inspektion laufender Arbeiten.

Das größte Risiko für den Investor ist die Beherrschung der Schnittstellen zu den anderen Systemkomponenten. Erst nach der ersten Bohrung steht fest, ob sich das Projekt wie geplant realisieren lässt. Eine Erdwärmeanlage versorgt eine Wärmepumpe mit Energie, die dem Erdreich entzogen wird. Die Wärmepumpe beheizt (oder kühlt) das Gebäude und liefert warmes Wasser. Den Endverbraucher interessieren nur die Temperatur im Raum und die des Duschwassers sowie die hierzu entstehenden Kosten.

Aus der Praxis sind beispielsweise folgende Fälle bekannt, die die Schnittstellenproblematik verdeutlichen:

- Nachträgliche Planungsänderung: Wärmepumpe soll zusätzlich warmes Wasser zum Duschen zur Verfügung stellen, Erdwärmeanlage wurde nicht angepasst; Folgen: deutlich höherer Stromverbrauch, Ausfall der Anlage durch Vereisung wahrscheinlich.
- Falsche Vorgaben für den Erdwärmeanlagenbauer durch unzureichende geologische Erkundung oder falsche Auslegung der Wärmepumpe; Folgen: deutlich höherer Stromverbrauch, Ausfall der Anlage durch Vereisung.
- Fehlende Erfahrung der Planer mit Wärmepumpen und Erdwärmeanlagen: Schnittstellenprobleme, entweder zu hohe Investitionskosten oder zu hohe Betriebskosten möglich.
- Zu wenige Bohrmeter bzw. Erdsondenanlage zu klein; deutlich höherer Stromverbrauch, Ausfall der Anlage durch Vereisung wahrscheinlich.
- Unzureichende Zementation der Erdsonden; Folgen: hydraulischer Kurzschluss von wasserführenden Horizonten (dadurch Bodensetzungen oder Verunreinigung von sauberem Grundwasser), schlechterer Wärmeübergang führt zu deutlich höherem Stromverbrauch oder sogar Ausfall der Anlage durch Vereisung.
- Kein hydraulischer Abgleich bei mehreren Erdwärmesonden: Einzelne Erdwärmesonden werden stärker belastet; Folge: deutlich höherer Stromverbrauch, Ausfall der Anlage durch Vereisung wahrscheinlich.
- Brunnen nicht tief genug: Belastetes Grundwasser führt zu Ablagerungen auf den Wärmetauschern, dadurch schlechterer Wärmeübergang und höherer Stromverbrauch; schwankende Grundwassertemperaturen führen im Winter zu höherem Stromverbrauch.
- Brunnen falsch angeordnet; thermischer Kurzschluss, dadurch höherer Stromverbrauch und Ausfall der Anlage durch Vereisung möglich.
- Artesische Verhältnisse werden nicht beachtet: Grundwasser tritt aus Bohrung unkontrolliert aus, umfangreiche Sanierungsmaßnahmen erforderlich, Fortsetzung gefährdet.

Unter Querschnittsrisiken (Tab. 7.1) versteht man übergeordnete Risiken, die in allen Projektphasen auftreten können und die in alle Projektbereiche hineinreichen. In die Kategorie Querschnittsrisiken fallen organisatorische Aspekte sowie politische, rechtliche oder soziale Gesichtspunkte.

Tab. 7.1 Querschnittsrisiken

a) Interne Risiken

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risikowert
Rechtsrisiko	falsche Projektorganisation			
Entscheidungsrisiken	unklare Ablauforganisation			
Informationsrisiken	zu lange Entscheidungswege			
Kostenrisiko	unzureichende Projektplanung			
Genehmigungsrisiko	ineffiziente Prozessabläufe			
Beschaffungsrisiko	ineffiziente Informations- und Kommunikationswege			
	Einzelpläne sind nicht koordiniert			
	keine definierte Risikopolitik			
	Voruntersuchungen sind negativ			
	politische, wirtschaftliche und steuerrechtliche Änderungen			
	Auflagen durch die Genehmigungsbehörden			
	häufige Änderungen von Gesetzen und Verordnungen u. ä.			
	Verschärfung der Umweltbestimmungen			
	neue politische Programme			
	Die aktuellen politischen Entwicklungen werden nicht genügend beachtet			
	Der Einfluss regionaler politischer Kräfte wird unterschätzt			
	Unterschiedliche Auflagen der Kommunen sind nicht bekannt			
	lange Genehmigungsdauern			
	Verzögerung durch Bürgerinitiativen			

Risikowert = Eintrittswahrscheinlichkeit X Schaden

Tab. 7.1 (Fortsetzung)

b) EDV				
Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
Kostenrisiko	Viren, Beschädigung der Systeme			
Wettbewerbsrisiko	Manipulation von Programmen			
Qualitätsrisiko	Manipulation der Sicherungssysteme			
	unklare Schnittstellen zwischen den Systemen			
	Fehlbedienung durch ungeschulte Mitarbeiter			
	veraltete Konfigurationen			
	nicht bedarfsgerechte Systeme			
	keine Managementinformationssysteme			
	ineffiziente Informations- und Kommunikationswege			
	Ausfall von Informations- und Kommunikationswegen			
	zu viele Insellösungen			
	Mitarbeitern ist notwendiges Zugriffsrecht verweigert			
	unvollständige, nicht aktuelle Dokumentation der Betriebs- und Anwendungssysteme			
	Datenverlust durch ungenügendes Back up			
	Mitarbeiter installieren eigene Programme, Lizenzen, Datenkorruption			
	Aufbewahrungspflichten werden nicht eingehalten			
	Abhängigkeiten von externen Beratern bzw. Hard- und Software-Produzenten			

Tab. 7.1 (Fortsetzung)

c) Recht				
Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
Fristenrisiko	Verträge sind nicht bekannt			
Bußen	Es existiert kein Vertragsmanagement			
Haftungsrisiko	Inhalte von Verträgen sind nicht bekannt			
strafrechtliche Verfolgung	Vertragsverstöße werden nicht nachgehalten bzw. dokumentiert			
	Relevante Bestimmungen werden nicht an die Entscheidungsträger kommuniziert			
	Umweltrechtliche Auflagen sind nicht bekannt			
	Inhalte von Genehmigungen sind nicht bekannt			
	Anlagen werden nicht genehmigungskonform betrieben			
	Anzeigepflichten sind nicht bekannt und werden nicht beachtet			
	Arbeitsrechtliche Bestimmungen sind nicht bekannt und werden nicht beachtet: z. B: Scheinselbständigkeit, Arbeitnehmerüberlassung			

Das Effektivitätsrisiko (Tab. 7.2) wird durch folgende Elemente bestimmt:
unzureichende Beschäftigung mit vorhandenen Untergrunduntersuchungen (Schichtenaufbau, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Schichten),

- reduzierte thermische Ergiebigkeit (Schüttung/Absenkung, Temperatur),
- geringe Injektivität,
- veränderte/verschlechterte chemische Zusammensetzung,
- unerwünschte oder störende Fündigkeit weiterer Stoffe (Abfälle, Kohlenwasserstoffe, Radioaktivität),
- falsche Heizlastberechnung,
- keine oder falsche Berechnung für einen hydraulischen Abgleich,
- falsche Auslegung der Wärmepumpe.

Wie hoch ist nun die Wahrscheinlichkeit, dass eine Oberflächennahe Geothermieanlage nicht effektiv arbeitet? Dies ist bei sorgfältiger Planung und gewissenhafter Berechnung aller Einzelkomponenten nahezu auszuschließen. Die häufigsten Fehler sind die fehlenden oder unzureichenden Berechnungen für den hydraulischen Abgleich der Heizungsanlage und der Erdwärmeanlage.

Die Finanzrisiken (Tab. 7.3) betreffen sowohl die interne als auch die externe Finanzierung des Projektes. Spätestens mit der Einrichtung der Baustelle und damit dem Beginn der Bauphase muss die gesamte Finanzierung einschließlich eines Risikozuschlages für unvorhergesehene Aufwendungen gesichert sein.

Die Risiken beim Bohren (Tab. 7.4) haben geologische, technische und menschliche Ursachen. Es darf eben auf keinen Fall ein Hammer ins Bohrloch fallen (ist passiert). Einsparungen im Bohrbudget können unabsehbare Folgen haben: Lückenhafte Exploration der Lagerstätte oder unzureichende Bevorratung des richtigen Verfüllbaustoffs, von Werkzeugen und Bohrgestänge können zu ungeplanter Mehrarbeit und Stillstandzeiten führen. Ein Tag Bohrbetrieb kostet ca. 1500–2000 €. Die wirkungsvollste Einsparung ist ein störungsfreier und zügiger Ablauf der Bohrung.

Der exakte Aufbau des Untergrundes ist trotz aller modernen Untersuchungsmethoden nach der Bohrung bekannt, sodass gegebenenfalls nachgesteuert werden muss (d. h. Überprüfung der Planung). Es gilt die alte bergmännische Weisheit: Hinter der „Hacke“ bleibt es dunkel. Nach bisherigen Erfahrungen bringen ca. 30 % der Bohrungen nicht das erwartete Ergebnis. Bei nichtfündig ist zu unterscheiden zwischen Totalverlust der Bohrung und geringerer Energieausbeute.

Es wird empfohlen, bereits im Frühstadium des Projektes die Bandbreite der möglichen Fündigkeitsparameter abzuschätzen. In einer Szenarienanalyse sollte geprüft werden, ob eine Nutzung mit einem anderen technischen Konzept auch dann noch wirtschaftlich möglich ist, wenn die erwartete Fündigkeit nicht angetroffen wird. Unter bestimmten regionalen Voraussetzungen ist das Fündigkeitsrisiko versicherbar. Zu prüfen ist im Einzelfall, ob die Mittel für die Versicherung besser für notwendig werdende Korrekturmaßnahmen an der Bohrung vorgesehen werden sollten.

Tab. 7.2 Fündigkeitsrisiken

a) Leistungsfähigkeit der oberflächennahen Geothermieanlage (Brunnen)		
Folgen	Ursachen	
Temperaturrisiko	Geologische Voruntersuchungen sind falsch, negativ oder nicht gemacht	
Schüttungsrisiko	Bohrung absolut nicht fündig	
	Schüttung 10 % geringer als geplant bei geplanter Absenkung	**Neues technisches Konzept, neue Wirtschaftlichkeitsberechnung**
	Schüttung 20 % geringer als geplant bei geplanter Absenkung	
	Absenkung 10 % höher als geplant	
	Absenkung 20 % höher als geplant	
	Temperatur 10 % geringer als geplant	
	Temperatur 20 % geringer als geplant	
	Injektivität der Schluckbohrung zu gering	
	unerwünschte Sekundärfündigkeit	
	ungünstiger Chemismus	

Tab. 7.2 (Fortsetzung)

b) Leistungsfähigkeit der oberflächennahen Geothermieanlage (Sonden)		
Folgen	Ursache	
Unsachgemäße Ausführung	Geologische Voruntersuchungen sind falsch oder negativ bzw. wurden nicht gemacht	
Unklare Schnittstellen	Bohrung nicht tief genug gebohrt	
	Abstände der Bohrungen und zur Grundstücksgrenze zu gering	
	Erdwärmesonden falsch dimensioniert	
	Zementation unzureichend (Qualität und Quantität des Baustoffes)	
	Wärmeträgerflüssigkeit falschausgelegt	
	unerwünschte Sekundärfündigkeit; artesische Verhältnisse	
	ungünstiger Chemismus	
	Fehlender hydraulischer Abgleich	
	Fehlende, weil eingesparte Armaturen wie Soleverteiler	
	Fehlende Werkszeugnisse	
	Verzicht auf Druckprobe bei Abnahme	

Tab. 7.3 Finanzrisiken

a) Liquiditätsrisiko

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
Zahlungsausfälle	Nichtverfügbarkeit liquider Mittel			
Erhöhte Aufwendungen	schlechte Durchschnittsrentabilität			
Bußgelder	Ausfall von Unterlieferanten			
sinkende Erträge	Forderungsausfälle			
	zu lange Zahlungsziele			
	Die Umsätze/ Gewinne gehen zurück			
	Verbindlichkeiten sind höher als erwartet			
	Folgekosten von Investitionen sind höher als erwartet			
	unerwartete Nachforderungen			
	Falsche Auskunft durch Auskunfteien / angegebene Referenzen			
	Strafen für unerlaubte Handlungen			
	fällige Bürgschaften			
	langfristige Verträge, die mittlerweile an Bedeutung verloren haben, können nicht gekündigt werden			
	es gibt nicht absehbare Gewährleistungsansprüche durch Garantien			
	Öffentliche Fördermittel können entzogen werden			
	Haftungsgefahren (Faktischer Konzern, Gewährleistungen, Darlehen mit Rangrücktritt an kritische Beteiligungen			
	sinkende Erträge durch Änderung von gesetzlichen Bestimmung und Förderungen			
	Häufige Planungsänderungen ohne Berücksichtigung der Kostenplanung			
	Fehlende laufende Überwachung des Baufortschrittes unter besonderer Berücksichtigung der Kostentwicklung und des verfügbaten Budgets			

Tab. 7.3 (Fortsetzung)

a) Liquiditätsrisiko

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
	ungeplante Aufnahme von Krediten			
Falsche Fristen	zeitliche Inkongruenz verschiedener Positionen			
Ungünstige Zinsspannen	schlechte Durchschnittsrentabilität			
Ungünstige Zinsstruktur	zu hohe Zinskosten bei Refinanzierung			
	Auswirkung fallender bzw. steigender Zinsen auf den Bestand			
	Veränderungen der Zinsstruktur			
	Variabel verzinsliche Bestandspositionen			
	unerwartete Zinsänderungen			
	Zu hohe Bereitstellungsprovision			

Tab. 7.4 Risiken beim Bohren

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
Planungsrisiken	unzureichende Exploration			
Technische Risiken	unerwartete Störungszonen			
	Falsche Absetzteufe			
Geologisch-technische Risiken	Ausfall von Spülpumpen			
Geologische Risiken	Spülverlust			
Geotektonische Risiken	Gestängebruch			
	Meißelverlust			
	unzureichende Bohrlochstabilität			
	Änderung des Chemismus			
	unerwünschte Sekundärfündigkeit			
	nicht angepasste Verrohrung			
	Bedienungsfehler			
	nicht genügend Gestänge, Spülungskomponenten u. a.			
	unzureichende Verrohrungsauslegung			
	ins Bohrloch gefallene Gegenstände			

Tab. 7.4 (Fortsetzung)

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
	unerwartete Hochdruckzonen			
	Überhitzung des Meißels			
	durch Bohren ausgelöste seismische Ereignisse			
	Gestänge: Materialermüdung			
	Gesamte Bohranlage: Überbeanspruchung z. B. bei Festsitzen des Gestänges			
	falscher Meißel			
	Nachfall im unverrohrten Bohrloch			
	Mangelhafte Zementation			
	schlechte Spülungspflege			
	Versagen von Bauteilen beim Einbringen ins Bohrloch			

Risiken beim Bau (Tab. 7.5) betreffen in erster Linie Planungsfehler, Verhandlungs- bzw. Vertragslücken, unklare Verantwortungs- und Haftungsfragen sowie Zeitabläufe, z. B. durch verspätete Anlieferung wichtiger Anlagenkomponenten, unzureichende Baustellenkoordination, fehlende Bauüberwachung oder Abnahme trotz (verdeckter) Mängel. Mangelhafte Arbeitssicherheit, fehlender Gesundheitsschutz, schlechte Qualität oder Beschädigung der Umwelt führen zu Verzögerungen im Bau und treiben die Kosten – neben den ethischen Fragen – nach oben. Sie werden verursacht durch organisatorische, technische oder menschliche Faktoren.

Wirtschaftliche Risiken (Tab. 7.6) sind höherer Stromverbrauch oder möglicher Produktionsausfall, vor allem durch die Energiewende verursachte höhere Stromkosten und damit Gefährdung des Kostenvorteils gegenüber Gas.

7.5 Maßnahmen zur Verringerung der Risiko-Eintrittswahrscheinlickeit und zur Schadensminimierung

Der letzte und wichtigste Schritt eines wirkungsvollen Risikomanagements ist die Erarbeitung geeigneter Gegenmaßnahmen (Abb. 7.5). Wie lässt sich das Risiko gänzlich vermeiden, kann man es überwälzen, z. B. auf Versicherungen oder auf den Generalunternehmer? Gibt es Indikatoren, die früh auftreten und die auf ein drohendes Risiko hinweisen, wie z. B. verringerte Leistung der Wärmetauscher oder Temperaturanstiege an elektrischen Aggregaten? Und schließlich, wer trägt wofür die Verantwortung?

Die wichtigste Maßnahme zur Risikovermeidung ist eine sorgfältige Projektvorbereitung unter Nutzung aller zur Verfügung stehenden Daten sowie Test- und Auswerteverfahren. Außerdem empfiehlt es sich, die bekannten Institute und Fachleute rechtzeitig einzuschalten, allgemeingültige Aussagen sind in der Geothermie nicht möglich. Geologie und Grundwasser, aber auch fehlerfreie thermodynamische Berechnungen, nach denen die bestimmenden Faktoren Wärmepumpenleistung, Heizlast des Gebäudes und Wärmeausbeute der Bohrungen optimal korrelieren, sind die erfolgsbestimmenden Faktoren. Sparen an der Vorbereitung ist Sparen am falschen Platze. Fachleute, geophysikalische und hydrochemische Untersuchungen sind allemal billiger als eine Bohrung. Eine unzureichende Vorplanung oder ein unterlassenes oder zu kleines Untersuchungsprogramm führt in der Regel zu erhöhten Bohr- oder Betriebskosten.

Außerdem ist es für den Bauherren zwingend erforderlich, den Bau fachkundig zu überwachen bzw. überwachen zu lassen und auf eine Abnahme einschließlich Nachweis der geforderten Bohrmeter bzw. der eingebauten Sondenlänge, Nachweis der ordnungsgemäß eingebrachten Zementation, Druckproben, Werkszeugnissen, Fotodokumentationen, Bohrprotokollen usw. zu bestehen.

Grundsätzlich verläuft ein Geothermieprojekt in sieben Phasen:

Tab. 7.5 Risiken beim Bau der Anlage

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
Umweltrisiko	ungeeignete Projektorganisation, fehlende Projektsteuerung			
Zeitrisiko	ungeeignete Verträge			
Qualitätsrisiko	unklare Haftungsregelungen			
Kostenrisiko	ungenügendes Projektcontrolling			
Arbeitssicherheitsrisiko	falsche Zeitplanung für Beschaffung			
	Einfluss durch Witterungseinflüsse			
	unvollständige Planung			
	unzureichende Einweisung in alle relevanten Bestimmungen			
	Wärmetauscher verdrecken			
	Baugrund nicht ausreichend erkundet (Turbinenaufstellung)			
	ausführende Firma ungeeignet (Vergabe nur nach Angebotspreis)			
	Schnittstellen zu anderen Gewerken werden nicht rechtzeitig und nicht sauber geplant und überwacht			
	Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz werden nicht gelebt			

Tab. 7.6 Risiken bei Betrieb

a) Produktion

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
Produktionsausfall	Anlagen veraltet, Investitionsstau			
Sicherheitsrisiko	veraltete Technologie			
Qualitätsrisiko	nicht optimale Prozessabläufe			
Kostenrisiko	Logistik unzureichend			
Umweltrisiko	Zustand der Anlagen schlecht			
	technische Dokumentation unvollständig			
	Materialfluss aus dem Ersatzteillager stockt			
	häufige Bedienungsfehler			
	häufige Betriebsstörungen			
	häufige Havarien (Bruch/Feuer/Explosionsgefahr/. . .)			
	keine redundanten Überwachungseinrichtungen			
	Montagewerkzeuge und Hilfsmittel sind nicht verfügbar			
	Verschleißteile werden nicht entsprechend den Vorschriften ausgetauscht			
	Transportmittel sind nicht genügend vorhanden			
	Wartungsstellen sind nicht gut zugängig			
	Störungen an den Pumpen			
	Lieferanten fallen durch Konkurs aus			
	Aufräumarbeiten werden vernachlässigt			
	Sicherheitsvorschriften werden nicht beachtet			

Tab. 7.6 (Fortsetzung)

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
	Sicherheitsvorschriften sind nicht bekannt			
	Sicherheitsausrüstung wird nicht gestellt			
	Entzug der Betriebsgenehmigung nach seismischen Ereignissen			
	keine Notstromversorgung			
	Ersatzteile nicht verfügbar			
	fehlende Zutrittsregelung			
	keine geregelte Abfallentsorgung			
b)Prozessleittechnik/EDV				
Produktionsausfall	Viren, Beschädigung der Systeme			
Sicherheitsrisiko	Manipulation von Programmen			
Qualitätsrisiko	Manipulation der Sicherungssysteme			
Kostenrisiko	Unklare Schnittstellen zwischen den Systemen			
Umweltrisiko	Fehlbedienung durch ungeschulte Mitarbeiter			
	Veraltete Konfigurationen			
	Nicht bedarfsgerechte Systeme			
	Keine Managementinformationssysteme			
	Ineffiziente Informations- und Kommunikationswege			
	Ausfall von Informations- und Kommunikationswegen			
	Zu viele Insellösungen			
	Mitarbeitern ist notwendiges Zugriffsrecht verweigert			

Tab. 7.6 (Fortsetzung)

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
	Unvollständige, nicht aktuelle Dokumentation der Betriebs- und Anwendungssysteme			
	Abhängigkeiten von externen Beratern bzw. Hard- und Software-Produzenten			
	Datenverlust durch ungenügendes Back up			
	Mitarbeiter installieren eigene Programme, Lizenzen, Datenkorruption			
	Aufbewahrungspflichten werden nicht eingehalten			
	Es werden falsche Messwerte errechnet			
	Manipulation von Programmen			
	Manipulation der Sicherungssysteme			
	Mischungsverhältnisse werden nicht richtig bestimmt			
	Die Entsorgung alter Geräte ist nicht geregelt			
	keine unterbrechungsfreie Stromversorgung			
c) Personal				
Kostenrisiko	Vermögensverluste, Diebstahl, Untreue			
Knowhow-Risiko	Streik			
Engpassrisiko	Fluktuation, Wissensverlust			
Motivationsrisiko	Austritte von Leistungsträgern			
Leistungsrisiko	Falsch qualifizierte Mitarbeiter			
	Kostspielige Neuanwerbung von Nachfolgern ausgetretener Leistungsträger			
Arbeitssicherheitsrisiko	Zu hohe Überstundenzahl			
Qualitätsrisiko	Zu hohe Fehlzeiten			

Tab. 7.6 (Fortsetzung)

Folgen	Ursachen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schaden	Risiko-wert
	ungünstige Lohnstruktur			
	Zuviel Arbeit für zu wenige Mitarbeiter			
	Unzureichende Sicherheitseinweisung			
	Sicherheitsvorschriften werden nicht beachtet			
	Sicherheitsvorschriften sind nicht bekannt			
	Sicherheitsausrüstung wird nicht gestellt			
	Die Unternehmung bietet jungen Arbeitnehmern nicht genügend Perspektiven			
	Es gibt keine Weiterbildungsprogramme			
	Angst vor Repressalien, keine Fehlerkultur			
	Spionage			
	Mangelhafte Auf-und Ablauforganisation			
	Keine Führungsstruktur			
	unzureichende Arbeitssicherheit			
	Mangelhafter Gesundheitsschutz			
	kein Qualitätssicherungssystem			
	Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz werden nicht gelebt			
d) Outsourcing				
Produktionsausfall	mangelnde Ordnungsmäßigkeit der Arbeiten			
Umweltrisiko	mangelnde Kontrollmöglichkeiten			
Sicherheitsrisiko	Know How Verlust			
Qualitätsrisiko	Abhängigkeit durch Wissensmonopole			
Kostenrisiko	rechtliche Ausgestaltung der Verträge			

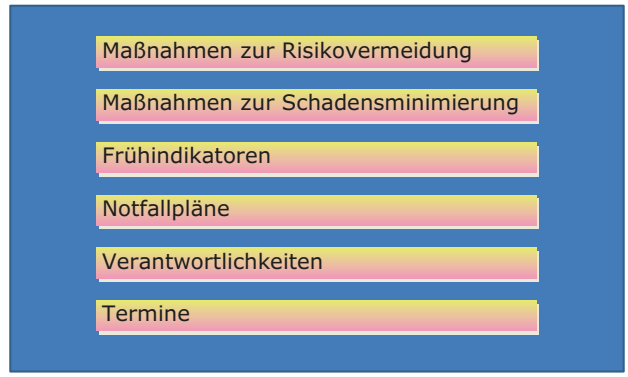


Abb. 7.5 Maßnahmen zur Risikovermeidung und Schadensminimierung

- Voruntersuchung und Anlagenplanung,
- Einrichtung Bohrplatz,
- erste Bohrung,
- zweite Bohrung usw.,
- Einbau Soleverteiler,
- Anschluss an Wärmepumpe,
- Betrieb.

Die Kosten für die Voruntersuchung werden in Anlehnung an die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) auf ca. 25 % der gesamten Projektsumme für die geothermische Anlage geschätzt.

Naturgemäß ist das Risiko für den Voruntersuchungsaufwand hoch, kann das Ergebnis doch den Abbruch des Projektes zur Folge haben. Auf der anderen Seite werden belastbare Aussagen über zu erwartende Schüttung und Temperatur als die entscheidenden Kenngrößen für die thermische Leistung und damit für den späteren Ertrag benötigt, ehe eine endgültige Investitionsentscheidung für eine geothermische Anlage erfolgen kann. Im Vergleich mit den möglichen Risiken und den dadurch möglichen Kosten handelt es sich aber um „Peanuts" – den Ärger und die Aufregung für den Bauherrn noch nicht berücksichtigt.

Das Risiko für die erste Bohrung kann bei sorgfältiger Vorbereitung vermindert sein, es nimmt dann für die 2. Bohrung und folgende stark ab.

Geologie – Projektvorbereitung:

- Sichtung und Auswertung aller vorhandenen Daten wie z. B. Leitfäden zur Erdwärmenutzung der Bundesländer (z. B. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2012), Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2012), BWP (2012), Ministerium für Umwelt Saarland (2008)) oder der Geothermischen Vereinigung e.V. (GtV Bundesverband Geothermie (2013)), Informationen der geologischen Landesämter, Wasserämter und Bergämter über benachbarte Erdwärmeanlagen,

- Das *Geothermische Informationssystem*, ein digitaler Geothermie-Atlas für Deutschland (GeotIS) ist seit Ende Mai 2009 unter der Adresse www.geotis.de im Internet verfügbar. Das *Geothermische Informationssystem* enthält eine Vielzahl von datenbankgestützen Informationen: z. B. Art des Grundwasserleiters, seine Tiefenstruktur und Temperaturverteilung. Es werden kostenlos Informationen über geologische Strukturen und physikalische Parameter bereitgestellt, die für eine Nutzung des oberflächennahen Untergrundes relevant sind. Ergänzung der Datenlage für die Vorerkundung durch kostengünstige Verfahren: Gravimetrie, Magnetik, Geoelektrik und ggf. Ankauf vorhandener Seismiken.
- Bei positiven Ergebnissen der Vorerkundung ggf. Ergänzung durch weitere geophysikalische Untersuchungen wie z. B. Potentialverfahren. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass es bei der Auswertung der geophysikalischen Messungen sehr auf die Erfahrung des interpretierenden Geowissenschaftlers ankommt, weil nicht immer eindeutige Ergebnisse aus den Rechenprogrammen abgeleitet werden können. Trotz modernster Rechentechnik müssen Unstetigkeitsstellen überprüft und miteinander verknüpft werden, um aussagekräftig geologische Strukturen darzustellen.
- Beschaffung ausreichender Rohrlängen für den evtl. notwendigen Ausgleich unscharfer Vorhersagen.
- Abschluss einer Bauleistungsversicherung für größere Anlagen und Prüfung, ob eine Überwälzung des Fündigkeitsrisikos auf eine Versicherung möglich ist. Die Prämien betragen inzwischen ca. 25 % der Versicherungssumme. Es ist zu prüfen, ob dieser Betrag besser als Reservebudget für Zusatzmaßnahmen z. B. für zusätzliche Stimulation der Lagerstätte vorgehalten wird.

Genehmigungsverfahren:

- Untere Wasserbehörde, ggf. zusätzlich Bergamt.
- Realistische Einschätzung der Dauer von Genehmigungsverfahren und der Zeitverzögerung durch mögliche Klagen.
- Frühzeitige Information und Einbeziehung der Träger öffentlicher Belange (falls erforderlich).
- Rechtzeitige und offene Information der Nachbarschaft.
- Ständiger Kontakt zu den Behörden.

Bohrungen und Bau der Anlage:

- Ausreichende Erkundung des gesamten Schichtaufbaus einschließlich des Baugrundes zur Berücksichtigung von thermodynamischen Kennzahlen, Standfestigkeiten, Schichtgrenzen, Absetzteufen, Hochdruckzonen, Kohlenwasserstoff führender Schichten, Schwächezonen.
- Ausreichende Bevorratung von Rohren, Chemikalien, Werkzeugen, Zement.

- Einsatz zuverlässiger Spülpumpen, höchstmögliche Bohrlochsicherheit durch funktionierenden Spülungskreislauf.
- Soleverteiler mit der Möglichkeit des hydraulischen Abgleichs der Erdwärmesonden.
- Verhinderung von ungeplanten Betriebsunterbrechungen durch vertrauensbildende Maßnahmen mit der angrenzenden Nachbarschaft, durch regelmäßige Tage der offenen Tür, seismische Überwachung des Untergrundes auf Erschütterungen, ständige Lärmmessung mit Ampelsystem.
- Arbeitssicherheit, Umweltschutz und Gesundheitsschutz eindeutig einfordern und Verstöße unnachsichtig ahnden.
- Überwälzung des Risikos (Haftung) gegen Preisaufschlag auf den Generalunternehmer (führt die Arbeiten teilweise selber aus) bzw. Generalübernehmer (nur Projektsteuerung, vergibt alle Arbeiten an Subunternehmer) durch entsprechende Vertragsgestaltung.
- Auswahl nachweislich geeigneter Firmen (z. B. Zertifizierung nach DVGW 120 W, zusätzlich auch Meisterhaft-Siegel der Deutschen Bauwirtschaft, Managementsysteme nach DIN EN ISO 9000 oder 14000, OHSAS 18001).
- Klare Verantwortungsregelungen.
- Nachhaltiges Projektcontrolling von Zeit und Kosten, rechtzeitige Einleitung von Maßnahmen zur Behebung von Engpässen.
- Detaillierte Abnahme der erbrachten Leistungen einschließlich Testlauf durch den Bauherren oder seinen fachkundigen Berater.

Betrieb der Anlage:

- Umfassende Dokumentation während der Bohr- und Bauphase und darauf aufbauend ausreichende Verfahrens- und Arbeitsanweisungen.
- Ständige Überwachung der Wasserchemie zur rechtzeitigen Beseitigung von Verkrustungen und Ausfällungen sowie des Systemdrucks, um Leckagen zu erkennen.
- Sorgsame Instandhaltung der Pumpen, da sie anfällig sind gegen unsachgemäße Behandlung. Möglichst konstanter Betrieb, häufiges Anfahren und Abschalten dringend vermeiden.
- Notstromversorgung für ein geregeltes Abfahren des Betriebes für größere Anlagen.
- Sorgfältige Isolierung der Kälteleitungen.
- Abgestufter Reaktionsplan zur schnellen Behebung von Störungen.
- Trotz sorgfältiger Planung und Vorbereitung bleibt ein Restrisiko.

Die häufigsten Fehler bei Projektplanung:

- Die Investition wird „schön gerechnet“. Es wird mit zu hohen Ertragswerten oder zu geringen Investitionskosten gerechnet. Es wird davor gewarnt, die Investitionssumme zulasten der Betriebskosten herunterzurechnen. „Hinter der Hacke“ ist es auch bei Geothermiebohrungen trotz moderner Explorationsverfahren und guter Datenlage dunkel.

- Keine sorgfältigen thermodynamischen Berechnungen und Abstimmung aller Einzelkomponenten. Trotz guter Projektvorbereitung treten bei der Durchführung der Bohrungen und beim Bau der Anlage immer unvorhergesehene Verzögerungen auf. Dies sind z. B. Verlust von Bohrwerkzeugen, Verlust von Spülungen, Lieferverzögerung von wichtigen Komponenten der Anlage. Jede Zeitverzögerung reduziert bei Tageskosten von ca. 1500–2000 € für den Bohrbetrieb auch die Erträge und erhöht den Zinsaufwand für die Investition.
- Unzweckmäßige Projektorganisation, fehlende Bauüberwachung, unklare Verantwortlichkeiten, unklare Schnittstellen zwischen den Gewerken; Haftung: Bauherr kann bergmännischer Unternehmer nach § 58 des Bundesberggesetzes (BBergG) sein.
- Vergabe der Einzelgewerke unter und über Tage nur nach Preis, besser ist ein Punktekatalog, der die projektspezifischen Besonderheiten gewichtet widerspiegelt. Ein solcher Punktekatalog kann z. B. folgende Zuschlagskriterien berücksichtigen:
  - Zertifikate des anbietenden Unternehmens,
  - Qualifizierung der für die Ausführung vorgesehenen Mitarbeiter,
  - Vorstellung des Bieters zur Organisation und Ablauf sowie Vorgehensweise bei Projektbearbeitung und Abwicklung,
  - Konzeption zur Erfüllung der Leistungsinhalte,
  - Umgang mit veränderten Rahmenbedingungen,
  - Maßnahmen zur Kostensicherung,
  - Maßnahmen zur Termineinhaltung.

7.6 Schlussbetrachtung

Trotz sorgfältiger Planung unter Einbeziehung eines lückenlosen Risikomanagements bleibt ein Restrisiko, das den Investor einer einzigen Geothermieanlage stärker trifft als den Investor in größere Anlagen. Alles in allem ist es sinnvoll, trotz guter planerischer Vorbereitung bei der Investitionsrechnung eine ausreichende Reserve von mind. 20 % einzuplanen. Es ist fahrlässig, bei knappem Budget entweder auf eine entsprechende Vorbereitung oder eine Reserve zu verzichten. Bei deutschen und schweizerischen Bahnprojekten werden z. B. Zuschläge je nach Projektreife und Planungstiefe zwischen 15 % und 30 % empfohlen. Eine von einer renommierten Bohrgesellschaft durchgeführte Monte-Carlo-Simulation der Bohrkosten und -zeiten auf der Basis mehrerer hundert weltweit durchgeführter Bohrungen bestätigt diese Größenordnung.

Literatur

Brochmann, M.: Qualitätsmanagement und Risikomanagement; www.qrm-brochmann.de. (2017) Zugegriffen: 02. Febr. 2017

Buja, H. O.: Handbuch der Bohrtechnik in 2 Bänden. 2. Aufl. Books on Demand, Norderstedt (2014)
BWP: Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern; http://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwivt/Themen/Energie_und_Rohstoffe/Dokumente_und_Cover/Leitfaden_Erdwaermesonden.pdf (2012). Zugegriffen: 02. Febr. 2017
Ernstson, K.: Geologische und geophysische Untersuchungen, (dieser Band)
GtV Bundesverband Geothermie: Erdwärme – Tips für Hausbesitzer, http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/GtV-BV_Broschuere_Tipps_Hausbesitzer_web.pdf (2013). Zugegriffen: 02. Febr. 2017
Hähnlein, S.: Oberflächennahe Geothermie – Nachhaltigkeit und rechtliche Situation; Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften der Eberhard Karls Universität Tübingen: https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/50012/pdf/Dissertation_Haehnlein_2014_01_10_UniBibVersion.pdf?sequence=1. (2013). Zugegriffen: 02. Febr.2017
Jacobi, H.: Risikomanagement für Ingenieure, Vorlesung, RWTH Aachen WS 2010
Landesamt für Bergbau: Energie und Geologie: Leitfaden Erdwärmenutzung in Niedersachsen, GeoBerichte 24 des Landesamtes für Bergbau. Energie und Geologie, Hannover (2012)
Marcus, B., Schneider, J. (Hrsg.): Erfolgsfaktoren für die Akzeptanz von Geothermieprojekte; in: http://www.pr-geothermie.de/sites/pr-geothermie.de/files/dokumente/pr-leitfadengeothermie-enerchange.pdf, Freiburg (2014). Zugegriffen: 02. Febr. 2017
Ministerium für Umwelt Saarland: Leitfaden Erdwärmenutzung, http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/wissenswelt/gesetze/Leitfaden/Saarland_Leitf_Erdwaerme.pdf (2008). Zugegriffen: 02. Febr. 2017
Neu, T.: Anforderungen an moderne Bohranlagen für oberflächennahe geothermische Bohrungen unter besonderer Berücksichtigung der jüngsten Marktentwicklung, Vortrag gehalten am 03.02.2007 in Clausthal – Zellerfeld im Rahmen des Bohr- und Sprengtechnischen Kolloquiums der TU Clausthal (2006d)
Neu, T.: Geothermie – eine noch unbekannte Chance zum Heizen und zur Warmwasserversorgung, Vortrag, gehalten zum Beispiel am 11.05.2006 in Dillingen und am 17.05.2006 in Trier im Rahmen vonWeiterbildungsveranstaltungen für Stiebel-Eltron-System-partnern und am 11.07.2006 in Mainz-Bodenheim vor südwestdeutschen Heizungsbauunternehmern
Neu, T., Wirtz M.: Erfahrungen aus der Sanierung oberflächennaher Geothermie-Anlagen in Heft 119 Wirkungsunsicherheit in der Geothermiebohrung", GDMB-Schriftenreihe Clausthal-Zellerfeld Mai 2009, Vortragsband des 11. Aachener Altlasten-und Bergschadenskundlichen Kolloquiums, Tagung des Instituts für Markscheidewesen, Bergschadenskunde und Geophysik im Bergbau der RWTH Aachen, des Lehr- und Forschungsgebietes Berg- und Umweltrecht der RWTH und der GDMB Gesellschaft der Bergleute und Metallurgen e.V., Clausthal-Zellerfeld
Neu, T.: Mit Erdwärme heizen?! Vortrag, gehalten am 01. und am 02.09.2006 in Saarbrücken im Rahmen des Immobilenforums des Rings Deutscher Makler (2006b)
Neu, T.: Praxis der Erdbohrungen, Vortrag, gehalten am 03.02.2006 in Bingen, anlässlich des Wärmepumpentages Rheinland-Pfalz - Oberflächennahe Geothermie in der Praxis; Veranstalter: Transferstelle der Fachhochschule Bingen; veröffentlicht (2006a)
Sarrazin, T.: Planungsmängel und Kostenexplosionen http://www.focus.de/politik/experten/sarrazin/kostenexplosionen-und-planungsmaengel-thilo-sarrazin-erklaert-die-staatlichenbaudesaster_id_3096741.html (2013). Zugegriffen: 02. Febr. 2017
Schulz, R.: Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland – Endbericht – Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover; https://www.geotis.de/homepage/Ergebnisse/GeotIS_Endbericht.pdf, Zugegriffen: 02. Febr. 2017
Wellmer, F.-W., Sames W.: Nur wer wagt, gewinnt – Risiken, Strategien, Aufwand, Erfolg. Glückauf 117 (1981) Nr. 10 http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/risikomanagement.html (1981). Zugegriffen: 02. Febr. 2017

Rechtliche und politische Rahmenbedingungen für oberflächennahe Geothermieprojekte

8

André Deinhardt und Gregor Dilger

Inhaltsverzeichnis

8.1 Rechtliche Bestimmungen . . . 325
8.1.1 Wasserrechtliche Genehmigung . . . 325
8.1.2 Bergrecht . . . 326
8.2 Technische Regelwerke . . . 326
8.2.1 DVGW W120-2 . . . 326
8.2.2 VDI 4640 . . . 326
8.3 Wärmemarkt als Rahmen . . . 327
8.3.1 Was bewegt den Markt? . . . 328
8.4 Förderung der Geothermie als Erneuerbare Energie . . . 328
8.4.1 Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz . . . 329
8.4.2 Marktanreizprogramm (MAP) . . . 329
8.4.3 Marktanreizprogramm (MAP) – KfW-Teil . . . 330
8.4.4 Energieeinsparverordnung (EnEV) . . . 330
8.4.5 Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) . . . 331
8.4.6 Anreizprogramm Energieeffizienz . . . 331
8.4.7 Erneuerbare-Energien-Richtlinie . . . 332
8.5 Wahrnehmung von Geothermie in der Öffentlichkeit . . . 332
Literatur . . . 333

André Deinhardt (✉) · Gregor Dilger
Bundesverband Geothermie e.V., Albrechtstraße 22, 10117 Berlin, Deutschland
e-mail: Presse@geothermie.de; gregor.dilger@geothermie.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_8

Zusammenfassung

Die politischen und rechtlichen sowie technischen Rahmenbedingungen für Oberflächennahe Geothermie unterliegen einer laufenden Überarbeitung. So plante die Bundesregierung u. a. 2016 die Novellierung der *Energieeinsparverordnung* EnEV und die Novellierung des EEWärmeG. Auch die Fördertatbestände im Marktanreizprogramm wurden und werden laufend angepasst, je nachdem wie der Markt sich in den jeweiligen politischen Zielkorridoren bewegt. Wechselwirkungen mit globalen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Entwicklung des Öl- und Gaspreises an den internationalen Märkten, entziehen sich allerdings weitgehend der Reichweite von solchen gesetzlichen Maßnahmen. Deshalb bilden Genehmigungsrecht, Ordnungsrecht, Anreizsysteme und Wahrnehmung der Oberflächennahe Geothermie in der Öffentlichkeit nur einen Teil der Einfluss- und Erfolgsgrößen. Grundsätzlich besitzt die Geothermie bei positiven Rahmenbedingungen das Potential, fossile Öl- und Gasheizungen in großem Umfang abzulösen.

Schlüsselwörter

Recht · Wärmemarkt · Regelwerke · Bergrecht · DVGW W120-2 · VDI 4640 · Marktanreizprogramm · EEWärmeG · EnEV · Gebäudeenergiegesetz (GEG) · Anreizprogramm Energieeffizienz

Die Umsetzung von oberflächennahen Geothermieanlagen ist gleichermaßen bestimmt durch technische Regeln wie auch rechtliche und politische Rahmenbedingungen. Der vorliegende Text soll einen kompakten Überblick über den Gesamtrahmen bieten, in dem Projekte der Oberflächennahen Geothermie umgesetzt werden.

Grundlegend sind zunächst die für die Genehmigung unerlässlichen Bestimmungen wie das Wasserrecht (Bund + Länder) und das Bergrecht (Bund). Eine Baugenehmigung (für die eigentliche Geothermieanlage) ist meist nicht notwendig, da bei der Oberflächennahen Geothermie in der Regel keine zusätzlichen Gebäude errichtet werden, die dies erfordern könnten. Auf untergesetzlicher Ebene haben technische Regeln wie das DVGW-Arbeitsblatt W120-2 bei der Zertifizierung von Bohrunternehmen und die VDI-Richtlinie 4640 bei der Planung von Erdwärmeanlagen an Bedeutung gewonnen.

Neben diesen verbindlichen Bestimmungen, die der Nutzung klare Regeln auferlegen, profitiert die Geothermie auch von Gesetzen und Förderprogrammen, die den Einsatz Erneuerbarer Energien anreizen sollen. Dazu gehören in erster Linie das *Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz* (EEWärmeG) mit dem Marktanreizprogramm (MAP) sowie die *Energieeinsparverordnung* (EnEV). Die Kombination aus ordnungsrechtlichen Regelungen und Anreizmechanismen verfolgt das politische Ziel, durch Effizienzmaßnahmen und die verstärkte Nutzung von Erneuerbaren Energien im Wärme- und Kältemarkt den CO_2-Ausstoß zu reduzieren.

8.1 Rechtliche Bestimmungen

8.1.1 Wasserrechtliche Genehmigung

Das Grundwasser ist in Deutschland ein hohes Schutzgut. Die Nutzung unterliegt daher strengen Regeln. In welchem Rahmen sie dennoch gestattet ist, regelt das *Wasserhaushaltsgesetz*. Als „Grundwasserbenutzung" im Sinne des WHG gilt nicht nur die direkte Nutzung des Grundwassers als Wärmequelle. Auch die Erdwärmenutzung mit geschlossenen Systemen (z. B. Sonde) wird in diesem Sinne verstanden und erfordert in den meisten Fällen eine wasserrechtliche Genehmigung.

Der Antrag auf Erlaubnis zur Gewässerbenutzung erfolgt auf Landkreisebene bei der unteren Wasserbehörde (bspw. gemäß § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG für vertikale Erdwärmesonden und Anzeige von Erdaufschlüssen gemäß § 41 SächsWG i. V. m. § 49 WHG). In diesem Fall werden das Bundesrecht *Wasserhaushaltsgesetz* (WHG) sowie das jeweilige Landesrecht (z. B. *Sächsisches Wassergesetz*) durch die unteren Wasserbehörden angewendet. Neben dem WHG sind auch die untergesetzlichen Bestimmungen des Bundes in der *Grundwasserverordnung* (GrwV) und in der *Oberflächengewässerverordnung* (OGewV) zu beachten. Die Ausgestaltung der rechtlichen Genehmigungsverfahren unterscheidet sich von Bundesland zu Bundesland. Die jeweilige Rechtsauslegung kann sogar innerhalb eines Bundeslandes je nach Wasserbehörde differieren; mitunter auch bei vergleichbaren geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen. Dies kann bedeutend sein, da bei einer wasserrechtlichen Genehmigung, im Gegensatz etwa zum Bergrecht, kein Anspruch auf Genehmigung besteht.

Grundsätzlich folgen die Behörden bei der Genehmigung von oberflächennahen Geothermieanlagen den Zielen eines umfassenden Trinkwasserschutzes. Dazu zählen folgende Einzelaspekte:

- Vorrang des Schutzes der Trinkwasserressourcen vor der Erdwärmenutzung,
- Vermeidung der gegenseitigen Beeinflussung von geothermischen Anlagen,
- Ausreichende Standorterkundung für geothermische Anlagen,
- Strenge Beachtung der einschlägigen technischen Regelungen und Einsatz qualifizierter Fachfirmen,
- Einsatz unschädlicher Bau- und Betriebsstoffe,
- Sicherstellung einer dauerhaften Wirksamkeit der Ringraumabdichtung,
- Überwachung von Bau und Betrieb der geothermischen Anlage sowie Anlagendokumentation,
- Fachgerechter Rückbau defekter bzw. stillgelegter geothermischer Anlagen.

Wesentlicher Punkt bei der Genehmigung sind erfahrungsgemäß die eingesetzten Wärmeträgermedien. Uneingeschränkt genehmigungsfähig sind nicht-wassergefährdende Stoffe

wie Wasser, Propan oder Propen. Auch die gängigen Wasser-Glykol-Gemische sind umweltfreundlich einsetzbar und genehmigungsfähig, unterliegen jedoch oft Beschränkungen hinsichtlich des Einsatzgebietes (besonders in Wasserschutzgebieten).

Die einzelnen landesrechtlichen Voraussetzungen werden durch die Landesämter mehrheitlich in Leitfäden zusammengefasst.

8.1.2 Bergrecht

Geothermie unterliegt aufgrund der Nutzung des „bergfreien Bodenschatzes" Erdwärme dem Bergrecht. Damit sind die Bestimmungen des *Bundesberggesetzes* (BbergG) zu beachten. Die meisten oberflächennahen Geothermieanlagen sind jedoch von der Pflicht zur Einholung einer Genehmigung nach § 4 Abs. 2 Ziff. 1 ausgenommen. Danach ist die Gewinnung von Bodenschätzen grundsätzlich genehmigungsfrei, wenn sie „in einem Grundstück aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung" geschieht. Dies ist bei der Beheizung eines Gebäudes mit einer Erdwärmeanlage in der Regel der Fall. Diese Ausnahme gilt jedoch nicht, wenn die Erdwärmenutzung über Grundstücksgrenzen hinweg geschieht sowie bei Bohrungen von mehr als 100 m Tiefe. Diese Tiefen sind für kleine Projekte meist aber ohnehin ausreichend.

8.2 Technische Regelwerke

8.2.1 DVGW W120-2

Das DVGW-Arbeitsblatt W120-2 definiert Regeln für die Zertifizierung von Bohrunternehmen von oberflächennahen Geothermieprojekten. Seit Juli 2013 liegt ein auf Geothermie spezialisiertes Regelwerk vor. Zuvor erfolgte eine Zertifizierung nach dem Arbeitsblatt W120 für Brunnenbauer.

Das Regelwerk definiert, welche Qualitätsstandards bei der Ausführung von Bohrungen einschließlich Planung und welche Reaktionsmechanismen eingehalten werden müssen. Mit der Spezialisierung auf die Geothermie hat das Arbeitsblatt W120-2 die Anforderung auf die Umsetzung einer Geothermieanlage mit Erdwärmesonden konkretisiert und ein betriebliches Managementsystem zur Pflicht gemacht.

8.2.2 VDI 4640

Die Planung von Erdwärmeanlagen wird in der VDI-Richtlinie 4640 geregelt. Blatt 1 definiert die Grundlagen und skizziert die Genehmigung und die Umweltaspekte. Blatt 2 gibt dagegen konkrete Empfehlungen zur Planung von Geothermieanlagen.

Es unterscheidet zwischen der Planung von Erdwärmesonden, Flächenkollektoren und Grundwasserbrunnen sowie weiteren spezielleren Anlagentypen. Derzeit befindet sich die Richtlinie in der Überarbeitung. Der Gründruck ist im Mai 2015 erschienen und befindet sich zum Redaktionsschluss noch im Einspruchsverfahren.

8.3 Wärmemarkt als Rahmen

Der Markt für oberflächennahe Geothermieanlagen umfasst die Wärmebereitstellung und Kühlung von Wohngebäuden und Gebäuden der Bereiche Industrie und Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD). Neben dieser klassischen Anwendung dienen insbesondere Sondenanlagen auch zur Eisfreihaltung von Parkplätzen oder Bahnweichen. Zugleich gibt es eine Vielzahl an möglichen Kombinationen mit anderen Technologien, z. B. mit Solarthermie oder Biomasseanlagen.

Spezielle technische, ökonomische und geologische Bedingungen sowie der gesetzliche Rahmen setzen diesen theoretischen Möglichkeiten allerdings Grenzen.

Zurzeit wird der Markt zur Bereitstellung von Wärmeenergie noch von fossilen Energieträgern beherrscht. Kohle, Öl und Gas besitzen zusammen einen Anteil von 88 % am Wärmemarkt. Erneuerbare Energien halten bisher nur einen Marktanteil von ca. 12 %. Innerhalb der Erneuerbaren Energien dominiert die Biomasse (Pellets, Restholz, Biogene Abfälle usw.) den Markt. Oberflächennahe Geothermie hat gegenwärtig einen Anteil von ca. 5 % am Erneuerbare-Energien-Wärmemarkt. Gleichzeitig besitzen Oberflächennahe und Tiefe Geothermie zusammen die mit Abstand größten Potentiale im heimischen Wärmemarkt für Erneuerbare Energien. Die aktuelle Diskussion über eine verstärkte Nutzung von Power-to-Heat-Strategien, welche den Wärme- und Stromsektor stärker verschränken, ändert diese grundlegende Einschätzung nicht. Der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen in Geothermieanlagen mit Wärmepumpen stellt eine besonders effiziente Verbindung von Strom- und Wärmemarkt dar und ist deutlich energieeffizienter als beispielsweise die „Stromvernichtung“ in Nachtspeicherheizungen oder Tauchsiedern.

2015 wurden für die Bereitstellung von Wärme und Kälte in Deutschland 1191 Terawattstunden verbraucht. Davon entfällt der größte Anteil – 748 Terawattstunden pro Jahr (62,8 %) – auf die Wärme- und Kältebereitstellung im Gebäudesektor. 443 Terawattstunden pro Jahr (37,2 %) werden für industrielle Prozesswärme benötigt. In den letzten Jahren hat sich der Trend nach einem immer geringeren Wärme- und Kältebedarf verfestigt. Dies ist vor allem auf die deutlich gestiegenen energetischen Standards bei Neubauten und die umfangreichen Förderungen für die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden zurückzuführen. Weiterhin wurden auch in der Industrie verstärkt Effizienzverbesserungen wirksam.

Perspektivisch erwartet die Bundesregierung bis 2020 eine Verringerung des Wärmebedarfs um 72 TWh (gegenüber 2012). Gleichzeitig soll der Anteil Erneuerbarer Energien an der Wärmebereitstellung auf 14 % angehoben werden. Zur Erreichung dieser Ziele ist

eine deutliche Steigerung der Sanierungsquote erforderlich, von derzeit durchschnittlich 1–2 % pro Jahr auf mindestens 5 % pro Jahr (BMWi: Erfahrungsbericht EEWärmeG 2015; Berlin 2016).

8.3.1 Was bewegt den Markt?

Der Wärmemarkt ist auf Angebots- und Nachfrageseite sehr komplex strukturiert. Die Marktteilnehmer werden beeinflusst von technischen, ökonomischen, ökologischen, gesetzlichen und psychologischen Parametern. Durch die Vielzahl an Einzelfaktoren sind Vorhersagen über die Marktentwicklung außerordentlich schwierig. Die vollkommen verschiedenen Einflussgrößen – wie benötigte Vorlauftemperatur (technisch), Wärmearbeitspreis (ökonomisch), CO_2-Emissionen (ökologisch) oder maximale Wärmeentzugsleistung (technisch) – wirken direkt und indirekt auf den Wärmemarkt. Sie beeinflussen sich jeweils gegenseitig und sind gekoppelt mit jeweiligen Erwartungen der verschiedenen Marktteilnehmer. Psychologische Effekte, welche beispielsweise die Wahrnehmung der jeweiligen Energieträger oder Marktakteure (EVU vs. kommunale Energiewirtschaft) betreffen, verstärken noch die Komplexität dieses Marktes. Entwicklungen auf dem Wärmemarkt sind aus diesem Grund nicht exakt vorhersagbar.

Teilweise sind die Beobachtungen sehr widersprüchlich. Beispielsweise ist die Zustimmung zu Erneuerbaren Energien regelmäßig sehr hoch. Nach einer Umfrage von TNS Emnid im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien wurde 2015 ermittelt, dass 93 % den weiteren Ausbau Erneuerbarer Energien für wichtig halten. Dennoch sind jedes Jahr knapp 90 % der verkauften Heizgeräte nicht etwa erneuerbare Energien, sondern Öl- und Gasheizungen.

Eine Feststellung kann jedoch getroffen werden. Die Entscheidung für eine Geothermieanlage als nicht-fossile Energie hängt wesentlich von der Preisentwicklung der konventionellen Energieträger ab. Regelmäßig fällt ein verstärkter Ausbau von Geothermieanlagen mit Zeiten hoher Öl- und Gaspreise zusammen. Dies liegt darin begründet, dass die Amortisation der Mehrkosten bei der Installation der Anlage zu Zeiten hoher fossiler Energiepreise besser zu vermitteln ist als zu Zeiten niedriger Preise.

8.4 Förderung der Geothermie als Erneuerbare Energie

Der Einsatz Erneuerbarer Energien wird mittelbar wie unmittelbar gefördert über das *Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz* (EEWärmeG), das darin begründete Marktanreizprogramm (MAP), die *Energieeinsparverordnung* (EnEV) sowie das im Jahr 2016 neu ausgerufene Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE).

8.4.1 Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz

Einen direkten Anschub für die Nutzung der Erdwärme begründet das EEWärmeG. Die Wärmewende soll dem Klimaschutz, der Schonung fossiler Ressourcen und der Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten dienen. Außerdem soll eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung ermöglicht und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Wärme und Kälte aus Erneuerbaren Energien gefördert werden. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil Erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahr 2020 auf 14 % zu erhöhen.

Das EEWärmeG vereint ordnungspolitische Maßnahmen und finanzielle Anreize. Der Kern der Ordnungspolitik ist die Nutzungspflicht Erneuerbarer Energien bei der Errichtung eines Gebäudes und bei öffentlichen Gebäuden. Zu erfüllen ist im Regelfall ein Mindestanteil, der bei Geothermieanlagen (im Gesetzestext unter Wärmepumpen gefasst) 50 % beträgt.

Außerdem gelten für die in oberflächennahen Geothermieanlagen eingesetzten Wärmepumpen Mindesteffizienzanforderungen. Die (errechnete) Jahresarbeitszahl muss mindestens 3,8 betragen (bei Kombination Raumwärme und Warmwasser) bzw. 4,0 (nur Raumwärme). Zudem müssen die in der Anlage eingesetzten Wärmepumpen mit den Gütesiegeln „Euroblume“, „Blauer Engel“ oder „EHPA-Qualitätslabel“ zertifiziert sein oder deren Anforderungen erfüllen.

8.4.2 Marktanreizprogramm (MAP)

Die zweite Säule des EEWärmeG ist die finanzielle Förderung im Rahmen des Marktanreizprogramms. Es stellt finanzielle Mittel zur Förderung Erneuerbarer Heiztechnologien in privaten Haushalten und Unternehmen zur Verfügung. Maximal hierfür vorgesehen sind insgesamt 500 Mio. Euro pro Jahr. Für kleinere Geothermieanlagen (bis 100 kW Wärmepumpenleistung werden direkte Investitionszuschüsse über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) ausbezahlt. Erdwärmeheizungen ab 100 kW werden über zinsvergünstigte Darlehen und Tilgungszuschüsse der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) gefördert.

Bauherren und Hausbesitzer können bei der Installation einer Erdwärmeheizung mit einem kräftigen Zuschuss vom Staat rechnen. Voraussetzung ist dabei – wie bei der Nutzungspflicht im Neubau (siehe EEWärmeG) – eine Mindesteffizienz der eingebauten Wärmepumpe. Die Jahresarbeitszahl muss – laut MAP-Richtlinien 2015 – bei Wohngebäuden mindestens 3,8 und im Nichtwohngebäude 4,0 (im Bestand) betragen, bei Neubauten unterschiedslos mindestens 4,5.

Als Basisförderung werden in bestehenden Gebäuden 100 € pro Kilowatt (Wärmepumpen-)Leistung bezahlt. Es gilt darüber hinaus eine Mindestförderung von 4000 €, bei Anlagen mit Erdsonden sogar 4500 €. Bei besonders effizienten Anlagen

mit einer Jahresarbeitszahl von mindestens 4,5 kann eine Innovationsförderung beantragt werden. Der Grundbetrag erhöht sich dabei um 50 %. Weitere Boni sind für die Lastmanagementfähigkeit, die Kombination mit anderen Erneuerbaren Energien, eine besondere Gebäudeeffizienz oder die Optimierung der Heizungsanlage verfügbar.

Für den Neubau ist keine Basisförderung möglich. Jedoch werden Anlagen über die Innovationsförderung gefördert, wenn eine Jahresarbeitszahl von mindestens 4,5 vorgewiesen werden kann. Der Nutzer erhält dann ebenso wie bei der Basisförderung im Bestand 100 € pro Kilowatt und mindestens 4000 € bzw. 4500 €.

Die Erfüllung der Fördervoraussetzungen muss über eine Bestätigung des beauftragten Fachunternehmers nachgewiesen werden. Daher werden die Anträge meistens vom Heizungsbauer im Auftrag des Bauherren gestellt. Hauptsätzlich genutzt werden die Zuschüsse im Leistungsbereich bis 20 kW.

8.4.3 Marktanreizprogramm (MAP) – KfW-Teil

Die Deutsche Kreditbank für Wiederaufbau (KfW) gewährt mit ihrem Programm *Erneuerbare Energien (Premium)* zinsvergünstigte Darlehen und Tilgungszuschüsse für oberflächennahe Geothermieanlagen mit einer Wärmepumpenleistung von mehr als 100 kW. Die Beantragung erfolgt über die Hausbank. Antragsberechtigt sind Privatpersonen gleichermaßen wie Unternehmen oder Kommunen. Der Zins ist von der Höhe des Darlehens abhängig. Die Tilgungszuschüsse betragen 80 € pro Kilowatt sowie mindestens 10.000 € und höchstens 50.000 € pro Anlage. Für Erdsonden bis 400 m Tiefe werden 4 € pro Meter, ab 400 m Tiefe 6 € bezahlt. Als Fördervoraussetzungen gelten eine Mindestjahresarbeitszahl von 3,8, die Einrichtung einer automatischen Fernausleseeinrichtung sowie der Einbau einer effizienten Umwälzpumpe. Zudem sind Nahwärmenetze förderfähig.

8.4.4 Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die Energiewende wird im Wärmemarkt als Kombination aus verstärktem Einsatz von Erneuerbaren Energien und verstärkter Energieeffizienz verstanden. Den Schwerpunkt bildet dabei die Energieeffizienz. Wesentlich ist hier die *Energieeinsparverordnung* (EnEV) in Verbindung mit dem grundlegenden *Energieeinspargesetz* (EnEG). Die EnEV definiert Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden bei der Wärmeerzeugung und entfaltet besondere Bedeutung bei der Errichtung neuer Gebäude. Vorgeschrieben werden Maximalwerte für den Heizwärmebedarf, den Jahresprimärenergiebedarf und den Transmissionswärmeverlust.

Die Anforderungen werden in regelmäßigen Abständen verschärft. Die letzte Novelle wurde 2013 beschlossen. Die ersten Anpassungen wurden zum Mai 2014 wirksam und sahen vor, dass Hausbesitzer bis 2015 Heizungen, die älter als 30 Jahre sind, gegen moderne Heizsysteme tauschen müssen. Neue Heizgeräte müssen eine CE-Zertifizierung

besitzen. Zum 1. Januar 2016 sind die Anforderungen an den Primärenergiebedarf von Häusern sowie an die Mindestqualität der Gebäudehülle nochmals gestiegen. Auch für Bestandsgebäude gilt die EnEV; hier gelten etwas großzügigere Grenzwerte.

Die EnEV stellt zwar in erster Linie Anforderungen an die Gebäudehülle und damit an die Baumaterialien für Wände, Türen, Fenster etc. Entscheidend bei der Erfüllung ist jedoch der Primärenergieverbrauch. Bei zunehmender Verschärfung der Grenzwerte rücken auch bei den Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden Erneuerbare Heiztechnologien immer mehr in den Fokus. Denn Erneuerbare Energie verbraucht auch bei Berücksichtigung der Vorkette kaum bis gar keine Primärenergie.

8.4.5 Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE)

Zur Weiterentwicklung der Energieeffizienzpolitik hat die Bundesregierung im Dezember 2014 den *Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz* (NAPE) beschlossen. Darin werden konkrete und grundsätzliche Maßnahmen benannt, die die Energieeffizienz in Deutschland steigern sollen. Ziel der Bundesregierung ist es, den Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 gegenüber 2008 um 20 % zu senken und bis 2050 zu halbieren.

Um dieses Ziel zu erreichen, hat die Bundesregierung mit *dem Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz* (NAPE) eine umfassende Strategie auf den Weg gebracht. Alle Maßnahmen des NAPE folgen einem gemeinsamen Grundsatz: „Informieren – Fördern – Fordern“. Adressiert werden dabei neben klassischen Effizienzthemen (z. B. Energiestandards der Gebäudehülle) auch Themen, die den Ausbau Erneuerbarer Energien direkt oder indirekt fördern. Zu nennen sind hier beispielsweise die Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms (siehe oben), die Energieeffizienzstrategie Gebäude, die Einführung neuer Effizienzlabels für Heizgeräte oder das Anreizprogramm Energieeffizienz (siehe unten).

8.4.6 Anreizprogramm Energieeffizienz

Beim Austausch einer ineffizienten fossilen Heizung gegen eine moderne oberflächennahe Geothermieanlage mit Wärmepumpe erhalten Bauherren einen 20 %igen Aufschlag auf den Förderbetrag des Marktanreizprogramms (MAP). Zudem sieht das neue Anreizprogramm Energieeffizienz einen Pauschalbetrag von 600 € für die Optimierung der Heizungsanlage vor. Das Anreizprogramm ist bis Ende 2018 befristet.

Gewährt wird der sogenannte „Zusatzbonus“ sowohl auf den Investitionszuschuss für Erdwärmeheizungen mit Wärmepumpe bis 100 kW als auch auf den Tilgungszuschuss im KfW-Programm *Erneuerbare Energien (Premium)* für Anlagen mit mehr als 100 kW und den Anschluss an ein MAP-gefördertes Wärmenetz. Voraussetzungen sind die Bewilligung eines zugrundeliegenden Fördermittelantrags, die Außerbetriebnahme einer ineffizienten Öl- und Gasheizung und die Optimierung der gesamten Heizungsanlage. Als ineffizient gelten Heizungen, die weder die Brennwert- noch die Brennstoffzellentechnik nutzen.

Im Förderfall erhalten Bauherren von Geothermieanlagen bis 100 kW einen Zuschuss von mindestens 5400 €, bei Geothermieanlagen mit Erdsonden mindestens 6000 €. Der Antrag ist bei der für den MAP-Antrag zuständigen Behörde zu stellen. Für Anlagen bis 100 kW ist dies das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), für Anlagen mit mehr als 100 kW die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW).

8.4.7 Erneuerbare-Energien-Richtlinie

Die *Erneuerbare-Energien-Richtlinie* der EU zur Förderung der Nutzung von Energie aus Erneuerbaren Quellen in den Energiesektoren Wärme, Strom und Verkehr trat im April 2009 in Kraft. Sie legt verbindliche Anteile von Erneuerbaren Energien an den gesamten verbrauchten Energien für die einzelnen Mitgliedsstaaten fest. Ziel ist es, dass im Jahr 2020 in der gesamten EU der Anteil der Erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch mindestens 20 % betragen muss. Hierfür wurden für die einzelnen Mitgliedsstaaten, ausgehend von den Werten aus dem Jahr 2005, Quoten festgesetzt. So muss die Bundesrepublik Deutschland bis 2020 mindestens 18 % ihres Bruttoendenergieverbrauchs aus Erneuerbaren Energiequellen decken.

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie bezieht sich auf den Strom-, Wärme-/Kälte- und den Verkehrssektor. Die Mitgliedsstaaten sind verpflichtet, entsprechende Gesetze für die Förderung der Strom- und Wärme-/Kälte-Produktion aus Erneuerbaren Energien zu erlassen. In Deutschland sind hier vor allem EEG und EEWärmeG zu nennen.

Die Maßnahmen umfassen jeweils ordnungspolitische Instrumente und Anreizsysteme, aber auch eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit. Die Maßnahmen unterliegen einer Evaluation. Die öffentliche Wahrnehmung der Geothermie hat dabei als Teil der politischen Rahmenbedingungen einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Entwicklung des Marktes.

8.5 Wahrnehmung von Geothermie in der Öffentlichkeit

Geothermie weckt eine Vielzahl von Assoziationen in der menschlichen Vorstellung. Sie verbinden positive „Wellness“-Erfahrungen aus balneologischer Nutzung (römische Bäder) mit der kulturell verwurzelten Angst vor der Tiefe (siehe Hades oder Höllenvorstellungen). Neben diesen tief verwurzelten, eher historischen Wahrnehmungen der Geothermie/Erdwärme stehen die modernen Erfahrungswelten der Oberflächennahen Geothermie. Hier gibt es zum einen hunderttausende zufriedene Kunden, welche ihre Wohngebäude mit Oberflächennaher Geothermie beheizen, zum Teil auch kühlen. Zum anderen gibt es aber auch die Leidtragenden aus Schadensfällen durch unsachgemäß hergestellte Geothermiebohrungen. Positive und negative Erfahrungsträger wirken als Multiplikatoren in ihrem jeweiligen sozialen und gesellschaftlichen Umfeld. Rein zahlenmäßig überwiegen die positiven Erfahrungen mit Geothermieanlagen sehr deutlich.

Einzelnen Schadensfällen stehen in Deutschland ca. 350.000 erfolgreich genutzte Anlagen mit mindestens 1.000.000 Wärmeabnehmern in Deutschland gegenüber. Trotzdem entsteht der Eindruck, dass Geothermie eher einer kritischen Diskussion in der Öffentlichkeit standhalten muss. Hierbei ergibt sich bei genauerer Betrachtung allerdings ein differenzierteres Bild. Eine Umfrage im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien befragte Menschen mit Erfahrungen bei der Geothermie-Nutzung und Menschen ohne Erfahrungen bei der Geothermie-Nutzung, wie sie jeweils die Technologie einschätzen. Die befragten Personen mit Erfahrungen hatten dabei ein deutlich positiveres Bild von der Technologie, als Personen ohne diese Erfahrungen. Diese erfahrungsgesteuerten Erwartungen haben in der Regel auch eine positive Korrelation zur Risikowahrnehmung einer Technologie. So stirbt beispielsweise im Straßenverkehr oder bei Gasexplosionen in Wohnhäusern jährlich eine Vielzahl an Personen, ohne dass eine jeweils öffentlichkeitswirksame Diskussion über die technologieimmanenten Risiken stattfindet. Bei Technologien in der Markteinführung wird diese Diskussion intensiver geführt. Die gesellschaftlich und ökonomisch vertretbaren Risiken werden von der Öffentlichkeit noch verhandelt bzw. diskutiert. Politik und Medien leiten diesen Diskurs zwischen Chance und Risiko.

In Deutschland kann eine unterschiedliche regionale Wahrnehmung von Geothermie beobachtet werden. In Sachsen gibt es beispielsweise einen stabil wachsenden Markt, welcher mit ausschließlich positiver Erfahrung und mit sehr geringen geologischen Risiken verbunden ist. Baden-Württemberg besaß einen sehr dynamischen Markt für Oberflächennahe Geothermie, bis verschiedene Schadensfälle eine wesentlich veränderte Risikowahrnehmung zur Folge hatten. Danach brach der Markt praktisch zusammen und hat sich davon bisher nicht mehr erholt. Die Schadensfälle wurden nicht nur regelmäßig in den regionalen Medien aufgegriffen, sondern wurden auf den gesamten Markt in Südwestdeutschland übertragen. Ursachen für die Schadensfälle waren unsachgemäß ausgeführte Bohrungen und falsche Bewertungen der geologischen Verhältnisse. Auch seismische Ereignisse bei Tiefengeothermie-Projekten in Landau und Bern (Schweiz) wirkten sich in der öffentlichen Wahrnehmung negativ auf die Risikowahrnehmung aus, obwohl bei der Oberflächennahen Geothermie seismische Risiken weitgehend ausgeschlossen sind.

Im Ergebnis bedarf es für eine positive Wahrnehmung der Oberflächennahen Geothermie vor allem einer Vermeidung jeglicher Schadensfälle durch konsequentes Qualitätsmanagement und hohe Standards sowie gleichzeitig eine Vielzahl von erfolgreichen Projekten. Sollte die Technologie in der öffentlichen Wahrnehmung in Zukunft verstärkt als „risikobehaftet“ wahrgenommen werden, könnte Sie ein Nischenprodukt bleiben. Eine positive Wahrnehmung würde zu ihrem Durchbruch beitragen.

Literatur

BbergG: Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 30. November 2016 (BGBl. I S. 2749) geändert worden ist

BMWi: Erfahrungsbericht EEWärmeG 2015. Berlin (2016)

DVGW-Arbeitsblatt W120-2: Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik und oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden) (2013)
EEWärmeG: Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz vom 7. August 2008 (BGBl. I S. 1658), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1722) geändert worden ist
EnEG: Energieeinsparungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 1. September 2005 (BGBl. I S. 2684), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. Juli 2013 (BGBl. I S. 2197) geändert worden ist
EnEV: Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789) geändert worden ist
Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die durch Artikel 3 des Gesetzes vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1972) geändert worden ist
NAPE: Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. BMWi (2014)
OGewV: Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373)
Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt, BMWi: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Foerderbekanntmachungen/marktanreizprogramm-erneuerbare-energien.pdf;jsessionid=DD247BE20D3F2E2BBDB8AE27A6E91EE7?__blob=publicationFile&v=13 (2015). Zugegriffen: 8. Febr. 2017
Umfrage zur Akzeptanz Erneuerbarer Energien 2015, TNS Emnid im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien, www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/umfrage-akzeptanz-erneuerbare-energien-2015 (2015). Zugegriffen: 7. Febr. 2017
VDI 4640: Richtlinienreihe VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrunds“
WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1972) geändert worden ist

Oberflächennahe Geothermie und Bergrecht

9

Walter Frenz

Inhaltsverzeichnis

9.1 Problemaufriss . . . 336
9.2 Relevanz des Bergrechts . . . 337
9.2.1 Nur bei nicht grundstücksbezogener Gewinnung . . . 337
9.2.2 Gewerbliche und wissenschaftliche Aufsuchung . . . 338
9.2.3 Speicherung und Entnahme von Wärmeenergie . . . 339
9.2.4 Grundwasser als Trägermedium . . . 339
9.2.5 Bohrungen . . . 339
9.3 Bergrechtliche Haftung für Schäden aus Geothermiebohrungen . . . 342
9.3.1 Reichweite . . . 342
9.3.2 Bohrbezug . . . 342
9.3.3 Kausalität . . . 344
9.3.4 Sozialadäquanz . . . 345
9.3.5 Schutzzweck . . . 346
9.3.6 Zwischenergebnis . . . 347
9.4 Betriebsplanpflicht . . . 347
9.5 Verbindung zu Fracking . . . 349
9.6 Gesamtfazit . . . 350
Literatur . . . 350

Zusammenfassung

Geothermie ist Rohstoffgewinnung und hat daher einen engen Bezug zum Bergrecht, wenn es sich nicht um eine rein grundstücksbezogene Nutzung handelt. Aber selbst in diesem Fall greifen bei Bohrungen mit über 100 m Tiefe bergrechtliche Regelungen. Ein Rahmenbetriebsplan ist allerdings nicht erforderlich; es genügt ein

Walter Frenz (✉)
RWTH Aachen University, Wüllnerstraße 2, 52056 Aachen, Deutschland
e-mail: frenz@bur.rwth-aachen.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_9

Hauptbetriebsplan, mit dem ggf. für weitere Bohrungen Sonderbetriebspläne einhergehen müssen. Die Bergschadenshaftung ist nicht explizit angeordnet, aber gleichwohl sachgerecht. Zudem sind ihre Wertungen in die allgemeine Schadenshaftung zu übertragen. Jedenfalls erstreckt sich die bergrechtliche Verantwortlichkeit auf die Wasser(rein)haltung, wie das Urteil Meggen des BVerwG nochmals unterstrich. Konsequenzen hat auch das Fracking-Verbot. Davon werden nach einem Erlass der Ministerien für Wirtschaft und Umwelt des Landes NRW vom 18.11.2011 auch Geothermiebohrungen mit Fracking-Bezug erfasst; es bedarf allerdings einer restriktiven Auslegung.

Schlüsselwörter
Bergrecht · Fracking-Gesetz · Haftung · Zulassungsanspruch · Geothermiebohrungen

9.1 Problemaufriss

Oberflächennahe Geothermie und Bergrecht haben keine durchgehende Verbindung. Nur Bohrungen mit einer Tiefe von über 100 m werden in § 127 BBergG durchgehend mit einem Verweis auf bergrechtliche Bestimmungen bedacht. Ansonsten kommt es auf das Vorliegen bergbaurelevanter Vorgänge an, die bei Geothermie lediglich zur Beheizung eines Gebäudes fehlen (§ 4 Abs. 2 Nr. 1 BBergG). Die Vorfrage ist daher die Einschlägigkeit des Bergrechts. Davon hängt auch maßgeblich ab, welches Haftungsregime greift – die bergrechtliche Haftung (§§ 114 ff. BBergG) oder die allgemeine Schadenshaftung nach § 823 BGB, so bei Unglücksfällen wie in Staufen: Dort drang Wasser in eine Anhydritschicht im Untergrund ein. Dies ließ den Boden aufquellen und führte zu Rissen in Gebäuden.

Zusätzliche Einflüsse ergeben sich vor dem Hintergrund der *Fracking-Gesetzgebung*, bestehend aus dem Gesetz zur Änderung wasser- und naturschutzrechtlicher Vorschriften zur Untersagung und zur Risikominimierung bei den Verfahren der Fracking-Technologie (Gesetzentwurf der Bundesregierung, BT-Drucks. 18/4713), dem Gesetz zur Ausdehnung der Bergschadenshaftung auf den Bohrlochbergbau und Kavernen (Gesetzentwurf der Bundesregierung, BT-Drucks. 18/4714) und der Verordnung zur Einführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen und über bergbauliche Anforderungen beim Einsatz der Fracking-Technologie und Tiefbohrungen (Verordnungsentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, BR-Drucks. 144/15). Dieses z.T. modifiziert verabschiedete Gesetzespaket (BR-DRs. 353/16; veröffentlicht in BGBl. I 2016 S. 1962 und 1972) erfasst in Bezug auf die Bergschadenshaftung eigens Bohrungen und lässt auch für diese die Bergschadensvermutung eingreifen. Umgekehrt haben Geothermiebohrungen, welche mit Fracking einhergehen, an dem darauf bezogenen Regime teil (§ 9 Abs. 2 Nr. 3 WHG). Das gilt namentlich für das *petrothermale Verfahren*, bei dem mindestens zwei Bohrungen durchgeführt werden, sodass gezielt Risse erzeugt werden (Fracs) und so im Gestein

eine wasserdurchlässige Verbindung hergestellt wird (Preuße et al. 2015). Schon länger bestehen im Hinblick darauf Moratorien.

9.2 Relevanz des Bergrechts

9.2.1 Nur bei nicht grundstücksbezogener Gewinnung

Gem. § 3 Abs. 3 S. 2 Nr. 2 b BBergG bildet Erdwärme einen bergfreien Bodenschatz. Auf ihn erstreckt sich das Eigentum an Grundstücken nach § 3 Abs. 2 S. 2 des BBergG nicht. Daher bedarf es gem. § 6 BBergG grundsätzlich einer Bergbauberechtigung. Das gilt aber mangels Gewinnung nach § 4 Abs. 2 Nr. 1 BBergG nicht, soweit die Gewinnung von Erdwärme grundstücksbezogen und damit etwa für die Beheizung eines Gebäudes erfolgt. Diese Vorschrift nimmt nämlich das Lösen oder Freisetzen von Bodenschätzen in einem Grundstück aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung aus. Teilweise wird die „Bergrechtsfreiheit“ auf sämtliche auf dem eigenen Grundstück durchgeführte Bohrungen mit einer Tiefe von höchstens 100 m erstreckt, sofern keine gewerbliche Nutzung erfolgt und auf die Temperaturverhältnisse des Nachbargrundstücks nicht eingewirkt, mithin dessen Erdreich energetisch nicht beeinflusst wird (Greb 2015, § 48, Rn. 34).

Auch nach diesem letztgenannten Ansatz ergibt sich umgekehrt, dass eine *Bergbauberechtigung* wegen vorliegender Gewinnung dann erforderlich ist, wenn deren Zweck nicht privat, sondern gewerblich ist. Nach dem Gesetzeswortlaut des § 4 Abs. 2 Nr. 1 BBergG bedarf es ihrer immer dann, wenn sich der Zweck der Geothermie nicht auf die bauliche oder sonstige städtebauliche Nutzung des Grundstücks beschränkt, in dem diese Gewinnung stattfindet. Die Gewinnung von Erdwärme geht dann darüber hinaus, sofern mit ihr Baulichkeiten auf anderen oder mehreren Grundstücken beheizt werden und diese nicht in unmittelbarem räumlichen oder betrieblichen Zusammenhang mit dem *Gewinnungsgrundstück* stehen oder aber die Erdwärme zur Erzeugung von Strom oder Fernwärme dienen soll und in die allgemeinen Versorgungsnetze eingespeist wird (Bergbehörde NRW 2009, S. 1 f). Damit kann selbst eine *gewerbliche Nutzung* aus dem Bergrecht herausfallen, wenn sie rein grundstücksbezogen ist und der Beheizung eines Firmengebäudes auf dem eigenen Gelände dient.

Dabei kommt es nicht auf eine hydrologische oder geothermische Auswirkung auf benachbarte Grundstücke an (Bergbehörde NRW 2009, S. 1 f). Insoweit trifft das BBergG keine beschränkende Aussage. Die formale, rein auf die Nutzung für das eigene Grundstück bezogene Betrachtungsweise ist auch deshalb vorzuziehen, weil sie an die von vornherein feststehenden Gegebenheiten anknüpft, während die Frage der Auswirkungen auf Nachbargrundstücke einer Prognose bedarf, deren Eintreten auch ungewiss sein kann.

9.2.2 Gewerbliche und wissenschaftliche Aufsuchung

Tätigkeiten, die ausschließlich und unmittelbar Lehr- oder Unterrichtszwecken dienen, benötigen ebenfalls keine Bergbauberechtigung. Sie sind nach § 4 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 BBergG von der Aufsuchung ausgenommen. Sollen die Aktivitäten über reine Lehr- oder Unterrichtszwecke hinausgehen, kommen eine gewerbliche und eine wissenschaftliche Erlaubnis in Betracht. Bei der Aufsuchung nach dem BBergG zählen nicht der dahinter liegende Zweck und die subjektive Zielsetzung und damit nicht die Finalität dieser Tätigkeit, sodass neben der gewerblichen auch die Aufsuchung zu wissenschaftlichen Zwecken in Betracht kommt (Vitzthum und Piens 2013, § 4, Rn. 12).

Ob der aufzusuchende Bodenschatz wirtschaftlich benötigt und später gewonnen wird, ist zunächst nicht entscheidungserheblich (OVG Bautzen 2004). Nach dem BBergG geht es nicht nur um die Sicherung der Rohstoffversorgung, sondern auch um die Gewährleistung der Sicherheit der Beschäftigten und die Gefahrenvorsorge (§ 1 Nr. 2, 3 BBergG, darauf verweisend OVG Lüneburg 2003 im Zusammenhang mit der Erkundung des Salzstockes Gorleben). Damit können auch *Erkundungsbohrungen* für Erdwärme umfasst werden, die nur die Gefahrenvorsorge verbessern sollen, damit etwa nicht wieder ein Vorfall wie im Fall *Staufen* auftritt. Entscheidend ist damit die Art der vorgesehenen Aufsuchungstätigkeiten unabhängig von der subjektiven Zielrichtung der Aufsuchung; es besteht ein objektiver tätigkeitsbezogener Aufsuchungsbegriff (Vitzthum und Piens 2013, § 4, Rn. 12 a. E.).

Gleichwohl unterscheidet das BBergG die gewerbliche und die *wissenschaftliche Aufsuchung*. Unter Letztere fällt namentlich die großräumige Aufsuchung nach § 4 Abs. 1 S. 2 BBergG, also eine mithilfe von geophysikalischen oder geochemischen Verfahren durchgeführte Untersuchung, wenn sie auf die Ermittlung von Kennwerten beschränkt ist, die großräumige Rückschlüsse auf das mögliche Vorkommen von Bodenschätzen zulassen. Durch die Beschränkung auf die Ermittlung von Kennwerten wird das Nebeneinander dieses Aufsuchungsrechts mit anderen Aufsuchungs- oder mit Gewinnungsrechten ermöglicht (Vitzthum und Piens 2013, § 4, Rn. 14).

Dabei ist die *Aufsuchung zu gewerblichen Zwecken* weitergehend. Sie schließt nämlich nach § 7 Abs. 2 BBergG die Erteilung einer Erlaubnis zur großräumigen Aufsuchung sowie eine oder mehrere Erlaubnisse zur Aufsuchung zu wissenschaftlichen Zwecken nicht aus. Zudem ist nur der Erlaubnisinhaber für eine gewerbliche Aufsuchung privilegiert, wenn es später um den Antrag auf ein Gewinnungsrecht geht; § 12 Abs. 2 BBergG erstreckt sich nämlich nicht auf den Inhaber einer wissenschaftlichen Erlaubnis, der damit keine vergleichbare Besserstellung besitzt (Vitzthum und Piens 2013, § 7, Rn. 9 in Verbindung mit § 12, Rn. 9).

Damit ist die wissenschaftliche Erlaubnis ein Weniger als die gewerbliche Erlaubnis. Sie ist gleichsam in der gewerblichen Erlaubnis enthalten. Umgekehrt ist Letztere näher durch eine tatsächliche Aufsuchungstätigkeit ins Werk zu setzen. Ist dies allerdings geplant, liegt es nahe, es bei einer gewerblichen Aufsuchung zu belassen und diese nicht in eine wissenschaftliche Erlaubnis übergehen zu lassen. Nur auf der Basis einer

gewerblichen Aufsuchungserlaubnis ist auch eine spätere Bewilligung für die Gewinnung praktisch sicher gewährleistet.

9.2.3 Speicherung und Entnahme von Wärmeenergie

Über bestimmte Zweckrichtungen hinaus unterfallen bestimmte Vorgänge nicht dem Bergrecht. Das gilt etwa für die *Einleitung von Wärmeenergie in den Boden*, um sie zu speichern und später zu entnehmen. Insoweit liegt auch kein bergrechtlich relevanter Tatbestand der behälterlosen Tiefenspeicherung vor. Die Wärme ist insoweit künstlich eingebracht, sodass auch die Entnahme der so gespeicherten Wärmeenergie bergrechtlich irrelevant ist. Soll allerdings dem Untergrund bei längerfristiger Betrachtung insgesamt mehr Wärmeenergie entnommen werden als ursprünglich eingeleitet wurde, so ist die Anwendung des Bergrechts unbeschadet der Ausnahmeregelung des § 4 Abs. 2 Nr. 1 BBergG zu prüfen. Hingegen bildet die *Nutzung von Erdwärme* etwa in einem *Wärmetauscher* keine Aufbereitung; sie ist vielmehr nach § 4 Abs. 3 S. 2 letzter Halbsatz BBergG einer Weiterverarbeitung eines Bodenschatzes gleichzustellen (Bergbehörde 2009, S. 2).

9.2.4 Grundwasser als Trägermedium

Soll gehobenes Grundwasser direkt als Trägermedium für eine Wärmeaufnahme genutzt werden, etwa um die aus einem Gebäude abzuführende Wärme aufzunehmen (*direkte Kühlung*), handelt es sich gleichfalls um keine Gewinnung von Erdwärme, und zwar unabhängig davon, ob das Grundwasser nach Erwärmung wieder in den Untergrund eingebracht und in die Vorflut abgeleitet wird (Bergbehörde 2009, S. 2).

9.2.5 Bohrungen

9.2.5.1 Erfassung von mehr als 100 m tiefen Bohrungen

Bohrungen sind eine klassische bergbauliche Tätigkeit. Vielfach sind sie unabhängig von ihrer Tiefe schon von bergbaulichen Zulassungen erfasst und abgedeckt. Das gilt auch im Rahmen der Geothermie, wenn sie eine bergbauliche Gewinnung bildet, weil sie nicht rein grundstücksbezogen ist (Abschn. 9.2.1). Ansonsten hängt die Einbeziehung von Geothermiebohrungen in das Bergrechtsregime maßgeblich von ihrer Tiefe ab. Sollen sie auch im Zusammenhang mit einer nicht für sich selbst dem Bergrecht unterfallenden Gewinnung von Erdwärme mehr als 100 m in den Boden eindringen, sind sie nach § 127 BBergG der Bergbehörde anzuzeigen. Diese entscheidet dann, ob es eines Betriebsplans gem. §§ 51 ff. BBergG bedarf, weil die Bohrung eine entsprechende Bedeutung hat oder Beschäftigte bzw. Dritte zu schützen sind.

Wenn mehr als 100 m *Bohrtiefe* erreicht werden, ist es also möglich, dass die Bergbehörde die Einhaltung der Betriebsplanpflicht im Einzelfall für erforderlich erklärt (§ 127

Abs. 1 Nr. 2 BBergG). Das gilt mithin nicht generell, sondern nur in begründeten Einzelfällen, nämlich bei entsprechenden Gefährdungen namentlich der Gesundheit Dritter oder bei einer hinreichenden Bedeutung des Betriebes. Solche Fälle sind etwa dann gegeben, wenn in Schichten gebohrt wird, welche mit Grundwasser in Berührung stehen, oder aber die Gefahr existiert, dass Wasservorräte getroffen werden, die dann etwa wie im Fall Staufen in eine problematische Gesteinsschicht eindringen und damit den Boden aufquellen lassen.

9.2.5.2 Bezüge zum Wasserrecht

Trifft einer dieser Gründe zu und ist daher ein Betriebsplanverfahren durchzuführen, werden gem. §§ 55 ff. BBergG auch noch andere betroffene Behörden beteiligt. Es bedarf aber weiterhin einer besonderen wasserrechtlichen Erlaubnis; diese wird freilich gem. § 19 Abs. 2 WHG von der Bergbehörde und nicht wie in den anderen Fällen durch die Wasserbehörde und regelmäßig zusammen mit der Zulassung des Betriebsplans erteilt (Piens 2013, § 127, Rn. 7). In den Fällen der Betriebsplanpflicht ist dann insbesondere auch für eine Haftung auf die Wertungen des BBergG zurückzugreifen (Näheres unten in Abschn. 9.2.5.3 und 9.3). Bergrechtliche Anforderungen sind im Übrigen auch dann zu beachten, wenn mangels Betriebsplanpflicht eine Wasserbehörde zuständig ist (Piens 2013, § 127, Rn. 7 a. E.).

Ob eine *wasserrechtliche Erlaubnis* erforderlich ist, bestimmt sich in beiden Fällen nach dem Wasserrecht (Piens 2013, § 127, Rn. 8). Entscheidend ist damit nach § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG letztlich, ob die Geothermiebohrung geeignet ist, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß nachteilige Änderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen und damit eine sog. unechte Gewässerbenutzung darstellt. Zwar präventiv ausgerichtet, müssen doch konkrete Anhaltspunkte für die Eignung zur nachteiligen Veränderung des Gewässers gegeben sein, die wegen der höheren Schutzbedürftigkeit für Grundwasser allerdings geringer ausfallen müssen: insoweit genügt eine im Vergleich zum Oberflächenwasser entferntere Wahrscheinlichkeit. (Schmid 2011, § 9, Rn. 74, unter Verweis auf OVG Münster 1995). Die Geothermie ist deshalb davon erfasst, weil Bohrungen regelmäßig weniger das *Oberflächenwasser* als vielmehr das *Grundwasser* gefährden können. Allerdings genügen nicht bloße Besorgnisse entsprechend dem wasserrechtlichen Besorgnisgrundsatz (Czychowski und Reinhardt 2014). Weit entfernt liegende Möglichkeiten einer schädlichen Einwirkung auf ein Gewässer begründen daher noch keine Erlaubnispflichtigkeit (Schmid 2011, § 9, Rn. 74).

Die *Anzeigepflicht* des § 49 Abs. 1 WHG wird für bergbauliche und auch für andere Maßnahmen, für die eine Genehmigungs- und Anzeigepflicht nach anderen Rechtsvorschriften wie namentlich dem BBergG besteht, hingegen als nicht einschlägig angesehen (Böhme 2011, § 49, Rn. 3 a. E.). Damit geht die Anzeigepflicht gem. § 127 BBergG vor. § 49 Abs. 1 WHG kommt danach nur für Bohrungen bis zu 100 m Tiefe in Betracht.

9.2.5.3 Folgen und Weiterungen für die Haftung

Allerdings verweist § 127 BBergG nicht auf die *Bergschadenshaftung* nach §§ 114 ff. BBergG. Daher ist sie eigentlich auf dieser Grundlage ausgeschlossen, werden doch nur

bestimmte Vorschriften benannt. Indes ist sie das Korrelat der potenziellen Gefährlichkeit bergbaulicher Vorgänge, die der Einzelne hinzunehmen hat und bei denen er zu Schaden kommen kann. Ausdruck dieser potenziellen Gefährlichkeit sind das bergrechtliche Betriebsplanverfahren und die Bergaufsicht nach §§ 69 ff. BBergG. Diese greifen auch für Bohrungen mit einer Tiefe von über 100 m ein, wenn sie eine entsprechende Bedeutung haben bzw. Gefährdung aufweisen. Die Bergschadenshaftung bildet nur den letzten Baustein eines umfassenden Schutzes. Das spricht dafür, sie ebenfalls eingreifen zu lassen, wenigstens aber ihre Wertungen auf die allgemeine zivilrechtliche Haftung zu übertragen.

Mit dem *Fracking-Gesetz* soll die *Bergschadensvermutung* in § 120 BBergG zwar auch auf den *Bohrlochbergbau* erstreckt werden (s. näher BT-Drs. 18/4714, S. 13 ff. sowie Frenz und Slota 2015). Damit wird allerdings das Vorliegen einer Bohrung mit dem Bergbau verknüpft. Mithin werden Bohrungen nicht umfassend einbezogen. Im Gegenteil werden diese a priori jedenfalls nicht von der Bergschadensvermutung erfasst. Vielmehr wird dadurch die Unterscheidung zwischen *Bohrungen* im Rahmen des Bergbaus und gewöhnlichen Bohrungen und damit solchen im Rahmen rein grundstücksbezogener bzw. privater Nutzung fortgeführt und implantiert.

Allerdings ist unabhängig davon an eine schutzbezogene Konzeption zu denken: Entscheidend für das Eingreifen bergrechtlicher Wertungen ist das durch eine Geothermiebohrung hervorgerufene Gefährdungspotential, auch wenn die Tiefe bei höchstens 100 m liegt. Vergleichbar geht der EuGH bei der UVP-Pflichtigkeit über einen bestimmten Wortlaut hinaus und stellt dabei maßgeblich auf die möglichen Umweltauswirkungen ab (s. EuGH 1996; Frenz 1997, Rn. 404).

Konflikte zwischen nach Bergrecht genehmigungsbedürftigen Bohrungen und einer Nutzbarmachung von Erdwärme im Zusammenhang mit der baulichen Nutzung von Grundstücken können deshalb auftreten, weil eine bergrechtliche Bewilligung nach § 8 Abs. 1 BBergG zwar ein ausschließliches Recht gewährt, aber nicht die Gewinnung von Erdwärme im Zusammenhang mit der baulichen Nutzung von Grundstücken erfasst, bedarf diese doch gerade keiner Bergbauberechtigung (s. Abschn. 9.2.1). Sie wird daher durch die Bewilligung nicht ausgeschlossen. Werden beide Tätigkeiten in einem bestimmten Feld durchgeführt, können unterschiedliche Haftungsregime aufeinander prallen, nämlich das nach §§ 114 ff. BBergG sowie das ausschließlich nach § 823 BGB.

Aber auch in den Fällen, in denen das Bergrecht keine (vollständige) Anwendung findet, ist zu bedenken, dass eine *Erdwärmebohrung* bereits dann unter das Bergrecht fallen kann, wenn sie mehr als 100 m in den Boden eindringen soll. Die Anwendung des Bergrechts ist von daher quantitativ. Die Tätigkeit als solche kann also bergbaurelevant sein. Das spricht dafür, auch für Bohrungen, die bei entsprechendem Zuschnitt unter das BBergG fallen können, dessen Haftung aber nach dem Gesetzeswortlaut nicht unterstehen, umfassend zumindest dessen Wertungen eingreifen zu lassen, sind sie doch für typischerweise bergbauliche Tätigkeiten entwickelt worden.

Da Bohrung und Gewinnung sehr eng miteinander zusammenhängen und aufeinander bezogen sind, ist eine Trennung künstlich. Daher können die im Folgenden dargelegten Grundsätze zur bergrechtlichen Haftung auch Anhaltspunkte geben, wer nach § 823 BGB bei der Gewinnung von Erdwärme haften soll, der eine Bohrung vorausgeht, die aber

gleichwohl nicht unter das BBergG fällt, sondern nur der Haftung aufgrund der Verletzung von *Verkehrssicherungspflichten* nach § 823 Abs. 1 BGB untersteht. Vielfach zeigen sich die Konsequenzen einer solchen Bohrung erst in deren Folge und damit bei der (späteren) Gewinnung.

Spezifisch für die Gewinnung von Erdwärme wurden bisher keine bergrechtlichen Haftungsgrundsätze entwickelt. Geht es allerdings wie in *Staufen* um das Eindringen von Grundwasser, eine im Gefolge davon auftretende Bodenhebung und eine daraus folgende Schadensbildung, besteht als Parallelproblematik die Frage, wer haftet, wenn im Gefolge des Kohlenbergbaus das Grundwasser ansteigt und etwa Keller vernässt: In beiden Fällen geht es um eine Schadensbildung infolge von nachdrängendem Grundwasser, wofür sich die Frage einer hinreichenden Kausalität einer vorgelagerten bergbaulichen bzw. geothermiebezogenen Tätigkeit stellt. Höchstrichterlich verneint wurde bislang, dass eine Kommune aus *Staatshaftung* in Anspruch genommen werden kann, wenn sie ein Baugebiet ausgewiesen hat, in dem Häuser aus einem späteren *Grundwasserwiederanstieg* nasse Keller bekommen (OLG Düsseldorf 2002; die dagegen gerichtete Revision nahm der BGH 2004 nicht zur Entscheidung an; ebenso OLG Düsseldorf 2004 im Anschluss an BGH 1999 für Bergschäden). Parallel liegt der Fall der Ausweisung eines *Baugebiet*es im Bereich einer abgeschlossenen Geothermiebohrung. Das berührt aber nicht die Grenzen baulicher Tätigkeit gem. §§ 107 ff. BBergG im Vorfeld bzw. während einer solchen Bohrung sowie vor allem nicht die Frage der Haftung, wenn in deren unmittelbarem Gefolge Schäden auftreten.

9.3 Bergrechtliche Haftung für Schäden aus Geothermiebohrungen

9.3.1 Reichweite

Die bergrechtliche Haftung für Schäden aus *Geothermiebohrunge*n erfasst jedenfalls den *Bohrlochbergbau*: Ist insoweit auch (noch) keine *Bergschadensvermutung* etabliert, so zeigt doch die geplante Aufnahme in § 120 BBergG nach dem *Fracking-Gesetz*, dass der Bohrlochbergbau jedenfalls der bergrechtlichen *Bergschadenshaftung* unterliegt. Bei davon unabhängigen Bohrungen hängt dies davon ab, ob diese bergrechtliche Haftung trotz fehlenden Verweises in § 127 BBergG darauf gleichwohl wegen der vergleichbaren Gefährdungslage einbezogen wird (Abschn. 9.2.5.2). Bei Bohrungen bis 100 m Tiefe kommt man dazu nur bei einer Übertragung der bergrechtlichen Wertungen in die allgemeine zivilrechtliche Haftung für unerlaubte Handlungen.

9.3.2 Bohrbezug

Entsprechend der zivilrechtlichen Gefährdungshaftung nach § 114 BBergG haften Bergbauunternehmen für Sach- und Personenschäden „infolge der Ausübung“ einer

bergbaulichen Tätigkeit. Verschulden ist nicht notwendig. Es existiert eine *Bergschadensvermutung* nach § 120 BBergG, die allerdings nur für den Einwirkungsbereich der untertägigen Aufsuchung oder Gewinnung und dabei für Senkungen, Pressungen sowie Zerrungen an der Oberfläche und Erdrisse gilt, mithin nicht für den Wasser(wieder)anstieg. Für diesen ist eine bergrechtliche Haftung bereits insofern fraglich, als er der bergbaulichen Tätigkeit nachgelagert ist. Damit stellt sich die Frage eines hinreichenden *Betriebszusammenhanges*, erstreckt sich doch die Bergschadenshaftung nur auf Schäden, die durch bergbauliche Vorgänge hervorgerufen wurden. Diese Vorgänge bilden hier die Bohrungen. Damit bedarf es eines hinreichenden Bohrbezugs.

Die Frage des hinreichenden Betriebszusammenhangs wurde für einen späteren Grundwasserwiederanstieg nach eingestelltem Bergbau thematisiert (insoweit eine Haftung ablehnend Beyer 2005, S. 107; umfassend dazu in einem bejahenden Sinn Frenz 2007, S. 49 ff). Gerade im Zusammenhang mit Folgenutzungen kann der Weiterbetrieb der *Wasserhaltung* notwendig sein, etwa um das Wasser dauerhaft niedrig zu halten (Kremer und Neuhaus 2001, Rn. 248). Auf diese Weise gelangen sogar die Folgewirkungen des Bergbaus und deren Behebung in einen betrieblichen Zusammenhang. Soweit die Haftung für Bergschäden einen Bezug zur vom Bergbau in Anspruch genommenen Oberfläche erfordert, handelt es sich hier um Folgewirkungen bei deren Gestaltung. Dann aber ist erst recht eine Veränderung der Umgebung während des Bergbaus und damit etwa einer dem Bergrecht unterfallenden *Geothermiebohrung* relevant.

Die *Einstellung der Wasserhaltung* bildet den Schlusspunkt bergbaulich begründeter Regulierung des Grundwasserstandes. Das gilt auch bei einer Beeinflussung durch eine *Geothermiebohrung*, wenn in deren Gefolge Wasser nachkommt oder in eine Bodenschicht eindringt, die sich dann vollsaugt und zu Hebungen an der Oberfläche führt. Eigentlich bedarf es dann einer Wasserhaltung. Wird sie eingestellt oder gänzlich unterlassen, ist dieser Vorgang bei einem Bezug zu einer vorgelagerten Tätigkeit betrieblich bedingt, selbst wenn er nur zur Rückkehr des früheren Grundwasserstandes führt. Dieser wäre ohne bergbauliche Einflüsse auch nie verlassen worden. Daraus können sich weitreichende Folgewirkungen für benachbarte oder auch entferntere Grundstücke im Wassereinzugsbereich ergeben, die unmittelbar an die Gestaltung der vom Bergbau in Anspruch genommenen Fläche gekoppelt sind. Als damit notwendig verbundene Auswirkungen unterfallen sie der Haftung für Bergschäden. Das gilt erst recht, wenn der ursprüngliche Wasserstand überschritten wird oder bei einer Geothermiebohrung Wasser in eine Bodenschicht eindringt, die vorher gegen Wasser abgeschirmt war.

Dabei können sich auch noch Jahre nach Einstellung der Abbauaktivitäten Gefahren zeigen. Mit aufsteigendem *Grubengas* (darauf bezogen VGH Mannheim 2000) vergleichbar ist ansteigendes Wasser. Diese für den Pflichtenumfang nach dem öffentlichen Recht maßgeblichen Gesichtspunkte können auch für das Zivilrecht nicht unbeachtlich sein. Indem das BBergG ausweislich der Zweckvorschrift des § 1 auch Vorsorge gegen Gefahren aus bergbaulicher Tätigkeit für Leben, Gesundheit und Sachgüter trifft, schreiben die diesen Zweck ausfüllenden Vorschriften die dafür notwendigen Standards fest.

9.3.3 Kausalität

Grundvoraussetzung für eine Haftung ist, dass die Schäden auf den Bergbau zurückzuführen sind. Gem. § 114 Abs. 1 BBergG muss ein Bergschaden explizit „infolge" bergbaulicher Tätigkeiten eingetreten sein. Dieser ursächliche Zusammenhang verlangt, dass der Schaden die unmittelbare oder mittelbare Folge des Bergbaubetriebes ist (bereits Boldt und Weller 1984, § 114, Rn. 10). Ohne eine Absenkung des Grundwasserstandes ist der Abbau von Bodenschätzen vielfach nicht möglich. Sie wird dann gezielt herbeigeführt. Der Wiederanstieg ist die Gegenbewegung dazu. Indes wird dieser Vorgang nicht mehr künstlich hervorgerufen, sondern kommt auf natürliche Weise zustande. Das gilt auch, wenn im Gefolge einer *Geothermiebohrung* Wasser nachdrängt, in eine Bodenschicht gelangt, der Boden ansteigt und sich daher Risse in Gebäuden bilden. Daher erscheint auf den ersten Blick bereits die natürliche Kausalität fraglich (siehe Spieth und Wolfers 1997; anders Hermanns 2005). Jedenfalls wird beim Grundwasserwiederanstieg eine adäquate Verursachung verneint, weil nur ein natürlicher Zustand wiederhergestellt wird (Knöchel 2000). Von einem solchen weicht aber eine Hebung des Bodens aufgrund eindringenden Wassers im Gefolge einer Geothermiebohrung wie im Fall Staufen gerade ab.

Für das Bergschadensrecht wird zur sinnvollen Begrenzung der Kausalität auf das Erfordernis des *adäquaten Ursachenzusammenhangs* nach zivilrechtlichen Grundsätzen zurückgegriffen (Boldt und Weller 1984, § 114, Rn. 38 f, auch zum Folgenden). Danach ist ein ursächlicher Zusammenhang auch i.S.v. § 114 Abs. 1 BBergG dann gegeben, wenn sich ein Ereignis allgemein dafür eignet, den eingetretenen Erfolg herbeizuführen. Es muss die Möglichkeit eines Erfolges der eingetretenen Art generell nicht unerheblich erhöht haben (BGH 1951). Mithin darf es sich nicht nur um besonders eigenartige, ganz unwahrscheinliche Umstände handeln, die nach dem regelmäßigen Verlauf der Dinge außer Betracht zu lassen sind (BGH 1971). Das ist nach fester Rechtsprechung namentlich dann der Fall, wenn der Geschädigte oder ein Dritter in völlig ungewöhnlicher und unsachgemäßer Weise in den schadensträchtigen Geschehensablauf eingreift und eine weitere Ursache setzt, die den Schaden erst endgültig herbeiführt (BGH 1985). Eine solche Unterbrechung des Kausalzusammenhangs kommt bei einer Bebauung insbesondere dann infrage, wenn diese unsachgemäß erfolgte. Ansatz dafür ist eine nicht hinreichende Abschätzung eines Grundwasserwiederanstiegs auf das bisherige Niveau, welche das OLG Düsseldorf vom Bauherrn bzw. Architekten für 30 Jahre rückwirkend verlangte (OLG Düsseldorf 2002).

Ob es ganz ungewöhnlich ist, dass eine Geothermiebohrung zu *nachdrängendem Wasser*, zu *Bodenhebungen* und in deren Gefolge zu *Rissen* führt, ist bislang nicht entschieden. Maßgeblich ist, inwieweit der Untergrund vorher untersucht werden musste, um eine solche Entwicklung zu erkunden und auszuschließen. Ansonsten bräuchte derjenige, der eine Geothermiebohrung durchführt, nur die Augen zu verschließen und jegliche Voruntersuchung zu unterlassen, um später nicht für Schäden haften zu müssen. Es kommt daher vielmehr auf die objektive Sachlage an. Aufgrund dieser müssen bei vernünftiger Betrachtung und bei gewöhnlichem Geschehensablauf Schäden praktisch ausgeschlossen sein.

Die Maßstäbe bei dieser Beurteilung sind streng. Auf Seiten des Bergbauunternehmers sind alle zur Zeit des Ereignisses dem optimalen Beobachter erkennbaren und zudem die spezifisch dem Urheber bekannten Umstände zu berücksichtigen (Boldt und Weller 1984, § 114, Rn. 38 unter Rückgriff auf die allgemeine Zivilrechtsprechung). Dazu gehört etwa nicht eine völlig unvorhersehbare Entwicklung wie der Eintritt der industriellen Revolution im Ruhrgebiet, die zu einer starken und damit gewichtigeren Bebauung führte, sodass Bergschäden an einem entsprechend großen Gebäude infolge von Bergbauaktivitäten aus dem 18. Jahrhundert entstanden (OLG Hamm 1970). Abgesehen von solchen Sonderfällen wird allgemein eine Haftung für Bergschäden – mit der herrschenden Lehre – „schon bei einer Mitursächlichkeit des Abbaus – hier 10 % bis 20 %" – angenommen (Boldt und Weller 1984, § 114, Rn. 38).

Wie weit der Ursachenzusammenhang auf der Basis der *Adäquanzlehre* unter Einbeziehung auch mittelbarer Ursachenzusammenhänge gezogen wird, zeigen gerade Beispiele mit Auswirkungen auf Gewässer. So bejahte bereits das Reichsgericht den Ursachenzusammenhang, wenn bergbauliche Aktivitäten zum Zusammenbruch einer Schlotte führen, dadurch der Wasserspiegel eines Sees sinkt, deshalb seine Zuflüsse in einen Wasserlauf enden und damit letztlich einer Fabrik das für den Betrieb notwendige und aus diesem Wasserlauf entnommene Wasser entzogen wird (RG 1898).

Damit werden auch sehr weit entfernte Auswirkungen über mehrere Stationen einbezogen, sofern nur die Rückführbarkeit auf bergbauliche Aktivitäten gegeben ist. Daher ist die Adäquanz bei *Gebäudeschäden* oder sonstigen *Vernässungen* wegen ein- bzw. nachdrängenden Grundwassers zu bejahen, auch wenn erst durch den natürlichen Lauf bzw. Anstieg des Grundwassers der Schaden eintritt. Bei Geothermiebohrungen genügt, wenn diese dafür mitursächlich waren und etwa eine vorher angelegte Entwicklung erst auslösten, mithin eine bislang gesperrte, aber von der Bodenbeschaffenheit einer Nachbarschicht her mögliche Eindringung von Wasser ermöglichten.

9.3.4 Sozialadäquanz

Hat das Bergbauunternehmen den jeweiligen Betriebsplan eingehalten, folgt daraus nicht etwa automatisch die Sozialadäquanz seines Verhaltens, welche als Ansatzpunkt fungieren könnte, um einen adäquaten Kausalzusammenhang zu verneinen. Die Bergschadenshaftung bildet eine *Gefährdungshaftung*, die gerade auch bei Einhaltung der bergrechtlichen Pflichten greift, weil der Bergbau eine gefährdungsbehaftete Tätigkeit bildet. Die ihn ermöglichenden Betriebspläne können Schadensfolgen nicht gänzlich hindern; der Eintritt von Schäden wird vielmehr vorausgesetzt. Für die bergrechtliche Haftung spielt es mithin keine Rolle, ob die Schäden aufgrund rechtmäßiger oder rechtswidriger Tätigkeiten des Bergbauunternehmens zustande gekommen sind (OVG Münster 1984).

Hintergrund ist die *latente Gefährdung* der Umgebung durch Betriebshandlungen des Bergbaus, die von vornherein eine im Verhältnis zum Normalmaß erhöhte Gefahrentendenz haben (VGH Mannheim 2000; OVG Münster 1984). Diese schließt auch die

im Ordnungsrecht geltende Regel aus, dass sozialübliches Verhalten keine Überschreitung der *Gefahrschwelle* darstellen kann (OVG Münster 1985; OVG Lüneburg 1961; VG Düsseldorf 1998), mithin grundsätzlich derjenige nicht als Störer anzusehen ist, der lediglich eine von der Rechtsordnung vorgesehene Möglichkeit der Rechtsausübung in sozialüblicher Weise wahrgenommen hat. Die Betriebsplanzulassung stellt nicht von einer Verantwortlichkeit dafür frei, dass durch die zugelassenen Betriebshandlungen Störungen auftreten (VGH Mannheim 2000).

9.3.5 Schutzzweck

Die Adäquanzbeurteilung ist um eine wertende Betrachtung unter dem Blickwinkel des Schutzzwecks der Norm zu ergänzen. Entsprechend dem rechtlichen Kontext und der Formulierung „infolge“ in § 114 Abs. 1 BBergG kann es im Rahmen der Bergschadenshaftung nur um den Ausgleich der Beeinträchtigungen gehen, die vom Bergbau stammen. Darauf ist der Schutzzweck der Norm begrenzt. Es wird zwar sehr deutlich ein hinreichender Bezug zur bergbaulichen Tätigkeit verlangt (BVerwG 1995 bezogen auf die Nachsorgepflichten). Dieser wird aber in weitgehendem Umfang auch für Gewässerverunreinigungen bejaht, die natürliche Vorgänge bilden, indes durch den Bergbau begünstigt und damit letztlich erst ausgelöst wurden (BVerwG 1995; näher dazu Frenz 2016a). So verhält es sich im Ergebnis auch im Hinblick auf *nachdrängendes Grundwasser*, das vor der Bohrung von einer Bodenschicht abgehalten wurde, die sich mit Wasser vollsaugen kann.

Im Rahmen des Bergbaus ist generell zu berücksichtigen, dass diesem Vorgang eine gewisse Gefährlichkeit immanent ist. Das belegen die zahlreichen Vorkehrungen gegen Schädigungen von Gesundheit und Eigentum im Bundesberggesetz von der Zweckvorschrift des § 1 über die Betriebsplanzulassungsvoraussetzungen des § 55 bis hin zu den Bergschadensregelungen in §§ 110 ff. Im Ordnungsrecht verweist die Rechtsprechung im Zusammenhang mit der Zuweisung von Verantwortung darauf, dass allen betrieblichen Vorgängen des Bergbaus wegen des Eingriffs in die Erdkruste von vornherein eine erhöhte Gefahrtendenz innewohnt und mit *Gefahren für die Oberfläche* gerechnet werden muss (OVG Münster 1984). Solche Gefahren können gerade auch bei Bohrungen auftreten.

Von daher sind alle Vorgänge, die mit den Gegebenheiten des Bergbaus zusammenhängen und eine gewisse Schadensanfälligkeit aufweisen, grundsätzlich als vom *Schutzzweck bergrechtlicher Normen* umfasst anzusehen. Der Bergbauunternehmer muss daher sicherstellen, dass von den durch ihn geschaffenen und genutzten Anlagen keine Gefahren ausgehen können. Schließlich hat er diese Anlagen auch hergestellt und muss deshalb das auf diese Weise entstandene Gefährdungspotenzial neutralisieren (zu wasserrechtlichen Fragen ausführlich Frenz 2003, S. 78 ff., 109 ff). Das gilt erst recht, wenn sich ein latent vorhandenes Gefährdungspotential durch eine Geothermiebohrung aktualisiert, indem bislang zurückgehaltenes Grundwasser in eine zu seiner Aufnahme bereite Bodenschicht eindringt und dadurch den Boden hebt, was zu Rissen an darüberliegenden Gebäuden führt.

Generell ist Ziel der für den Rohstoffabbau wie für die anschließende Wiedernutzbarmachung maßgeblichen Vorschriften, die an der Oberfläche vom Bergbau potenziell gefährdeten Rechtsgüter umfassend zu schützen. Das ergibt sich schon aus der Zweckvorschrift des § 1 BBergG, nach deren Nr. 3 das Bundesberggesetz die Vorsorge gegen Gefahren, die sich aus bergbaulicher Tätigkeit für Leben, Gesundheit und Sachgüter Dritter ergeben, und den Ausgleich unvermeidbarer Schäden bezweckt. Diese Zielrichtung wird verfassungsrechtlich dadurch bestärkt, dass die betroffenen Rechtsgüter Leib, Leben und Eigentum allesamt dem Grundrechtsschutz unterliegen. Damit einher geht eine weitreichende Verantwortung für die Vermeidung und ggf. Nachsorge sowie die Folgenbewältigung (s. BVerwG 2005; Beckmann 2006; Frenz 2002, S. 16ff).

Danach musste die Eigentümerin eines Erzbergwerkes auch Sicherheitsvorkehrungen gegen sogenanntes *Sauerwasser* treffen, obwohl nach ihrer Ansicht die nachteiligen Wirkungen, die abgewendet werden sollten, in keinerlei Weise durch ihre Bergbautätigkeit verursacht worden waren (BVerwG 1995). Im Urteil Meggen musste der Bergbauunternehmer die Grube wegen des eindringenden Grund- und Kluftwassers entwässern, um eine Vermengung und eine Ausbreitung der Belastung mit Schwermetallen zu vermeiden (BVerwG 2014). Damit ist die Wasser(rein)haltung notwendiger Bestandteil des Bergbaubetriebes und ihre Unterlassung bzw. Einstellung selbst ein Betriebsrisiko, das sich im *Steigen des Wasserspiegels* und daraus resultierenden Gefährdungen etwa an davon betroffenen Häusern realisiert. Das gilt erst recht, wenn Wasser unmittelbar im Gefolge einer Geothermiebohrung in eine aufnahmebereite Bodenschicht eindringt und sich dadurch die Erdoberfläche hebt.

9.3.6 Zwischenergebnis

Bergbauunternehmen haften für Schäden aus einem Anstieg bzw. Nachdrängen von Grundwasser auf der Basis von § 114 Abs. 1 BBergG. Das kann auch für Geothermiebohrungen gelten, jedenfalls soweit sie dem Bergrecht unterfallen. Die bergbauliche Tätigkeit ist adäquat kausal, soweit die Grundwasserveränderung mit Hebung der Oberfläche bergbaubedingt ist. Beruht diese Veränderung (auch) auf natürlichen Abläufen, wurde sie doch zumindest bergbaulich angestoßen. Bergrechtlich ergibt sich eine umfassende Pflichtenverantwortung und die Notwendigkeit, das Wohl der Allgemeinheit zu wahren, wozu auch private Eigentümerbelange gehören. Soweit die Bergschadenshaftung nicht eingreift, können zumindest ihre Wertungen auch auf die allgemeine zivilrechtliche Haftung übertragen werden, handelt es sich doch um einen bergbauspezifischen Vorgang, wie § 127 BBergG belegt.

9.4 Betriebsplanpflicht

Handelt es sich um Geothermiebohrungen im Rahmen des Bergbaus, besteht nach § 51 Abs. 1 BBergG Betriebsplanpflicht. Eine solche besteht auch dann, wenn sie von der

Bergbehörde auf der Basis von § 127 BBergG angeordnet wurde. Allerdings ist spezifisch für Geothermiebohrungen kein *Rahmenbetriebsplan* festgelegt. Die UVP-V Bergbau enthält insoweit keine Bestimmung. Bedarf es danach gem. § 52 Abs. 2a BBergG keines Rahmenbetriebsplans, genügt ein Hauptbetriebsplan. Dieser wird nach § 52 Abs. 1 BBergG regelmäßig für zwei Jahre erteilt, kann aber auch fünf Jahre umfassen, wenn es sich um keine dynamische Tätigkeit handelt. Bei Geothermiebohrungen können zwar Schwierigkeiten auftreten, wenn das Gestein sich anders gestaltet als bei den Vorerkundungen projektiert. Indes handelt es sich nicht um eine Tätigkeit, deren Planung wie etwa beim Steinkohlenbergbau aufgrund nicht genau vorhersagbarer Rahmenbedingungen und geologischen Formationen regelmäßig in raschen Abständen angepasst werden muss. Die Regelfrist von zwei Jahren ist durch die Unsicherheit der *bergbaulichen Prognosen* und dabei insbesondere der sich ändernden geologischen Verhältnisse bedingt (Piens 2013, § 52, Rn. 14; VG Neustadt 1997).

Werden die Bohrungen im Hinblick auf den genehmigten Aufsuchungsbetrieb durchgeführt, bedarf es bereits vor ihrer Aufnahme eines *Hauptbetriebsplans*. Davon ist bei einem eingereichten Arbeitsprogramm als Grundlage für die Aufsuchungserlaubnis auch auszugehen, sodass näher zu begründen wäre, wenn eine Bohrung noch keine Aufsuchungstätigkeit darstellt, sondern etwa nur zu Lehr- und Unterrichtszwecken durchgeführt wird (Abschn. 9.2.2). Im Übrigen aber muss näher dargestellt werden, in welchem Umfang Erdwärme aufgesucht wird, wie dies technisch durchgeführt wird und mit welcher Dauer. Zudem muss der Nachweis geführt werden, dass die in § 55 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 und 3-13 BBergG aufgestellten Voraussetzungen erfüllt sind und dass der Aufsuchung keine überwiegenden öffentlichen Interessen nach § 48 Abs. 2 BBergG entgegenstehen.

Damit ist insbesondere darzulegen, dass die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für die Gesundheit Dritter getroffen wurde, mithin dass es durch die Bohrung nicht zu Gefährdungen für die Gesundheit kommt. Im Hinblick auf das Urteil Bergwerk West ist auch einzubeziehen, dass keine Antastungen des Grundwassers erfolgen, die sich negativ auf die Gesundheit auswirken können. Solche Auswirkungen dürfen auch in Zukunft nicht möglich sein. Das BVerwG hat im Bergwerk-West-Urteil auch einen langandauernden Hochwasserschutz als Prüfungspunkt für das zuzulassende Steinkohlenbergwerk unter dem Rhein angesehen (BVerwG 2010; näher Frenz 2011). Jedenfalls sind *wasserwirtschaftliche Belange* im Rahmen von § 48 Abs. 2 BBergG relevant. Allerdings müssen sie nur als solche erfüllbar sein. Die Detailprüfung bleibt dann einer wasserrechtlichen Erlaubnis vorbehalten (siehe zu dieser Stufung BVerwG 2010; Frenz 2011). Solche Belange stehen nicht entgegen, wenn eine Geothermiebohrung durch wasserundurchlässige Gesteinsschichten hinreichend abgeschirmt ist und eine laufende Beobachtung sichergestellt ist.

Auch *immissionsschutzrechtliche Anforderungen* sind gewahrt, wenn Gebäude von der Bohrstelle weit genug entfernt sind.

Der Hauptbetriebsplan kann so konzipiert sein, dass er die gesamte Bohrstelle umfasst. Dann wären Bohrungen zur Aufsuchung von Erdwärme grundsätzlich zugelassen. Es müssten für einzelne Bohrungen allerdings gem. § 52 Abs. 2 Nr. 2 BBergG noch *Sonderbetriebspläne* eingeholt werden. Insoweit ist höchstens dadurch eine Erleichterung möglich,

dass schon die Art und die Zahl der Bohrungen im Rahmen des Hauptbetriebsplans so genau beschrieben werden, dass sie als solche davon umfasst und zugelassen sind. Dann bedarf es nur noch der Anzeige, wenn im Rahmen dieses Hauptbetriebsplans präzise beschriebene Bohrungen im Einzelnen durchgeführt werden. Dies dient vor allem dem Aufzeigen, wie der Abbaufortschritt verläuft.

Ansonsten sind bestimmte Aufsuchungstätigkeiten wie einzelne Bohrungen und die sie begleitenden Maßnahmen in Form entsprechender Sonderbetriebspläne zu beantragen. Die Genehmigungsfähigkeit als solche steht nach dem Hauptbetriebsplan fest. In diesem sind dann allerdings alle Punkte zu prüfen, welche einem Vorhaben entgegenstehen können. Das sind dann auch die Elemente, die bei dem Erfordernis eines Rahmenbetriebsplans auf dieser Ebene durchgeprüft werden müssten. Es bedarf dann auf der Ebene des Hauptbetriebsplans einer Abwägung zwischen den für die Aufsuchungstätigkeit sprechenden Belangen und den gegenläufigen Interessen. Allerdings werden keine gewichtigen Interessen entgegenstehen. Daher muss auch nicht derart umfassend abgewogen werden, wie dies das BVerfG in seiner Garzweiler-Entscheidung (BVerwG 2013) für Rahmenbetriebspläne für den Braunkohlentagebau bzw. für Enteignungen zu diesem Zweck und für Hauptbetriebspläne vorgesehen hat, welche ergehen müssen, weil eben noch keine Rahmenbetriebsplanzulassung stattgefunden hat.

9.5 Verbindung zu Fracking

Schon länger besteht in Nordrhein-Westfalen ein *Moratorium für Fracking*. Maßnahmen im Zusammenhang mit *Fracking* können nicht genehmigt werden, bis die Risiken aus Fracking geklärt sind. Insoweit bestanden bis zum Erlass des Frackings-Gesetzes am 24.6. und 8.7.2016 rechtliche Bedenken (Frenz 2016b). Nunmehr darf nach Maßgabe von §13a Abs. 1 WHG eine Geothermiebohrung mit dem Einsatz von *Frackingtechnologie* nicht durchgeführt werden. Nur §13a Abs. 4 WHG ermöglicht sie außerhalb der ausgeschlossenen Bereiche beim Einsatz höchstens schwach wassergefährdender Gemische und bei Einhaltung des Standes der Technik. Dann kann der Erlass des Landes Nordrhein-Westfalen nicht entgegenstehen. Daraus lässt sich daher keine Ablehnung einer Betriebsplanzulassung herleiten.

Der generelle Ausschluss von Fracking gilt allerdings auch für konkret geplante *Tiefbohrungen* (s. BT-Drs. 18/8916). Bei ihnen geht es darum, mit konventioneller Säuerungstechnik ein Freispülen zu erreichen. Bestehende Bruchstrukturen sollen aufgesucht, gefunden und aktiviert werden. Innerhalb natürlicher Strukturen sollen *Wärmetauscher* installiert werden. Ziel ist eine *Zirkulation in Extensionsstrukturen*.

Bei einer solchen Konzeption wird auch im Hinblick auf die Tiefbohrung dem im Erlassweg aufgestellten Moratorium des Landes NRW wie auch dem Fracking-Gesetz Genüge getan, die unkonventionelle Frackingprojekte nicht genehmigungsfähig machen. Angesprochen werden im NRW-Moratorium auch Geothermiebohrungen von über 1000 m mit und auch ohne *Frac-Maßnahmen*, für die „die hier gewonnenen Erkenntnisse … auf

Geothermiebohrungen mit Frac-Behandlung ggf. übertragen werden“ können (Ministerien für Wirtschaft und Umwelt des Landes NRW 2011). Zum einen handelt es sich regelmäßig um eine *Geothermiebohrung ohne Frac-Maßnahmen*. Sie ist so ausgerichtet, dass sie die Extensionsstrukturen nutzt und damit ohne chemische Substanzen auskommt. Es wird lediglich mit *konventioneller Säuerungstechnik* gearbeitet. Damit können die dabei gewonnenen Erkenntnisse nicht auf Geothermiebohrungen mit Frac-Behandlung übertragen werden. Dies ist von vornherein ausgeschlossen.

Zum anderen stellt sich die Frage, wie diese Formulierung in dem genannten Erlass zu verstehen ist. Systematisch ist sie verbunden mit dem in der Überschrift genannten Gutachten mit Risikostudie zur Exploration und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Nordrhein-Westfalen und deren Auswirkungen auf den Naturhaushalt, insbesondere die öffentliche Trinkwasserversorgung. Damit kann der fragliche Satz auch so verstanden werden, dass die in diesem Gutachten gewonnenen Erkenntnisse auf *Geothermiebohrungen mit Frac-Behandlung* gegebenenfalls übertragen werden können. Danach wären ohnehin nur Geothermiebohrungen mit Frac-Behandlung ausgeschlossen, bei denen die Erkenntnisse aus dem genannten Gutachten greifen. Sie müssten damit tatsächlich so gelagert sein wie das Fracking außerhalb von Geothermiebohrungen, sodass sich die in dem Gutachten gewonnenen Erkenntnisse übertragen lassen. Bei dieser Sicht wäre es völlig unproblematisch auch vor dem Hintergrund des Erlasses vom Wirtschafts- und Umweltministerium Nordrhein-Westfalen, Geothermiebohrungen größer 1000 m ohne Frac-Maßnahmen zu genehmigen. Das gilt auch nach dem neuen Fracking-Gesetz.

9.6 Gesamtfazit

Geothermiebohrungen unterliegen weitestgehend dem Bergrecht, und zwar sowohl was die Zulassung als auch die Haftung anbetrifft. Ausgenommen sind im Wesentlichen *private Grundstücksnutzungen* sowie *Bohrungen zu Lehr- und Unterrichtszwecken* – nicht aber *Erprobungsbohrungen*. Insoweit gelten aber immer noch *wasserrechtliche Anforderungen*, die stets einzuhalten sind. Für Geothermiebohrungen mit Frac-Maßnahmen greift das Verbot unkonventionellen Frackings nach dem neuen Fracking-Gesetz; dieses ist allerdings auf Bohrungen ohne Frac-Maßnahmen nicht zu übertragen.

Literatur

Beckmann, M.: Grenzen der Zumutbarkeit der Nachsorgeverantwortung eines Bergwerksunternehmens? S. 295 ZUR, Nomos, Baden-Baden (2006)

Bergbehörde NRW: Nutzbarmachung geothermischer Energie (Erdwärme) in Nordrhein-Westfalen, unveröffentlichte Position der Bergbehörde NRW (2009). Stand: 2.4.2009.

Beyer, S.: Die Verantwortung für Gefahren bei der Überplanung und Bebauung risikobehafteter Flächen. Boorberg, Stuttgart (2005)

BGH, Urt. v. 23.10.1951 – I ZR 31/51, BGHZ 3, 261 (266); 57, 245 (255)
BGH, Urt. v. 14.10.1971 – VII ZR 313/69, BGHZ 57, 137 (141)
BGH, Urt. v. 14.03.1985 – IX ZR 26/84, NJW 1986, 1329 (1330); Urt. v. 7.1.1988 – IX ZR 7/87, NJW 1988, 1262 (1263)
BGH, Urt. v. 29.7.1999 – III ZR 234/97, NJW 2000, 427
BGH, Beschl. vom 29.4.2004 – III ZR 31/03
Böhme: Berendes/Frenz/Müggenborg, WHG, 2011, § 49, Rn. 3 a.E.
Boldt, G., Weller, H.: BBergG. Kommentar. De Gruyter, Berlin (1984)
BVerwG, Urt. v. 9.11.1995 – 4 C 25/94, BVerwGE 100, 31 (40); 151, 156 – Meggen
BVerwG, Urt. v. 14.4.2005 – 7 C 26/03, NVwZ 2005, 954 (956)
BVerwG, Beschl. v. 22.4.2010 – 7 B 43/09, NVwZ 2010, 1034 L = BeckRS 2010, 49816 – Bergwerk West
BVerfG, Urt. v. 17.12.2013 – 1 BvR 3139/08 u. 1 BvR 3386/08, NVwZ 2014, 211
BVerwG, Urt. v. 18.12.2014 – 7 C 22/12, BVerwGE 151, 156
Czychowski M., Reinhardt, M.: WHG. Kommentar. 11., neubearbeitete Aufl. C. H. Beck, München (2014)
EuGH, Urt. v. 24.10.1996 – C-172/95, NVwZ 1997, 473 (474, Rn. 31 ff.)
Frenz, W.: Europäisches Umweltrecht. C. H. Beck, München (1997)
Frenz, W.: Die ordnungsrechtliche Verantwortlichkeit für austretende Grubengase. Duncker & Humblot, Berlin (2002)
Frenz, W.: Unternehmerverantwortung im Bergbau. Duncker & Humblot, Berlin (2003)
Frenz, W.: Haftung beim Grundwasserwiederanstieg im Kohlenbergbau, S. 49ff. WiVerw, (2007)
Frenz, W.: Drittschutz im Bergrecht, S. 86. NVwZ, C. H. Beck, München (2011)
Frenz, W., Slota, N.: Am Vorabend des neuen Fracking-Gesetzes, S. 307. ZNER, Pontepress, Bochum (2015)
Frenz, W., Müggenborg, H.-J., Cosack, T., Ekardt, F.: EEG. 4. Aufl.: Erich Schmidt-Verlag, Berlin (2015)
Frenz, W.: Ewigkeitslasten im Kohlenbergbau. Vorträge der gemeinsamen Tagung der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Berg-, Umwelt- und Europarecht und der GDMB in Aachen im Januar 2016. Heft 138 GDMB-Verlag, Clausthal (2016a)
Frenz, W.: Fracking-Verbot, S. 1042. NVwZ, C. H. Beck, München (2016b)
Frenz, W. , Preuße, A.: Spätfolgen des Bergbaus. Technische und rechtliche Fragen. 2. Aachener Bergschadenkundliches Kolloquium. Vorträge der gemeinsamen Tagung des Instituts für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau der RWTH Aachen, des Lehr-und Forschungsgebietes Berg-und Umweltrecht der RWTH Aachen und der GDMB in Aachen. Heft 86. GDMB-Verlag, Clausthal (2000)
Greb: Beck Online-Kommentar EEG 2014, C. H. Beck München (2015)
Hermanns, C.-D.: Buchbesprechung. zu Frenz, W., Unternehmerverantwortung im Bergbau, S. 563. DVBl, Heymanns, Köln (2005)
Knöchel: Frenz/Preuße (Hrsg.), Spätfolgen des Bergbaus, S. 103 (108). (2000)
Kremer, E., Neuhaus, P. U. gen. Wever: Bergrecht. Kohlhammer, Stuttgart (2001)
Ministerien für Wirtschaft und Umwelt des Landes NRW 2011 Erlass der Ministerien für Wirtschaft und Umwelt des Landes NRW vom 18.11.2011, V B 1-47-03/IV-5-3052-37727.
OLG Düsseldorf, Urt. vom 18.12.2002 – Az. 18 U 88/02.
OLG Düsseldorf, Urt. vom 8.6.2004 – I-20 U 4/04; BGH, Urt. v. 29.7.1999 – III ZR 234/97, NJW 2000, 427
OLG Hamm, Urteil v. 3.11.1970 – 6 U 155/67; BGH, Beschluss v. 18.12.1972 – III ZR 30/71.
OVG Bautzen, Beschl. v. 10.2.2004 – 4 B 832/03, ZfB 2005, 60.
OVG Lüneburg, Urt. v. 24.11.1961 – I A 123/60, OVGE 17, 447 (451 f.)

OVG Lüneburg, Urt. v. 30.10.2003 – 7 L 3421/00, ZfB 2004, 12 (24)
OVG Münster, Urt. v. 29.3.1984 – 12 A 2194/82, UPR 1984, 279 = ZfB 1984, 367 (374 ff.)
OVG Münster, Urt. v. 10.1.1985 – 4 B 1434/84, NVwZ 1985, 355 (356); NVwZ 1997, 507 (508);
OVG Münster, Urt. v. 27.7.1995 – 20 A 3252/93, ZfW 1996, 469 (473)
Piens: Piens/Schulte/Vitzthum, BBergG, 2. Aufl., Kohlhammer, Stuttgart (2013)
Piens, R. Schulte, H.-W./Vitzthum, S.: BBergG, 2. Aufl. Kohlhammer, Stuttgart (2013)
Preuße, Weiß. Würtele: Frenz/Müggenborg/Cosack/Ekardt, EEG, 4. Aufl. , vor § 48, Rn. 33 (2015)
RG, ZfB 1898, 228
Schmid: Berendes/Frenz/Müggenborg, WHG, Erich Schmidt-Verlag, Berlin (2011)
Spieth, W.-F., Wolfers, B.: Umfang und Reichweite der Nachsorgepflicht des Bergbauunternehmers bei der Stilllegung., S. 269, ZfB, Köln (1997)
VG Düsseldorf, Urt. v. 6.4.1998 – 8 K 8084/96, NVwZ 1999, 216 (217).
VG Neustadt, ZfB : Ermöglichung einer fortlaufenden bergbehördlichen Kontrolle, S. 223 (1997)
VGH Mannheim, Urt. v. 29.3.2000 – 1 S 1245/99, NVwZ-RR 2000, 589 (590)
Vitzthum, Piens: Piens/Schulte/Vitzthum, BBergG, 2. Aufl. (2013)

Anforderungen an ein Geothermieprojekt aus der Sicht eines Bauherren

10

Klaus Bücherl und Simone Walker-Hertkorn

Inhaltsverzeichnis

10.1 Einführung 354
10.2 Auswahl und Beauftragung eines geothermischen Fachplaners 355
10.2.1 Zeitpunkt der Beauftragung 355
10.2.2 Vergabe und Vertragsgestaltung 357
10.3 Projektablauf 359
10.3.1 Grundlagenermittlung, Machbarkeitsprüfung 359
10.3.2 Vorplanung 360
10.3.3 Entwurfsplanung 363
10.3.4 Genehmigungsplanung 364
10.3.5 Ausführungsplanung 364
10.3.6 Vergabe der Leistungen 364
10.3.7 Ausführung 365
10.3.8 Dokumentation 366
10.3.9 Zusammenfassung 367
10.4 Optimale Einsatzgebiete der Oberflächennahen Geothermie 367
Literatur 369

Klaus Bücherl (✉)
Dipl.-Geologe BDG Klaus Bücherl, tewag – Technologie-Erdwärmeanlagen-Umweltschutz GmbH, Blumenstraße 24, 93055 Regensburg, Deutschland
e-mail: kbu@tewag.de&info@tewag.de

Simone Walker-Hertkorn
Dipl.-Geologin BDG Simone Walker-Hertkorn, tewag Technologie – Erdwärmeanlagen – Umweltschutz GmbH, Niederlassung Starzach, Am Haag 12, 72181 Starzach, Deutschland
e-mail: simone.walker-hertkorn@tewag.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_10

Zusammenfassung

Die Oberflächennahe Geothermie ist eine eigenständige Planung neben den anderen Fachplanungen. Der geothermische Fachplaner sollte so früh wie möglich, bereits bei der Baugrunderkundung, ins Projektteam geholt werden. Die Auswahl des Planers erfolgt nach Qualität und Referenzen, für Leistungsumfang und Honorierung liegt eine Empfehlung des AHO (Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e.V.: Planungsleistungen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie) vor. Die Planung beginnt mit der Prüfung, ob die Geothermie eine sinnvolle Alternative sein kann und ob sie auf dem jeweiligen Standort umsetzbar ist. Danach schließt dann eine Machbarkeitsstudie und Vorplanung an, um Kosten und die Wirtschaftlichkeit verschiedener Varianten zu bewerten. Die weitere Planung muss in enger Abstimmung mit dem Planer für die technische Gebäudeausrüstung (TGA) erfolgen. Die Oberflächennahe Geothermie entfaltet ihre größten Vorteile bei der Kombination von Heizen und Kühlen und der saisonalen Speicherung von Wärme im Untergrund. Bei intelligenter Planung sind erhebliche Einsparungen gegenüber konventionellen Systemen möglich.

Schlüsselwörter

Oberflächennahe Geothermie · geothermischer Fachplaner · Vergabe · Honorar · Vertrag · Machbarkeit · Probebohrung · Thermal-Response-Test · Projektablauf

10.1 Einführung

Die Planung und Auslegung einer Anlage zur Nutzung der Oberflächennahen Geothermie und deren Einbindung in das Energiekonzept und die Haustechnik stellt Anforderungen, die über das traditionelle Fachgebiet der Ingenieure für technische Gebäudeausrüstung (TGA) und der Architekten hinaus gehen. Diese Systeme zum Heizen und Kühlen können nicht standortunabhängig geplant werden und erfordern Kompetenzen und Erfahrungen auf dem Gebiet der Geologie, der Bohr- und Geotechnik sowie der Einbindung von Wärmequellen in Wärmepumpenkonzepte. Der Bauherr muss daher frühzeitig an die Einbindung eines zusätzlichen Fachplaners für diese spezielle Aufgabe denken. Die Oberflächennahe Geothermie steht damit während des gesamten Projektablaufs als eigenständiges Gewerk, bzw. als eigenständige Planung neben der TGA-Planung, der Tragwerksplanung und anderen Fachplanungen. Vom geothermischen Fachplaner wird dabei in der Regel zunächst die Frage beantwortet, ob die Oberflächennahe Geothermie bei der geplanten Nutzung und auf dem jeweiligen Standort eine sinnvolle Alternative im Vergleich mit konventionellen Systemen sein kann. Dabei gilt es, auch verschiedenste Varianten und Wärmequellentechniken zu beachten.

10.2 Auswahl und Beauftragung eines geothermischen Fachplaners

10.2.1 Zeitpunkt der Beauftragung

Zu Beginn eines Bauvorhabens sind viele Frage zu klären und die entsprechenden Planer und Fachleute zu beauftragen. Neben gestalterischen Aspekten stehen auch technische Fragen an, beispielsweise ob der Baugrund tragfähig ist und welche Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung gestellt werden. Bereits in diesem frühen Projektstadium ist die Erfahrung und Expertise eines geothermischen Fachplaners unentbehrlich. Schon im Rahmen der Baugrunderkundung kann und muss geprüft werden, ob der geologische Untergrund für die geothermische Nutzung geeignet ist und welche der geothermischen Nutzungsformen auf dem Standort infrage kommt und wirtschaftlich ist. Versäumnisse in dieser Vorplanung des Bauvorhabens können erhebliche Nachteile und Kosten verursachen:

- Standortbedingte Fehleinschätzungen aufgrund fehlender Kenntnis der Quantität und Qualität des geothermischen Reservoirs sind in aller Regel durch Voruntersuchungen zur thermischen Leistungsfähigkeit zu vermeiden (z. B. durch TRT, Wasseranalysen, Geophysik etc.). Wird dieses Fündigkeitsrisiko nicht oder zu spät erkannt, kann es zum Scheitern des Geothermieprojektes unter hohen Voraufwandskosten kommen, da ein Weiterverfolgen noch größere wirtschaftliche Risiken bedeuten würde. Frühzeitige Kenntnis der standortspezifischen Merkmale spart somit Zeit, Ärger und Kosten.
- Bohrtechnischen Standortrisiken wird bei der Bewertung nicht ausreichend Rechnung getragen bzw. sie bleiben komplett unerkannt. Bei der späteren Umsetzung führt dies zu Zeitverzögerungen, wesentlichen Änderungen im Konzept des Sondenfeldes, zu Mehrkosten bis hin zum Abbruch des Geothermieprojektes.
- Unterschätzung der genehmigungsrechtlichen Vorgaben und damit des resultierenden planerischen, finanziellen und zeitlichen Aufwandes bei der Genehmigungsplanung bzw. der Realisierung des Sondenfeldes oder der Brunnenanlagen.
- Aus einer Vordimensionierung anhand von Pauschalwerten aus dem Einfamilienhausbereich, wie z. B. die spezifische Entzugsleistung von 50 W/m gemäß VDI 4640, Blatt 2 (Verein Deutscher Ingenieure 2001a), resultieren falsche Vorstellungen zur notwendigen Dimension der Erdwärmesondenanlage und damit auch zum Platzbedarf des Sondenfeldes sowie zur Höhe der Investitionskosten. Eine geothermische Anlagenbemessung ist weder Aufgabe der ausführenden Bohrfirma noch Aufgabe der Hersteller von Wärmepumpenanlagen, welche sich an diesen spezifischen Entzugsleistungen orientieren.

Insbesondere der zeitliche Ablauf und Verzögerungen im Baustellenbetrieb können auf Großbaustellen leicht drastische Kosten verursachen, eine realistische Einschätzung bereits in der Vorplanung ist hier besonders wichtig.

Wichig

- Beim Grundstückskauf schon an die Heizung denken!
- Ein unabhängiger geothermischer Fachplaner ist so früh wie möglich einzuschalten.

Bereits in dieser ersten Planungsphase eines Bauvorhabens ist es also wichtig, die Eignung des Standortes für die Oberflächennahe Geothermie zu prüfen und einen geothermischen Fachplaner einzuschalten. Auch für die Vordimensionierung von Erdwärmesondenanlagen ist geothermisches Fachwissen unverzichtbar. Leider zeigen sich in der Planungspraxis immer wieder Fälle, in denen die Vorplanung (und zum Teil auch die Entwurfsplanung) auf Pauschalwerten der VDI-Richtlinie 4640 für Einfamilienhäuser fußt. Häufig wird dabei – unabhängig von der Geologie – überschlägig eine Entzugsleistung von 50 W/m angesetzt. Der gegenseitigen Beeinflussung von Wärmeüberträgern in einem begrenzten Raum wird dabei keine Rechnung getragen. Bei Anlagen mit Heiz- und Kühlanforderungen jenseits der 30 kW aber wird der in der VDI-Norm 4640 enthaltene Pauschalwert für die Entzugsleistung der Komplexität der Einflussparameter auf die Dimension des Sondenfeldes nicht gerecht und ist im Übrigen auch nicht VDI-konform. Zur Dimensionierung der Anlage nach den Temperaturvorgaben der VDI 4640, Blatt 2 und weiterer Vorgaben der gebäudetechnischen Planungsseite bzw. der Genehmigungsbehörden sind thermische Simulationen der Erdwärmesondenanlage mit entsprechenden Simulationswerkzeugen unter Einbeziehung der zu berücksichtigenden Einflussparameter durchzuführen. Das Simulationswerkzeug ist dabei entsprechend der Komplexität der Fragestellungen anzupassen.

Welche Folgen eine fehlerhafte Auslegung größerer Anlagen auf Grundlage der in der VDI-Norm 4640 enthaltenen spezifischen Entzugsleistungen haben kann, zeigt das folgende Beispiel. Dabei werden mögliche Anlagendimensionen ausgehend von einer Heizleistung der Wärmepumpe von 100 kW für verschiedene Nutzungskonzepte hinsichtlich der Vollbenutzungsstunden der Wärmepumpe und der Kühloptionen dargestellt.

Beispiel

Bei der überschlägigen Auslegung mit einer angenommenen Entzugsleistung von 50 W/m wären 1500 Bohrmeter zur Abdeckung des Heizbedarfes erforderlich. Werden dagegen die gegenseitige Beeinflussung der Erdwärmesonden, die Temperaturvorgaben der VDI und eine Laufzeit von etwa 1800 h („normale“ Laufzeit) berücksichtigt, so ergeben sich 2500 Bohrmeter (Basisszenario). Wird die Geothermie zur Deckung der Grundlast bei bivalenten Energiekonzepten herangezogen, steigen die benötigten Bohrmeter aufgrund der langen Laufzeit der Wärmepumpe nochmals deutlich. Die Anlage wäre somit mit 1500 Bohrmetern klar unterdimensioniert.

Tab. 10.1 Mögliche Anlagendimensionen ausgehend von einer Heizleistung von 100 kW für verschiedene Nutzungskonzepte

Szenario	Gesamtbohrmeter
Überschlägige Auslegung mit 50 W/m *(nicht VDI-4640-konform!)* keine Kühlung, „normale“ Laufzeit der Wärmepumpe	1500 m
Basisszenario *(VDI-4640-konform)* keine Kühlung, „normale“ Laufzeit der Wärmepumpe	2500 m
Szenario „Grundlastdeckung“ *(VDI-4640-konform)* keine Kühlung, hohe Laufzeit der Wärmepumpe	4800 m
Szenario „Bürogebäude“ *(VDI-4640-konform)* passive Kühlung, normale Laufzeit der Wärmepumpe	1800 m
Szenario „Energiespeicher“ *(VDI-4640-konform)* ausgeglichenes Verhältnis zwischen Heiz- und Kühlanforderungen	1500 m

Wird dagegen auch die Kühlung in das Konzept einbezogen, können die gleichen Heizanforderungen mit deutlich weniger Bohrmetern realisiert werden. Mit der Kühlung wird die sommerliche Wärme im Untergrund eingelagert bzw. die Regeneration des Untergrundes wesentlich unterstützt und somit die Größe des Sondenfeldes an den Energiebedarf angepasst. Dies führt zu einer höheren Effizienz des Systems.

Die Ergebnisse (Tab. 10.1) zeigen, dass ein Pauschalwert von 50 W/m zur Auslegung der Anlage der Komplexität der Fragestellung nicht gerecht wird. Vielmehr sind bereits bei der Vorkonzeption sämtliche Besonderheiten, angefangen von den standortspezifischen geothermischen Bedingungen, die zur Verfügung stehenden Platzverhältnisse, die genehmigungsrechtlichen Vorgaben bis hin zu den gebäudetechnischen Anforderungen sowie der Kostenrahmen, zu berücksichtigen. Nur so kann eine verlässliche Aussage zur technischen Realisierbarkeit des Projektes mit ausreichender Planungssicherheit im Zuge der Machbarkeitsanalyse getroffen werden.

10.2.2 Vergabe und Vertragsgestaltung

Beratende, planerische, konstruktive und gestalterische Leistungen, wie zum Beispiel die Erstellung von Gutachten und Planungen im Zusammenhang mit der Errichtung einer Anlage zur Nutzung der Oberflächennahen Geothermie, sind geistig-schöpferische, intelligente Leistungen. Es sind keine materiellen, inhaltlich vergleichbaren, vertraglich spezifizierbaren Leistungen.

Das Ermitteln des Leistungsziels und des Leistungsumfangs in Abstimmung mit dem Auftraggeber ist daher häufig Teil der beratenden Tätigkeit.

Der geeignetste Auftragnehmer ist folglich derjenige, der aufgrund

- seiner fachlichen Eignung: seiner Fachkunde, Leistungsfähigkeit, Erfahrung und Zuverlässigkeit;
- seiner finanziellen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit und seiner Unabhängigkeit, auch von Liefer- und Herstellerinteressen, und
- seiner Integrität die beste Leistung erwarten lässt.

Die Auswahl des Auftragnehmers hat daher nach dessen Befähigung, also nach Leistungskriterien, zu erfolgen. Ein reiner Preiswettbewerb bei der Vergabe von Gutachter- und Planungsleistungen ist aus zwei Gründen auch unsinnig:

- Der Auftraggeber wünscht keine bereits bei Auftragserteilung materiell definierten oder reproduzierbaren Leistungen. Er wünscht, dass ein Leistungsziel erreicht wird, das häufig erst im Verlauf des Planungsprozesses erarbeitet werden muss. Das aber bedeutet, dass sich freiberufliche Leistungen einem Preiswettbewerb entziehen und die Qualität einer Leistung in der Regel erst beurteilt werden kann, wenn sie erbracht ist.
- Die Ersparnisse bei der Ausführung bzw. Umsetzung einer guten Beratung oder Planung übersteigen meist deren Kosten. Ein knappes Honorar birgt aber „die Gefahr einer unausgewogenen Planung und damit einer unwirtschaftlichen Bauausführung und unangemessen hoher Folgekosten“. Daher gilt: Wer billig untersucht und plant, saniert oder baut teuer. Oder anders ausgedrückt: Es gibt nichts, was sich nicht billiger und schlechter machen ließe.

Preisanfragen mit VOB-ähnlichen Leistungsverzeichnissen, die keinen Spielraum für eine intelligente, geistig-schöpferische Beratung und Bearbeitung lassen, verschenken mutwillig die Möglichkeit kreativer Lösungen und widersprechen daher dem Interesse des Bauherren.

Es sollte daher der Auftragnehmer ausgewählt werden, der aufgrund seiner sachlichen Selbstdarstellung und von Empfehlungen Dritter (Fachbehörden, Ingenieurkammern, Berufsverbänden, Industrie- und Handelskammern) für das zu bearbeitende Projekt am geeignetsten erscheint und das Vertrauen des Auftraggebers oder – bei großen Projekten – das des Projektsteuerers besitzt.

Der Vertrag zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer, der die Rechte und Pflichten der Vertragspartner regelt, ist ein privatrechtlicher Werkvertrag nach § 631 f BGB (10). Bei seiner Abfassung ist das Gesetz zur Regelung des Rechts der allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB-Gesetz) zu beachten. In Regelfällen empfehlen sich daher Musterverträge.

Grundlage für den vom Planer zu erbringenden Leistungsumfang und eine angemessene Honorierung ist das Heft Nr. 26 der Schriftenreihe des Ausschuss der Verbände

und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e. V. (AHO) *Leistungsbild und Honorierung von Planungsleistungen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie* (AHO 2011). Diese Empfehlungen schließen die in der Verordnung über Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, HOAI) enthaltene Lücke zwischen den Leistungsbildern für Ingenieurbauwerke (§ 42) und für technische Ausrüstung (§ 52). Die Leistungsbilder und Honorarvorschläge der AHO geben dem Bauherren Sicherheit, da in den darin beschriebenen Leistungsbildern detailliert beschrieben ist, welche Leistungen zur erbringen sind und welches Honorar dafür angemessen ist. Somit zeigen diese Leistungsbilder auch Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten auf, die nicht nur in der Festlegung der Anzahl und Tiefe des Wärmeübertragungssystems stehen.

10.3 Projektablauf

Planung und Projektablauf folgen dabei den Phasen, die auch bei anderen Ingenieurleistungen üblich sind:

- Grundlagenermittlung,
- Vorplanung,
- Entwurfsplanung,
- Genehmigungsplanung,
- Ausführungsplanung,
- Vergabe,
- Ausführung.

10.3.1 Grundlagenermittlung, Machbarkeitsprüfung

Als Besonderheit der Planung von geothermischen Anlagen erfolgt in der Grundlagenermittlung zunächst die Prüfung, ob die Geothermie auf dem jeweiligen Standort eine sinnvolle Alternative zu konventionellen Systemen sein kann. Erst wenn diese Vorprüfung positiv ausfällt, wird die Machbarkeit auf dem Standort geprüft.

Im Rahmen der Machbarkeitsprüfung müssen folgende Voraussetzungen für die folgende Planung geklärt werden:

Prüfen der genehmigungsrechtlichen Situation
Für die Genehmigung von Anlagen zur Nutzung der Oberflächennahen Geothermie sind Bestimmungen des Wasserrechts zu berücksichtigen, die sich von Bundesland zu Bundesland unterscheiden. Auch Nutzungskonkurrenzen (z. B. Schutzgebiete) sind hier zu prüfen.

Geologie, Hydrogeologie,
Durch Recherche in öffentlich zugänglichen Karten, Datenbanken und Planungsunterlagen werden die geologischen und hydrogeologischen Standorteigenschaften qualitativ ermittelt. Diese Informationen sind in Bezug auf die Bohrbarkeit und das eingesetzte Bohrverfahren wesentlich.

Projektrisikofaktoren
Zu den Risikofaktoren, die eine Nutzung verteuern, erschweren oder ganz verunmöglichen, können neben der Geologie und Hydrogeologie unter anderem auch Altlasten, Kampfmittel (Blindgänger), unterirdische Leitungen und Altbergbau gehören. Diese Risiken sind zu erfassen und zu bewerten.

Abschätzung relevanter geothermischer Untergrundparameter
Aus den ermittelten Standortdaten müssen die wichtigsten geothermischen Untergrundparameter (u. a. Wärmestromdichte/-leitfähigkeit des Bodens, Grundwasserverhältnisse, Grundwasserqualitäten) abgeschätzt werden. Unter Umständen müssen hier bereits thermische und hydraulische Umweltauswirkungen abgeschätzt werden.

Ermittlung Erkundungsbedarf
Neben einer Plausibilitätsprüfung aller Daten müssen auch Kenntnisdefizite benannt werden und weiterer Erkundungsbedarf abgeschätzt werden.

Zusammenarbeit mit dem TGA-Planer
Bereits in dieser Projektphase ist eine Zusammenarbeit mit dem Planer für technische Gebäudeausrüstung (TGA-Planer) wichtig. Von diesem ist in dieser Phase unter anderem der Wärme- bzw. Kältebedarf zu präzisieren und ggf. an das geothermische Potenzial anzupassen.

Erst am Ende der Machbarkeitsprüfung kann die Frage, ob Geothermie auf dem Standort grundsätzlich umsetzbar ist, beantwortet werden.

Wichtige Fragen der Grundlagenermittlung
- Ist die Geothermie bei meinem Bauvorhaben realisierbar und eine sinnvolle Variante im Energiekonzept?
- Ist die Geothermie auf meinem Standort realisierbar?

10.3.2 Vorplanung

Konnte die Frage nach der Realisierbarkeit der Geothermie positiv beantwortet werden, werden in einem iterativen Prozess in enger Zusammenarbeit mit dem TGA-Planer im Rahmen der Projekt- und Planungsvorbereitung die Grundlagen für die weitere Planung der Anlage gelegt. Im Rahmen der Vorplanung werden auch – sofern erforderlich – Probebohrungen durchgeführt und erforderliche geotechnische Untersuchungen, wie

hydraulische Pumpversuche an Brunnen oder ein Thermal Response Test (TRT, vgl. Kap. 16) durchgeführt. Die Ausführung der Probebohrungen sowie die technischen Untersuchungen gehören nicht zu den Planungsleistungen. Für die Probebohrung holt der geothermische Fachplaner für den Bauherren Angebote ein und unterstützt ihn bei der Vergabe. Die technischen Untersuchungen (Pumpversuch, TRT, Temperaturtiefenprofilmessungen) können ebenfalls vergeben oder durch den Fachplaner ausgeführt werden. Entscheidend ist die fachliche Expertise des Fachplaners bei der Vergabe und der Ausführung dieser Leistungen. Als „besondere Leistungen" sind Erkundungsarbeiten nicht Bestandteil des Planungshonorars und verursachen daher zusätzliche Kosten.

Die Feldmessungen an einer zur Erdwärmesonde ausgebauten Probebohrung liefern sowohl wichtige standortspezifische Werte zu maßgeblichen Planungsparametern als auch wesentliche Informationen für die Erstellung einer projektspezifischen Ausschreibung. Auf eine Probebohrung am Standort ist deshalb aus Gründen der Risikobewertung und einer nachhaltigen Anlagenplanung nicht zu verzichten. Da eine zur Erdwärmesonde ausgebaute Probebohrung später in das Erdwärmesondenfeld integriert werden kann, stellen die Erkundungsmaßnahmen im Ausführungsfall nur geringe Mehrkosten dar. Auch die Terminabläufe werden nur unwesentlich durch die Probebohrung beeinflusst, auf der anderen Seite werden die Ausführungsarbeiten bei einer ordentlichen Planungsvorbereitung besser planbar.

Die wesentlichen Leistungen des geothermischen Fachplaners sind in dieser Phase:

Variantendiskussion
Auf Grundlage der Standortdaten und Gebäudeanforderungen werden die Arten der geothermischen Energiegewinnung geprüft und technisch machbare Vorzugsvarianten aufgezeigt.

Vordimensionierung
Es erfolgt dann eine Vordimensionierung der Geothermieanlagen (Erdwärmesonden, -kollektoren, Energiepfahlanlage, Brunnenanlagen u. ä.).

Planung und Begleitung von Erkundungsarbeiten
Der geothermische Fachplaner plant die Probebohrungen und betreut deren Ausführung aus geologischer und geothermischer Sicht. Außerdem kümmert er sich um die richtige Durchführung und Auswertung der erforderlichen hydraulischen oder thermischen Tests (z. B. TRT).

Einschätzung der Randbedingungen
Neben den geologischen Voraussetzungen und den gebäudetechnischen Anforderungen sind auch die bautechnischen Randbedingungen wie zum Beispiel das Platzangebot auf dem Standort zu prüfen und zu bewerten.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen
Die technische Variantendiskussion wird ergänzt durch Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen auf der Grundlage der Kostenschätzung für die betrachteten Varianten.

Daneben ist eine Abstimmung mit anderen fachlich Beteiligten erforderlich. Insbesondere der TGA-Planer muss hier wichtige Leistungen erbringen:

- Gebäudeanforderungen und Nutzungsverhalten,
- Vorplanung der Steuer- und Regelungstechnik,
- Erstellung eines Funktionsschemas der Gebäudetechnik,
- Vorbemessung der Heiz- und Kühllast sowie der erforderlichen Heizenergie- und Kühlenergie.

Nach der technischen Erkundung, dem Vergleich aller möglichen Varianten und der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wird noch mal überprüft, ob die Geothermie auch aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll bzw. realisierbar ist. Die Kernkriterien zur Bewertung der Machbarkeit eines Projektes der Oberflächennahen Geothermie sind:

- geologische Gegebenheiten,
- genehmigungsrechtliche Vorgaben,
- physikalische Faktoren,
- ökonomische Kriterien.

Die einzelnen Gruppen werden in der folgenden Tab. 10.2 hinsichtlich konkreter Einflussfaktoren näher ausgeführt (Liste nicht vollständig). Die Unterpunkte der einzelnen Gruppen wiederholen sich teilweise bzw. bedingen sich gegenseitig. Dies zeigt die zum Teil vielfältigen Zusammenhänge bei der Bewertung der Machbarkeit eines Geothermieprojektes.

Tab. 10.2 Kriterien zur Bewertung der Umsetzbarkeit eines Projektes nach Probebohrungen und Vorplanung

Geologische Gegebenheiten	Genehmigungsrechtliche Vorgaben	Physikalische Faktoren	Ökonomische Kriterien
• Hohlräume, Kluftbereiche • Grundwasserzutritte • artesisch gespanntes Grundwasser • Wechselhafte geologische Abfolge • Sulfatgestein etc.	• Bohrtiefenbegrenzungen • Temperaturvorgaben • Anforderungen an das Wärmeträgermedium • Bohrdurchmesser • Wasser- oder Heilquellenschutzgebiete	• Thermische Eigenschaften des Untergrundes • vorhandenes Bohrareal • gebäudetechnische Anforderungen • Temperaturvorgaben • Art des Wärmeträgermediums	• Investitionsvolumen • Amortisation der höheren Investitionskosten • Zertifizierung als „Green Building“ – Energie- und Kosteneffizienz im Vergleich zu anderen Energiequellen

Die einzelnen Punkte sind keine grundsätzlichen KO-Kriterien für ein Geothermieprojekt. Im Zuge der Vorkonzeption sollten jedoch sämtliche Kriterien eingehend geprüft werden. Kritische Punkte sowie mögliche Lösungsansätze sind zusammen mit dem Bauherrn und den beteiligten Planern anzusprechen. Hierbei gilt es insbesondere, die Folgen für den weiteren Projektablauf in terminlicher Hinsicht sowie für die Investitionskosten offen darzulegen. Somit ist eine größtmögliche Transparenz hinsichtlich der Risiken und der Lösungsansätze gegenüber den Beteiligten gegeben. Das standortspezifische Potential der Oberflächennahen Geothermie ist somit optimal und mit einem für den Bauherrn/Investor kalkulierbaren Risiko abrufbar. Gleichzeitig kann die bei größeren Projekten unabdingbare Abstimmung zwischen verschiedenen Gewerken (v. a. Geothermie und Rohbau) frühzeitig geplant werden.

Wichtige Frage der Vorplanung
Wie kann die Geothermie am Standort mit den gegebenen Gebäudeanforderungen optimiert werden, wo gibt es Kosteneinsparungen?

10.3.3 Entwurfsplanung

Steht nach Probebohrungen und Vorplanung fest, dass die Oberflächennahe Geothermie zum Einsatz kommt, werden für die Vorzugsvariante weitere Details ausgearbeitet:

Thermisches Leistungsvermögen
Für die Vorzugsvariante wird auf der Grundlage der aus den Probebohrungen ermittelten thermischen Parameter das geothermische Leistungsvermögen berechnet. Diese Berechnung erfolgt mit der Hilfe von spezialisierten Computerprogrammen bis hin zur numerischen Simulation der Wärmeübertragung. Damit soll der Nachweis erbracht werden, dass die Wärmequelle nachhaltig erschlossen wird und nicht nach 20- oder 30-jähriger Nutzung erschöpft ist.

Anzahl und Dimension der geothermischen Bauwerke
Anzahl, Anordnung und Dimensionierungen des Erdwärmesondenfeldes, der Brunnen oder von Energiefundamenten werden nun vorgegeben.

Umsetzung des Konzeptes
Aus der Entwurfsplanung ergeben sich die folgenden Arbeitsschritte. Außerdem erfolgt eine Kostenberechnung, die in den späteren Planungsphasen fortgeschrieben wird.

Der TGA-Planer legt in dieser Phase die Wärme- bzw. Kälteerzeugungsanlagen endgültig fest, plant Messeinrichtungen und legt die Jahresentzugs- bzw. -eintragsarbeit (in kWh) sowie die Spitzenlasten fest.

10.3.4 Genehmigungsplanung

Mit den in den ersten Planungsphasen erarbeiteten Grundlagen und den Ergebnissen der technischen Erkundung (Probebohrung, TRT) erstellt der geothermische Fachplaner die Unterlagen für die wasserrechtliche Erlaubnis oder – bei Bohrtiefen über 100 m – die bergrechtliche Genehmigung. Zur Leistung des Fachplaners gehört auch das Verhandeln mit den Fach- und Genehmigungsbehörden. Die Einreichung der Unterlagen erfolgt aber durch den Bauherren, es sei denn, es liegt eine Vollmacht vor.

In Einzelfällen können weitere Genehmigungstatbestände berührt sein (z. B. Bodenschutz oder Altbergbau), diese gehören zu den so genannten „besonderen Leistungen".

10.3.5 Ausführungsplanung

Erst nach Vorlage der Genehmigung beginnt in der Regel die Ausführungsplanung, bei der die vorangegangene Entwurfs- und Genehmigungsplanung soweit durchgearbeitet wird, dass die Anlage ausgeschrieben und realisiert werden kann. Das bedeutet:

Durcharbeiten der bisherigen Planungsergebnisse
Detaillierte Ausarbeitung der Planung bis zur ausführungsreifen Lösung.

Einarbeiten von Auflagen
Sofern Auflagen oder Hinweise aus den Genehmigungsverfahren vorliegen, werden diese eingearbeitet.

Festlegung von Bohransatzpunkten und Trassenführung der horizontalen Anbindung
Anzahl und Lage von Bohrpunkten, die Geometrie eines Sondenfeldes, Bohrtiefen und Durchmesser werden festgelegt und mit Bemaßung in Plänen dargestellt. Auch gilt es, ein besonderes Augenmerk auf die Trassenführung der horizontalen Anbindung zu legen. Kreuzungspunkte sind mit dem Tragwerksplaner und Rohbauer zu koordinieren und abzustimmen. Bei größeren Vorhaben erweisen sich die Anbindearbeiten (Leitungsverlauf) und die Verteilerbauwerke als erhebliche Kostenfaktoren.

Anschlüsse
Die Anschlüsse der geothermischen Anlage an die Gebäudetechnik werden geplant, Schnittstellen und Termine festgelegt und mit Bemaßung in Plänen dargestellt.

Die Festlegung der Anschlussstellen kann naturgemäß nur in Abstimmung mit dem TGA-Planer erfolgen. Dieser liefert Angaben zur Anordnung und zu den Abmessungen der Wärme- bzw. Kälteerzeugungsanlage und deren Anschlüsse.

10.3.6 Vergabe der Leistungen

Grundlage für die Ausschreibung und Vergabe ist die Aufstellung einer objektbezogenen Leistungsbeschreibung und eines herstellerunabhängigen Leistungsverzeichnisses.

Ausschreibungstexte seitens der ausführenden Firmen oder seitens der Hersteller von Komponenten weisen in der Regel Alleinstellungsmerkmale auf, welche sich auch auf der Kostenseite niederschlagen.

Im Rahmen der Vorbereitung der Vergabe werden vom geothermischen Fachplaner weitere Leistungen erbracht:

Vergabeart
Abhängig von der Größenordnung des Objektes und von den Anforderungen des Auftraggebers wird die Ausschreibungsart (öffentliche oder beschränkte Ausschreibung bzw. freihändige Vergabe) vorgeschlagen.

Verdingungsunterlagen
Aus der Ausführungsplanung wird die Leistung in Einzelpositionen aufgegliedert. Es werden Mengen ermittelt und es werden Anforderungen an Material, Qualifikationen (z. B. DVGW-Zertifizerung, Personal) und Vorgehensweise bei der Ausführung festgelegt. Die detaillierte Baubeschreibung und das aus Einzelpositionen zusammengesetzte Leistungsverzeichnis bilden die Ausschreibungsunterlagen.

Koordination mit anderen Gewerken
Die Verdingungsunterlagen für die geothermische Anlage können für sich alleine stehen, oder in die Ausschreibung der technischen Gebäudeausrüstung integriert werden. Unabhängig davon ist aufgrund der Zeit- und Platzanforderungen der Bohranlagen die Abstimmung und Koordination mit anderen fachlich Beteiligten unerlässlich.

Einholen, Prüfen und Werten der Angebote
Die Angebote werden systematisch formal und inhaltlich geprüft und ein Preisspiegel erstellt. Der geothermische Fachplaner unterstützt und berät den Bauherren bei der Vergabe der Leistungen, auch in Form der Mitwirkung an Verhandlungen mit den Bietern. Die Ergebnisse der Ausschreibung fließen in die Fortschreibung der Kostenberechnung.

Die Vergabe erfolgt in aller Regel wieder in enger Abstimmung mit dem Bauherrn, dem Architekten sowie dem TGA-Planer.

10.3.7 Ausführung

Die Überwachung der Ausführung und der Kosten ist eine Bauherrenaufgabe, die in der Regel von dem geothermischen Fachplaner übernommen wird. Diese **Bauoberleitung** beinhaltet:

- Kostenfeststellung und -kontrolle,
- Überwachung von Zeitplan und Qualität,
- Mitwirkung bei Aufmaßen, Abnahmen und Mängelfeststellungen,
- Koordinierung behördlicher Abnahmen,
- Sicherstellung der Einhaltung von Leistungsbeschreibung und Qualitätsanforderungen,
- Rechnungsprüfung.

Die Bauoberleitung ist nicht ständig vor Ort und ersetzt daher nicht eine intensive örtliche Bauüberwachung. Während der Ausführung stellt die **örtliche Bauüberwachung**, die in der Regel durch einen Geowissenschaftler erfolgt, ein wesentliches Instrument zur Sicherstellung von Qualität und Funktionstüchtigkeit der Anlagen dar. Abnahmen sind zum Teil nur baubegleitend möglich, da die geothermischen Anlagen nach deren Fertigstellung nicht mehr einsehbar sind. Diese fachtechnische Überwachung ist daher unerlässlich und wird in der Regel auch von den Genehmigungsbehörden gefordert. Der zeitliche Aufwand für die fachtechnische Überwachung hängt sehr von den örtlichen Verhältnissen und den Genehmigungsauflagen ab und ist daher von vorneherein schwer abzuschätzen. In der Regel erfolgt die Vergütung dieser Leistungen nach Zeithonorar.

Aufgabe der Örtlichen Bauüberwachung ist die:

Begleitung der Bohrarbeiten
Ein Geowissenschaftler weist den Bohrtrupp ein und trifft gegebenenfalls auch operative Entscheidungen zum Ausbau oder zum Bohrungsabbruch (z. B. beim Erreichen bestimmter geologischer Schichten).

Auswertung
Geologische Aufnahme und Auswertung der Bohrergebnisse.

Überprüfung
Kontrolle der Einhaltung der Leistungsbeschreibung und der fachlichen Vorschriften.

Abnahme und Mängel
Mitwirkung bei der Abnahme der geothermischen Anlagen, bei der Mängelfeststellung und beim Überwachen der Mängelbeseitigung.

Rechnungsprüfung
Die örtliche Bauüberwachung wirkt außerdem bei der Rechnungsprüfung mit.

10.3.8 Dokumentation

Nach Fertigstellung und Abnahme der geothermischen Anlagen erhält der Bauherr eine umfangreiche Dokumentation mit:

- Kopfblatt, Schichtenverzeichnissen und Bohrprofilen,
- Bohr- und Verfüllungsprotokollen (inklusive der Messung der Suspensionsdichte, Soll-/Istmenge),
- Materialnachweise für Rohrleitungen und Verfüllstoffe (Datenblatt Verpressmaterial mit ggf. Hinweisen zur Frost-Tau-Wechselbeständigkeit und Suspensionsergiebigkeit),
- Druckproben,

- Datenblätter Wärmepumpe, ggf. Zwischenwärmetauscher, Umwälzpumpe, Unterwasserpumpe, Verteilerkästen, Wärmeträgermedium, Kältemittel, Niederdruckwächter, Frostwächter, ggf. mit Hinweisen zur Sole-Austrittstemperatur,
- Tagesberichte des Bohrtrupps,
- Mängelfeststellung und Dokumentation der Mängelbeseitigung,
- Plänen und Skizzen, Fotodokumentation, Einmessungen,
- Abnahme- und Einregelungsprotokollen.

Außerdem wirkt der geothermische Fachplaner bei der Freigabe von Sicherheitsleistungen nach Ablauf der Ausführungs- und Gewährleistungsfristen mit.

Der Umfang der bei den Behörden einzureichenden Unterlagen ergibt sich aus den Genehmigungsunterlagen.

10.3.9 Zusammenfassung

In Abb. 10.1 ist der Ablauf eines Geothermieprojektes schematisch dargestellt.

10.4 Optimale Einsatzgebiete der Oberflächennahen Geothermie

Oberflächennahe geothermische Anwendungen sind insbesondere bei folgenden Voraussetzungen bzw. Anforderungen optimal einsetzbar:

- Abdeckung von Grundlastanforderungen,
- kombinierte Heiz- und Kühlanforderungen,
- saisonale Speicherung von Abwärme aus industriellen und gewerblichen Prozessen in Kombination mit entsprechenden Heizanforderungen.

Ein optimales Anwendungsgebiet findet die Geothermie bei Bürogebäuden mit kombinierten Heiz- und Kühlanforderungen. Insbesondere zur Grundlastdeckung können hier in Kombination mit konventionellen Wärme- und Kälteerzeugern technisch und wirtschaftlich optimal abgestimmte Anlagen entwickelt werden. Abb. 10.2 zeigt die zu erwartenden Betriebskosten der Wärmepumpenanlage im Vergleich zu einem konventionellen Wärme- bzw. Kälteerzeuger. Demnach beträgt die jährliche Betriebskosteneinsparung ca. 15.000 €. Eine Amortisation des Sondenfeldes ist beim vorliegenden Beispiel nach ca. 8 Jahren erreicht.

Eine Möglichkeit der intelligenten Doppelnutzung von notwendigen statischen Bauteilen stellte die thermische Aktivierung von Pfahlgründungen dar. Diese Pfahlgründungen sind als Energiepfähle zu bezeichnen. Derartige Energiepfahlfelder können wiederum bei einem jahreszeitlichen Wechselbetrieb zwischen Heizen und Kühlen optimal ausgenutzt werden und so zu einer deutlichen Betriebskosteneinsparung beitragen. Hierzu

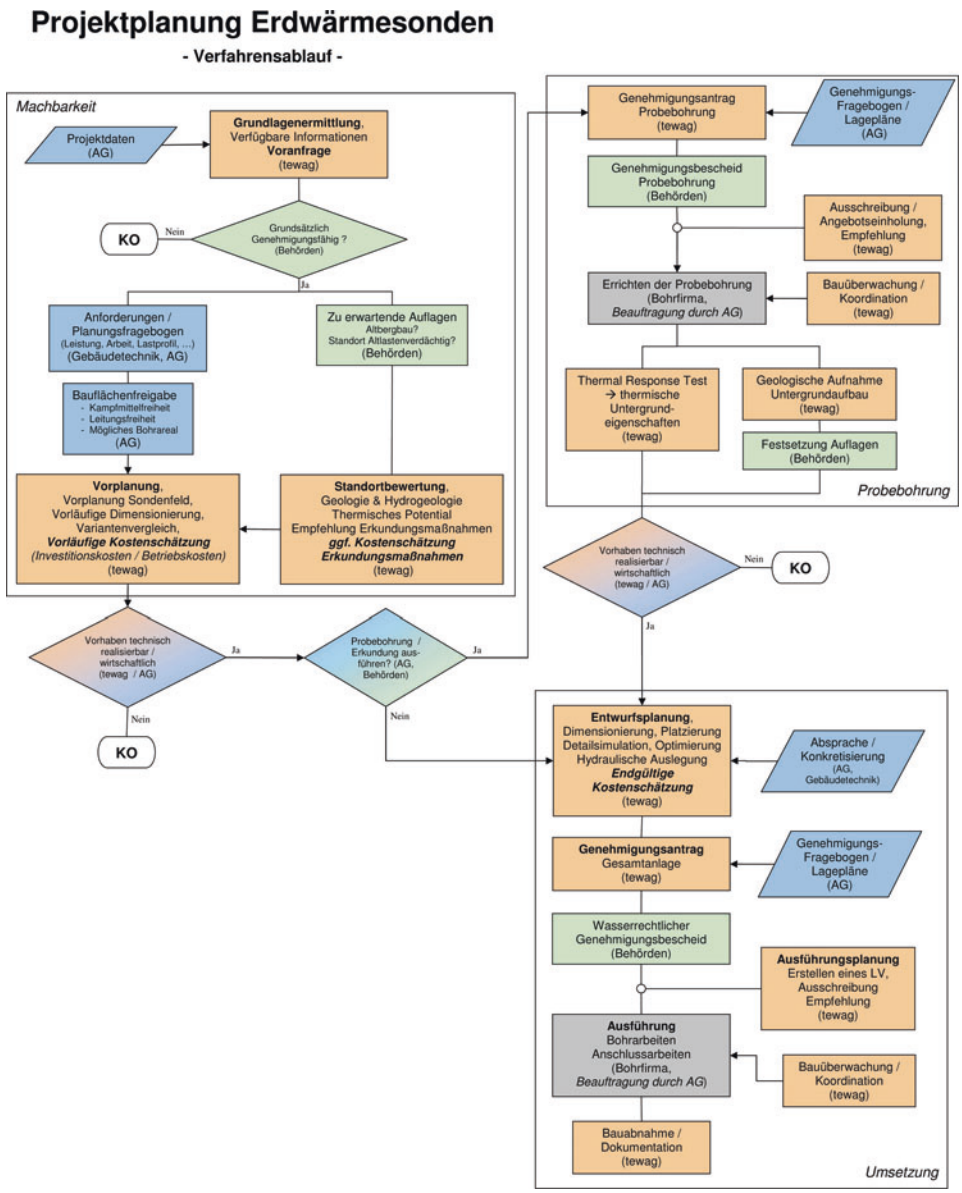


Abb. 10.1 Schematisierter Ablauf eines Geothermieprojektes (bei Planung durch tewag, AG: Auftragsgeber)

zeigt Abb. 10.2 eine vereinfachte vergleichende Betrachtung der Betriebskosteneinsparung zwischen einer erdgekoppelten Wärmepumpenanlage und konventionellen Anlagen zur Produktion der Heiz- und Kühlenergie. Durch die thermische Aktivierung der aus tragwerksplanerischen Gründen ohnehin notwendigen Pfahlgründungen konnte

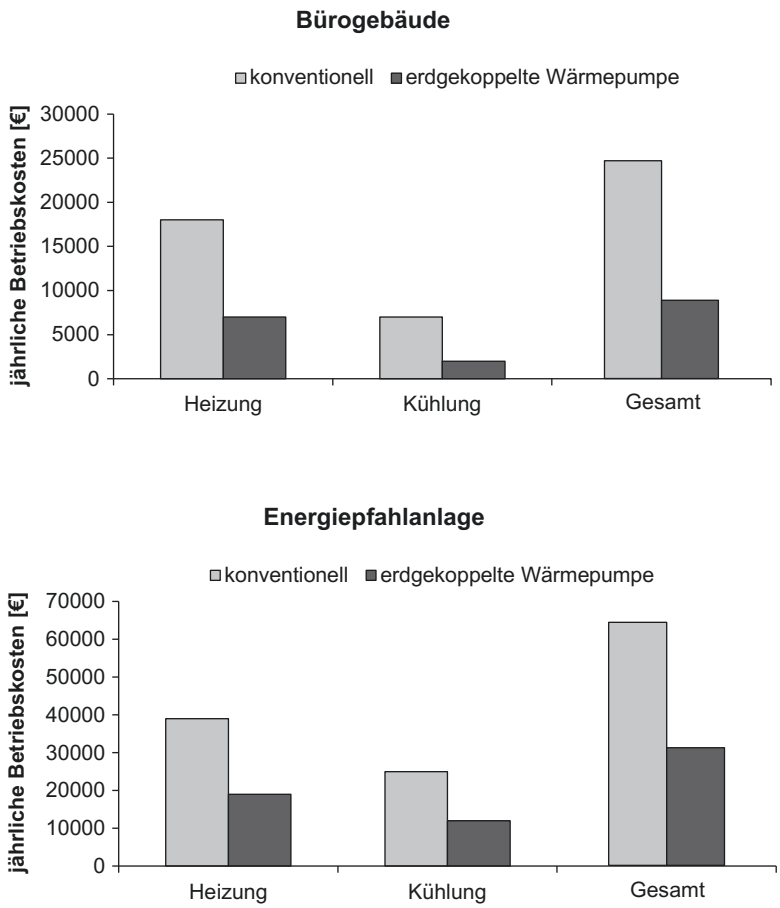


Abb. 10.2 Vergleich der jährlichen Betriebskosten bei (konventionell vs. erdgekoppelter Wärmepumpe) bei einem Bürogebäude und bei einer Energiepfahlanlage. (Kübert 2011)

im vorliegenden Beispiel eine intelligente Doppelnutzung der Pfahlgründungen erzielt werden, welche eine jährliche Betriebskosteneinsparung von ca. 31.000 € ermöglicht.

Literatur

AHO Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e.V.: Leistungsbild und Honorierung, Planungsleistungen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie, Nr. 26 der Schriftenreihe des AHO, Berlin (September 2011)

Bundesgesetzblatt Jahrgang Teil I Nr. 53 (17. August 2009): Verordnung über die Honorare für Architekten und Ingenieurleistungen (HOAI) (2009)

Kübert, M.: Konzepte gegen die K.O.-Kriterien – Die oberflächennahe Geothermie im Spiegel der Erfahrungen der Planer. Deutsches Ingenieurblatt, Ausgabe 01-02/11 (2011)

Tholen, M., Walker-Hertkorn, S.: Arbeitshilfen Geothermie: Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn 2008)

Verein Deutscher Ingenieure: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI 4640, Blatt 2. (Im Gründruck seit Mai 2015) (2001a)

Verein Deutscher Ingenieure : Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI 4640, Blatt 3 (2001b)

Verein Deutscher Ingenieure : Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI 4640, Blatt 42 (2004)

Verein Deutscher Ingenieure: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI 4640, Blatt 1 (2010)

Bohrtechnik für oberflächennahe geothermische Energiequellen

11

Reiner Homrighausen

Inhaltsverzeichnis

11.1 Oberflächennahe Bohrungen und ihre Definition 373
11.2 Die Projekte gestern, heute und morgen 374
11.3 Die heutige moderne Technik 375
11.3.1 Das Bohrgerät, die Bohranlage 375
11.3.2 Das Bohrzubehör 378
11.3.3 Das Spülungstanksystem 382
11.3.4 Das Verpresssystem/die Kompaktmischanlage 383
11.3.5 Benötigter Platzbedarf 384
11.3.6 Die Logistik während der Bohrarbeiten 386
11.4 Die Bohrverfahren 386
11.4.1 Das Rotary-Druckspülbohrverfahren ohne Hilfsverrohrung 387
11.4.2 Das Rotary-Druckspülbohrverfahren mit gleichzeitiger Verrohrung 390
11.4.3 Das Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren mit Luft als Spülungsmedium 392
Literatur 394

Zusammenfassung

Seit mehr als 30 Jahren werden in Deutschland und Nachbarländern Bohrungen geteuft, die nach ihrem Ausbau zur Gewinnung von oberflächennaher geothermischer Energie genutzt werden. Dabei unterscheiden wir zwischen zwei völlig unterschiedlichen Systemen; nämlich Förderbrunnen und Re-Infiltrationsbrunnen (offenes System) einerseits und geschlossenen Sondensystemen andererseits.

Mit dem „offenen System“ nutzt man immer sehr oberflächennahe Grundwasserleiter mit möglichst hoher Porosität, um dem geförderten Grundwasser die vorhandene

Reiner Homrighausen (✉)
Eichendorffstraße 10, 31311 Uetze, Deutschland
e-mail: reiner.homrighausen@t-online.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_11

Energie zu entziehen und reinfiltriert das abgekühlte Wasser in einen zweiten Brunnen. Diese Bauwerke sind in aller Regel nicht tiefer als max. 50 m, erfordern aber dennoch Besonderheiten bei der Ausführung der Bohrarbeiten (siehe Abschn. 11.4.1) und der Dimensionierung der Brunnenausbauten.

Die geschlossenen Erdwärmesondensysteme wurden zunächst auch wegen erforderlicher zusätzlicher Genehmigungsverfahren nicht tiefer als 100 m gebohrt.

Da die Bohrungen für den Einbau von Erdwärmesonden in allen möglichen geologischen Formationen (Lockergesteinsfolgen, Festgesteinsformationen) geteuft werden, kommen nicht selten unterschiedliche Bohrverfahren zum Einsatz. Aufgrund logistischer Gegebenheiten (enge Platzverhältnisse beim Bohren) wurden Bohrungen bis 200 m Tiefe häufig die wirtschaftlichere Lösung für die Nutzung der geothermischen Energie in existenten Gebäuden und einer größeren Anzahl flacher Bohrungen gegenüber bevorzugt. Durch die Weiterentwicklung der Materialien für den Ausbau der geschlossenen Erdwärmesonden sind seit einigen Jahren Bohrtiefen bis 400 m nicht mehr nur die Ausnahme. Deshalb ist das Tiefenintervall bis 400 m das, was in diesem Kapitel mit „oberflächennahen Bohrungen“ beschrieben werden soll.

Wenn Anfang der 90er-Jahre Bohrungen für den Einbau von Erdwärmesonden zur Ausführung kamen, wurden diese Bohrungen von dem jeweiligen Bohrunternehmen mit den zur Verfügung stehenden Bohranlagen und Ausrüstungsgegenständen nach bestem Wissen und Gewissen gebohrt, die Sonden aus HDPE eingebaut und der Ringraum häufig gemäß angetroffenen geologischen Formationen verfüllt. Als die Nachfrage für solche Bohrungen Ende der 90er-Jahre rasant anstieg, die Anzahl der Bohrungen für einzelne Projekte immer größer wurde und die Bohrungen auch deutlich tiefer geplant und ausgeführt werden mussten, genügte die bis zu diesem Zeitpunkt eingesetzte Technik, sowohl was die Bohrgerätetechnik als auch das Bohrzubehör betrifft, nicht mehr den Anforderungen. Das war nun der Zeitpunkt, als nahezu alle Hersteller von Bohrgeräten und Bohrzubehör auf die neu gestellten Anforderungen reagierten. So wurden existente technische Details weiterentwickelt und den neuen Anforderungen angepasst, bzw. gänzlich neue Gerätschaften konstruiert und gebaut.

Die Ausführungen in diesem Kapitel konzentrieren sich auf den letzten Stand der modernen Technik und beschreiben lediglich drei Bohrverfahren, nämlich solche, die heute fast ausschließlich zum Einsatz kommen. Bewusst werden „Spezialitäten“ beschrieben denn das „Normale“ und „Fundamentale“ ist in neuerer einschlägiger Literatur bereits beschrieben (z. B. David Urban 2013).

Schlüsselwörter

Bohranlage · Doppelrotorkopf · Spannkopf · Im-Loch-Hammer · Rotary-Druckspülbohrverfahren · Schockabsorber · Spülungssystem · Kreiselpumpe · Kolbenpumpe · Exzenterschneckenpumpe · Verpresseinheit · Logistik · Einbauhilfen · Erdwärmesonde · Sondenfeld · Bohrverfahren · Spülungsadditive.

11.1 Oberflächennahe Bohrungen und ihre Definition

Die Herausgeber dieses Buches und die Autoren haben sich darauf geeinigt, unter der oberflächennahen geothermischen Nutzung Bauwerke und dann auch Bohrungen zu verstehen, die bis ca. 400 m Tiefe niedergebracht werden.

Diese Begrenzung bis 400 m hat viele logische Gründe. Diese liegen zum einen an der Größe und damit an den physikalischen Grenzen der eingesetzten Bohranlagen: Hier im besonderen an den Rückzugs- oder Rückhaltekräften der Maschinen und an den Drehmomenten der Doppeldrehantriebe oder der Doppelrotorköpfe. Andere Gründe für diese Teufenbegrenzung liegen in den physikalischen Eigenschaften der einzubauenden Erdwärmesonden, wie z. B. Außendruckfestigkeit und Zugfestigkeit der Doppel-U-Sonden, die ja in nahezu allen Fällen aus HDPE hergestellt werden (siehe Kap. 14).

Auch der Verfüll- oder Verpressvorgang des Ringraums zwischen Bohrlochwand und HDPE-Doppel-U-Sonde ist bei Teufen von bis zu 400 m mit moderner Ausrüstung (siehe Abschn. 11.3.4) sicher auszuführen und es bedarf keiner überdimensionierten zusätzlichen Ausrüstungsgegenstände (siehe Abb. 11.1).

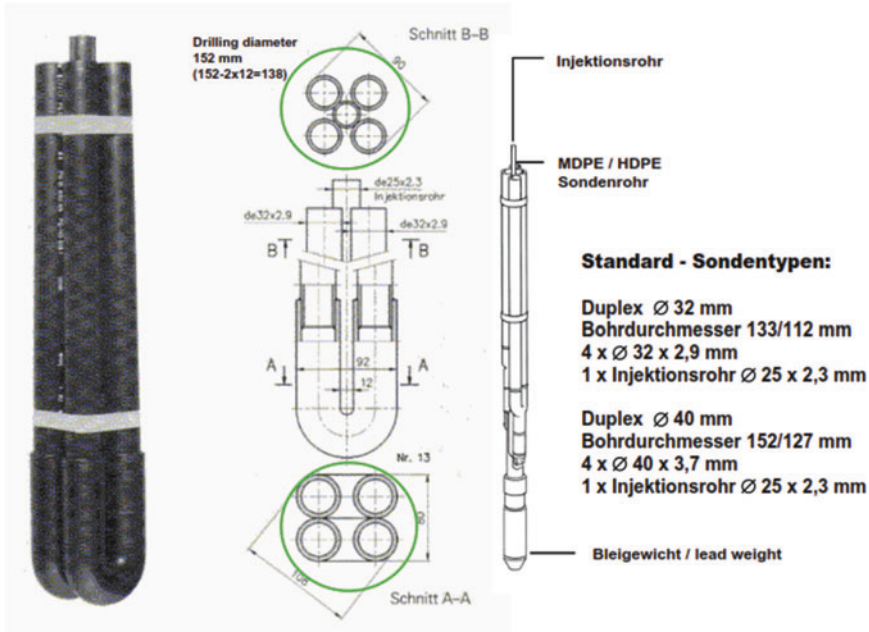


Abb. 11.1 Elemente der Doppel-U oder Duplex-Sonde mit Injektionsrohr und Bleigewicht. (© Klemm)

11.2 Die Projekte gestern, heute und morgen

Der Bedarf an die Ergiebigkeit geothermischer Energiequellen war und ist abhängig von der Größe einzelner oder je nach Objektgröße auch mehrerer Wärmepumpen, die mit geothermischer Energie versorgt werden sollen.

Vor ca. 25 Jahren waren es ausschließlich energieeffizient geplante und gebaute Ein- bis Zweifamilienhäuser mit bis zu 200 m^2 Wohn- und Nebenfläche, die mit geothermischer Energie versorgt werden sollten. Das bedeutete in den meisten Fällen das Bohren und Installieren von ein oder zwei Erdwärmesonden auf unbebautem Baugrund. Besondere Anforderungen an das Bohren und die damit verbundene Logistik wurden nicht gestellt. Verbindliche Richtlinien und Normen, die es zu berücksichtigen und einzuhalten galt, gab es nicht. Somit wurden solche Aufträge von Bohrfirmen, die bis dato Brunnen-, Pegel-, oder Baugrundbohrungen ausführten, abgewickelt.

Sehr schnell entwickelte sich aber auch ein anderer Markt; nämlich die Sanierung und Modernisierung existenter Gebäude und das Heizen und manchmal auch das Kühlen mit geothermischer Energie. Spätestens jetzt reagierten die Hersteller von Bohranlagen und Bohrzubehör, denn von nun an waren Standard-Bohranlagen und Bohrzubehöre nicht mehr geeignet, um den Anforderungen solcher Projekte Genüge zu leisten.

Abb. 11.2 zeigt ein sehr kompaktes aber sehr leistungsfähiges Geothermiebohrgerät mit Doppelkopf-Rohrantrieb während des Teufens einer Erdwärmesondenbohrung mit Im-Loch-Hammer-Bohrtechnik auf allerengstem Raum.

Abb. 11.2 Kompakte Geothermiebohranlage Typ KR 704 DW der Firma Klemm während des Teufens von Erdwärmesonden. (© Klemm)

Heute ist das Bohren und der Ausbau zu Geothermiesonden für Einfamilien- und Zweifamilienhäuser ein deutlich rückläufiger Markt in Mitteleuropa. Im Gegensatz dazu gibt es aber seit einigen Jahren immer wieder Neubauplanungen für durchaus große Gebäudekomplexe, die das Heizen und Kühlen mit geothermischer Energie vorsehen. Das gleiche gilt für Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen von Gebäudekomplexen im Bestand, die z. T. historische Bedeutung haben, bzw. sogar unter Denkmalschutz stehen (Altes Rathaus in Staufen, Staatsbibliothek in Leipzig, Schloss Herrenhäuser Gärten in Hannover und viele andere).

Für die Versorgung der zunehmend größer werdenden Wärmepumpen werden entsprechend viele Gesamtsondenmeter benötigt (nicht selten 15.000 m und mehr). Auf wie viele Sonden sich so viele Sondenmeter aufteilen, hängt immer in erster Linie vom geologischen Aufbau des Untergrundes und seiner Bohrbarkeit ab, aber auch von den zur Verfügung stehenden räumlichen Verhältnissen. Somit sind heute Sondenfelder von 200 Bohrungen und mehr – durchaus auf engstem Raum erstellt – keine Seltenheit (siehe Abschn. 11.3.5 und 11.3.6).

Bedingt durch die erfolgreiche Bauausführung von mittlerweile einer großen Anzahl von sehr großen Projekten in Deutschland und in der Schweiz, erfreut sich die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie einer immer größeren Akzeptanz bei Architekten und Planern für Großprojekte im Ausland. So wurde z. B. in 2016 ein Sondenfeld mit 148 Bohrungen und einer mittleren Tiefe von 90 m in Bischkek, der Hauptstadt von Kirgistan, fertiggestellt, das den gesamten Campusneubau der *American University of Central Asia* (AUCA) mit geothermischer Energie zum Heizen und Kühlen versorgt. Solche erfolgreichen Projekte lassen sich multiplizieren und können ein „Exportschlager" deutscher Technologien und deutscher Perfektion in der Bauausführung sein.

11.3 Die heutige moderne Technik

Die heute technisch erfolgreiche und damit wirtschaftlich eingesetzte Technik (Abb. 11.3) ist deshalb erfolgreich einsetzbar, weil alle Gerätschaften – von der Bohranlage über die Spülpumpen oder Kompressoren, die Verrohrungs- und Bohrgarnituren, die Bohrwerkzeuge, die Spülungstanksysteme und die Verpressstationen – auf immer dasselbe Bohr- und Verrohrungsschema (siehe Abschn. 11.4) perfekt abgestimmt sind.

11.3.1 Das Bohrgerät, die Bohranlage

Moderne Bohranlagen für das Teufen von immer sehr schlanken Bohrungen (siehe Abb. 11.1) zeichnen sich durch eine sehr kompakte Bauweise aus und sind in den allermeisten Fällen auf Raupenfahrwerken montiert. Generell versuchen alle Hersteller, eine Baubreite von 2 mn und eine Transporthöhe der Bohranlagen von 3,2 m nicht zu überschreiten. Die Masthöhe von 7–8 m und der freie Arbeitsraum zwischen unterem

Abb. 11.3 Bohranlage von Klemm mit Spülungstanksystem, 2 m langem Bohrgestänge und Verpressstation von MAT. (© Klemm)

Drehkopfunterteil und der obersten Abfangzange von ca. 3,50 m ist bei allen Geothermiebohrgeräten gleich und auch völlig ausreichend, da die zu verbauenden Casingrohre meistens 2 m lang sind und auch die Bohrrohre nie länger als 3 m sind (siehe Abb. 11.6).

Zwei Gerätegrößen – die Leistungsfähigkeit betreffend – werden heute eingesetzt:

- Bohranlagen mit Hakenlasten (Rückzugskräften) zwischen 60 kN und 90 kN und Drehmomenten von 8000–12.000 Nm im unteren Kraftdrehkopf und 4000–5000 Nm im oberen Kraftdrehkopf (siehe Abb. 11.4). Einsatzbereich dieser Gerätegröße ist vorwiegend in geologischen Formationen, die im Rotary-Spülbohrverfahren geteuft werden können (siehe Abschn. 11.4.1 und 11.4.2) und in Projekten, in denen Bohrtiefen von 200 m nicht überschritten werden.
- Bohranlagen mit Hakenlasten zwischen 120 kN und 180 kN und Drehmomenten bis zu 33.000 Nm im unteren Kraftspülkopf und immerhin noch 17.000 Nm im oberen Kraftspülkopf erlauben das Teufen von Bohrungen bis 400 m und noch tiefer in allen geologischen Formationen in allen Bohrverfahren (siehe Abb. 11.5).

Allen Bohranlagen ist gemeinsam, dass sie sehr ergonomische und sehr übersichtliche Bedienungsstände haben. In vielen Fällen erfolgt die Steuerung aller Funktionen elektro-hydraulisch. Einige Hersteller verlegen den Steuerstand der Bohranlage aus Sicherheitsüberlegungen heraus möglichst weit weg vom Bohrlochmund oder bieten eine

Abb. 11.4 Bohranlage AGBO Typ G 150 R während einer Sondenbohrung im Spülbohrverfahren mit teilweiser Verrohrung. (© Celler Brunnenbau)

Kabelfernsteuerung als Alternative an. Mit der Kabelfernsteuerung können die Bohrgeräte jedoch nicht eingerichtet/aufgebaut werden, das erfolgt weiterhin handgesteuert (siehe Abb. 11.6).

Alle Bohranlagen, die zum Bohren von Erdwärmesonden eingesetzt werden, ist gemein, dass sie mit Spülpumpen bestückt sind. Nicht selten ist eine Exzenterschneckenpumpe auf den Geräten montiert (siehe Abb. 11.5), die sowohl zum Verpumpen von Spül- und Stützflüssigkeiten während des Bohrens eingesetzt wird, als auch zum Verpressen von Abdichtmaterialien nach Einbau der Erdwärmesonden. Dafür sind diese Pumpen gut geeignet, weil sie Drücke bis 24 bar produzieren und gleichmäßiger fördern als Kolbenpumpen.

Kreiselpumpen mit unterschiedlichen Fördermengen (2000–3000 l/min) und unterschiedlichen Druckstufen (6–10 bar) sind oft absenkbar (geringere Ansaughöhe) an den Bohrgeräten angebaut (siehe Abb. 11.7).

Nahezu alle großen Geothermiegeräte haben neben den o .g. Spülpumpen zusätzlich kleine Triplexpumpen aufgebaut, die bei relativ kleinen Volumenströmen hohe Drücke (40–50 bar) produzieren. Diese Pumpen werden benötigt, wenn in Festgesteinsfolgen mit Im-Loch-Hammer-Technik gebohrt wird, um geringe Mengen Wasser oder ein niedrig viskoses Wasser-Polymer-Gemisch dem Luftstrom für den Antrieb des Im-Loch-Hammers beizumischen (siehe Abschn. 11.4.3 und Abb. 11.8) und somit auch den Bohrgutaustrag zu verbessern.

Abb. 11.5 Geothermiebohranlage Nordmeyer GeoVario-Line mit Exzenterschneckenpumpe und Kreiselpumpe für Bohrtiefen bis 400 m und 180 kN Hakenlast. (© Nordmeyer)

Auf Wunsch bieten heute alle Hersteller von Geothermiebohranlagen zusätzliche Auf- und Anbauten an, wie z. B. Sondenhaspeln zum einfacheren Einbau der Doppel-U-Sonden (siehe Abb. 11.4). Es können aber auch Auslegerarme am Bohrmast montiert sein (siehe Abb. 11.6), um Bohrrohre und Casingrohre sicher zu handhaben. Häufig ist eine dritte Abfangzange oder Klemmvorrichtung zusätzlich montiert, um Ein- und Ausbauten von Verrohrungen, Bohrrohren, Bohrwerkzeugen oder einzubauenden Materialien mit größtmöglicher Sicherheit zu gewährleisten (siehe Abb. 11.6).

Alle diese Zusatzausrüstungen können bei Gerätebreiten von 2 m an- oder aufgebaut werden. Das ist jedoch nicht mehr möglich, wenn der Anbau von Teleskopkränen realisiert werden soll, wie das in Abb. 11.9 zu sehen ist. Ein solcher Aufbau führt zu einer Gerätebreite von 2,40–2,50 m, nicht jedoch zu höheren Transportabmessungen.

11.3.2 Das Bohrzubehör

Unter Bohrzubehör werden an dieser Stelle alle Ausrüstungsgegenstände verstanden, die im Bohrloch eingesetzt werden und solche, die dazu dienen, den Bohrvorgang wirtschaftlicher, sicherer und geräteschonender zu gestalten.

Heute werden zum Teufen von Geothermischen Bohrungen bei Bohrtiefen bis ca. 250 m standardmäßig zwei Gestängegarnituren eingesetzt. Beide Bohrrohrtypen werden

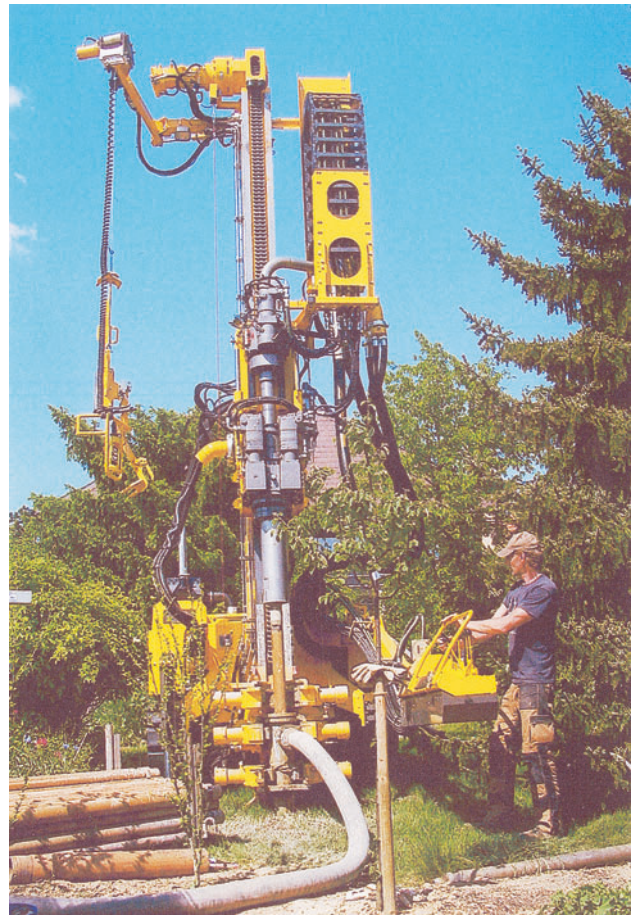


Abb. 11.6 Geothermiebohranlage Klemm Typ KR 805-2W mit schwenk- und höhenverstellbarem Steuerstand, Doppelkraftdrehkopf und drei Klemm- und Brechvorrichtungen. (© Klemm)

aus nahtlos gezogenen Rohren hergestellt und die Gewinde sind meistens in die Rohre geschnitten. Die Baulängen der Rohre sind 2000 mm (= 2 m).

Die größere Rohrtour hat einen Außendurchmesser von 177,8 mm und die Wandstärke kann 7,1 mm oder 8,0 mm betragen. Je nach Stahlgüte der Rohre können die Verbinder (Muffe und Zapfen) auch aus höherlegiertem Stahl hergestellt und im Reibschweißverfahren mit dem Trägerrohr verbunden werden. Diese Rohrtour wird als Hilfsverrohrung in bestimmten geologisch bedingten Tiefen abgesetzt (siehe Abschn. 11.4.2 und 11.4.3) und hat Linksgewinde und ist außen und innen immer glatt, das heißt im Muffen-Zapfen-Bereich weder nach innen noch nach außen verdickt. Die schlankere Bohrrohrtour kann einen Außendurchmesser von 83 mm oder 95 mm haben. Der Einsatz der größeren Bohrrohrdurchmesser findet speziell dann Anwendung, wenn die Bohrungen mit 150 mm Endbohrdurchmesser gebohrt werden (siehe Abschn. 11.4.2). Die Wandstärken der Rohre und auch die Stahlqualität variiert je nach Hersteller. Gängige Rohrwandstärken sind

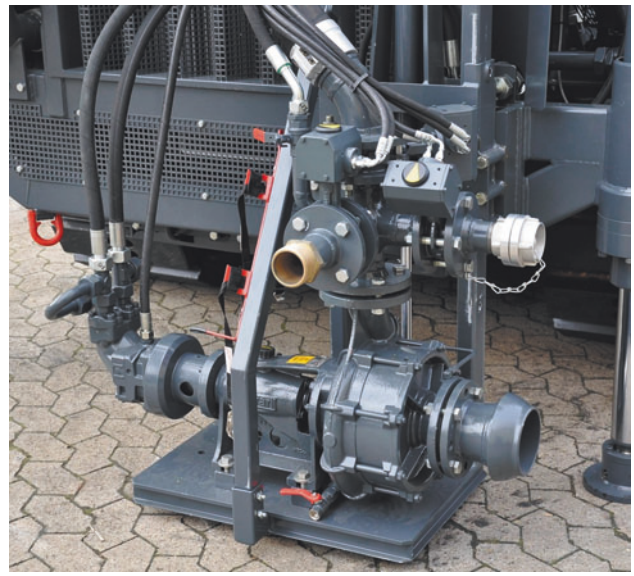


Abb. 11.7 Hydraulisch angetriebene absenkbare Kreiselpumpe zum Anmischen von Bohrspülung und zum Rotary-Druckspülbohren. (© Nordmeyer)

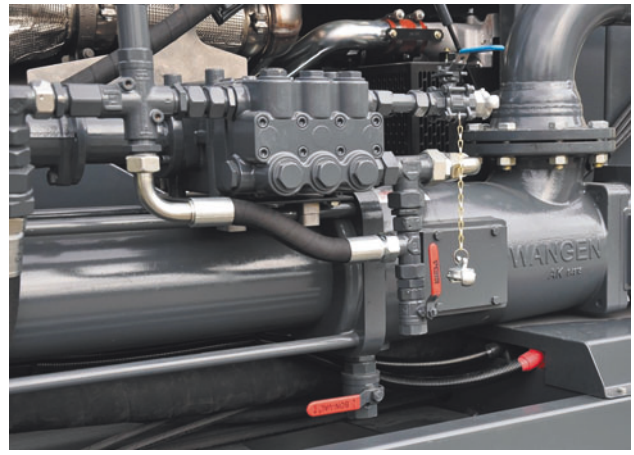


Abb. 11.8 Triplex-Pumpe (90 l/min bei max. 50 bar) zum Zusetzen von einem Wasser-Polymer-Gemisch beim Im-Loch-Hammer-Bohren. (© Nordmeyer)

7,1 mm und 8,0 mm. Die Rohre haben immer Rechtsgewinde und sind meistens innen und außen glattwandig. Einige Hersteller bieten Sonderbohrrohre mit deutlich größeren Wandstärken an, die auch Schlüsselflächen für Gestängemanipulatoren haben. Diese Rohre werden bevorzugt für tiefe Im-Loch-Hammer-Bohrungen eingesetzt (Teufen > 200 m), weil sie mit ein Garant dafür sind, dass die Bohrungen weitestgehend vertikal verlaufen.

Um bei dieser Art Bohrungen den oberen Kraftdrehkopf und den Bohrstrang zu schonen, empfehlen einige Gerätehersteller den Einbau eines Dämpfers oder auch Schockabsorbers, der die beim Bohren rückwärtig auftretenden Kräfte absorbiert.

Abb. 11.9 Nordmeyer-Geothermiebohranlage der GeoVario-Serie mit seitlich aufgebautem Teleskopkran. (© Nordmeyer)

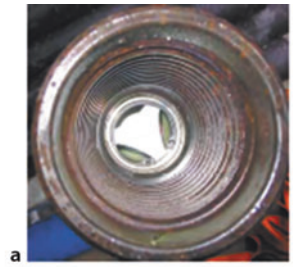
Es gibt zwei unterschiedliche Typen von Schockabsorbern. Ein Typ wird direkt über dem Im-Loch-Hammer in den Bohrstrang eingebaut und schützt somit nicht nur den Kraftdrehkopf, sondern auch den Bohrstrang, während die zweite kompliziertere Variante in den Kraftdrehkopf, der die Bohrrohre antreibt, integriert ist.

Im Laufe der letzten 15 Jahre hat sich auch die Weiterentwicklung der Bohrwerkzeuge, sowohl für Rotary-Bohrungen als auch für das Bohren mit Tieflochhämmern, erheblich beschleunigt (siehe Abschn. 11.4.1–11.4.3).

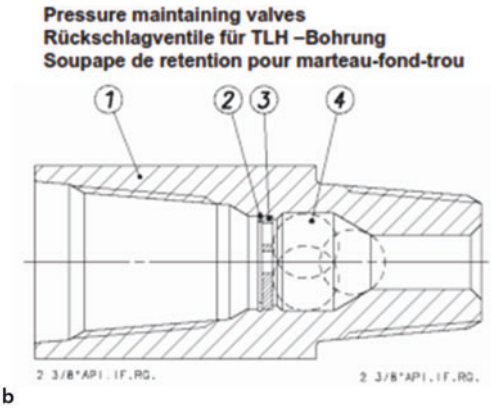
Für tiefe Bohrungen mit dem Im-Loch-Hammer (> 200 m) hat sich der Einbau von einem bis drei Rückschlagventilen in bestimmten Abständen in den Bohrstrang bestens bewährt, (siehe Abb. 11.10), die verhindern, dass komprimierte Luft beim Gestänge nachsetzen durch die Bohrrohre nach über Tage entweicht, und somit sichergestellt ist, dass die Bohrlochsohle beim Weiterbohren frei von Bohrklein ist.

Ein anderes sehr hilfreiches Zubehör für das Bohren von Erdwärmesonden sind die unterschiedlichen Bohrlochsicherungssysteme (Preventer) in Verbindung mit Auslaufköpfen und Schläuchen (siehe Abb. 11.4 und 11.6). Mit diesen Ausrüstungsgegenständen in Verbindung mit Spülungswannen oder Spülungstanks wird sichergestellt, dass Beeinträchtigungen der Umwelt minimal sind. Heute nicht mehr wegzudenken auf Geothermie-Bohrstellen sind Sondenhaspeln, ohne die ein sicherer und technisch einwandfreier Einbau der Einfach- oder der meistens verwendeten Doppel-U-Sonde gar nicht möglich ist. Für Bohrungen bis ca. 150 m sind die Sondenhaspeln häufig am Bohrgerät montiert (siehe Abb. 11.4), während Sondenhaspeln, die bis zu 250 m Doppel-U-Sonden aufnehmen können, meistens mit einem Kran über der Bohrung positioniert werden, um die Sonde sicher einbauen zu können (siehe Abb. 11.11 und Kap. 14).

Da auch für Bohrungen bis 400 m Tiefe die Erdwärmesondenrohre fertig konfektioniert und getestet auf die Baustelle geliefert werden, kann deren Transport an die Bohrung nur mithilfe von Anhängern wie in Abb. 11.12 gezeigt sichergestellt werden, wo dann der sondenschonende Einbau von der Haspel erfolgt (siehe Kap. 14).



a



b

Abb. 11.10 **a** Blick auf das Rückschlagventil von oben, **b** technische Details des Rückschlagventils. (© Klemm)

11.3.3 Das Spülungstanksystem

Die Bohrarbeiten für den Einbau von Erdwärmesonden müssen sehr oft auf engstem zur Verfügung stehenden Raum ausgeführt werden. Neben Umweltschutzauflagen ist das der Grund, warum heute alle Bohrungen – egal mit welchem Bohrverfahren geteuft – unter Einsatz von Spülungswannensystemen ausgeführt werden.

Diese Tanksysteme dienen beim Rotary-Bohren einerseits zum Anmischen von Bohrspülungen, andererseits zum Auffangen und Absetzen des während des Bohrens geförderten Bohrkleins. Das während der Bohrarbeiten zur Verfügung stehende Spülungstankvolumen (siehe Abb. 11.13) sollte mindestens dem Zweifachen – besser aber dem Dreifachen – des zu erwarteten Bohrlochvolumens entsprechen, um einerseits einen reibungslosen Ablauf der Bohrung auch bei auftretenden Spülungsverlusten zu gewährleisten und andererseits das Absetzen der aus der Bohrung geförderten Feststoffe zu garantieren. Ob das benötigte Tankvolumen aus mehreren kleinen Spülungswannen oder aus einem größeren Tank besteht, hängt von den zu erwarteten geologischen Gegebenheiten und dem daraus resultierenden Bohrverfahren (Rotary- oder Hammerbohren) ab (siehe Abschn. 11.4.1–11.4.3). Um eine weitgehend feststofffreie Spülung im Kreislauf zirkulieren zu können, sollten bei Bohrungen in tonigen und schluffigen Formationen aber Schüttelsiebe und/oder Desander bzw. Desilter-Systeme auf den Tanks installiert sein.

Abb. 11.11 Einbau einer Erdwärmesonde von einer am Bohrgerät angebauten Haspel. (© Nordmeyer)

11.3.4 Das Verpresssystem/die Kompaktmischanlage

Wie im Abschn. 11.2) dargelegt, wurden vor ca. 30 Jahren für die Verfüllung des Ringraumes von Erdwärmesonden keine Kompaktmischanlagen, wie sie heute standardmäßig eingesetzt werden, genutzt. Erst seit solche Bohrungen tiefer als 100 m geführt werden und bei größeren Projekten durchaus mehrere 100 Erdwärmesonden auf engem Raum niedergebracht und deren Ringräume lückenlos verfüllt werden müssen, hat sich der Einsatz von Kompaktmischanlagen bestens bewährt und als Standard etabliert.

Diese Kompaktanlagen, egal von welcher Firma oder sogar als „Eigenbau“ von den Bohrfirmen selbst hergestellt, bestehen immer aus einem hochtourigen Kolloidalmischer, einem Stapel- oder Vorratsbehälter und einer Pumpe zum Verpressen des Verfüllmaterials (siehe Abb. 11.14).

Mit solchen Verpresseinheiten ist eine gleichbleibend homogene und hochwertige thixotrophe Herstellung der Verpresssuspension gewährleistet. Solche Mischanlagen sind seit Jahrzehnten für das Verpressen von Dauerankern und anderen Arbeiten des Spezialtiefbaues im Einsatz, also grundsätzlich gar nichts Neues. Da die Ringräume mittels Zementierlanzen im Kontraktorverfahren verfüllt bzw. verpresst werden, sind die Kompaktmischanlagen mit Exzenterschneckenpumpen ausgestattet, die sich bei Bohr- und

Abb. 11.12 Sondenhaspel mit fertig konfektionierter 400 m langer Doppel-U-Sonde. (© Nordmeyer)

Abb. 11.13 Spülwannensystem mit Spülungstrichter. (© Nordmeyer)

Installationstiefen der Erdwärmesonden bis ca. 400 m Tiefe bestens bewährt haben (siehe Abb. 11.14).

11.3.5 Benötigter Platzbedarf

Immer wieder ist bei Ausschreibungen und letztlich bei der Vergabe von Bohrarbeiten der „benötigte Platzbedarf“ für die Ausführung der Arbeiten ein Diskussions- manchmal auch ein Streitpunkt zwischen Auftraggeber und bauausführender Firma. Dies im Besonderen, wenn es um Bohrarbeiten in eng bebauten Bereichen geht. Letztlich wird

Abb. 11.14 MAT-Injektionseinheit IEC-40-H (Chargenmischer). (© MAT)

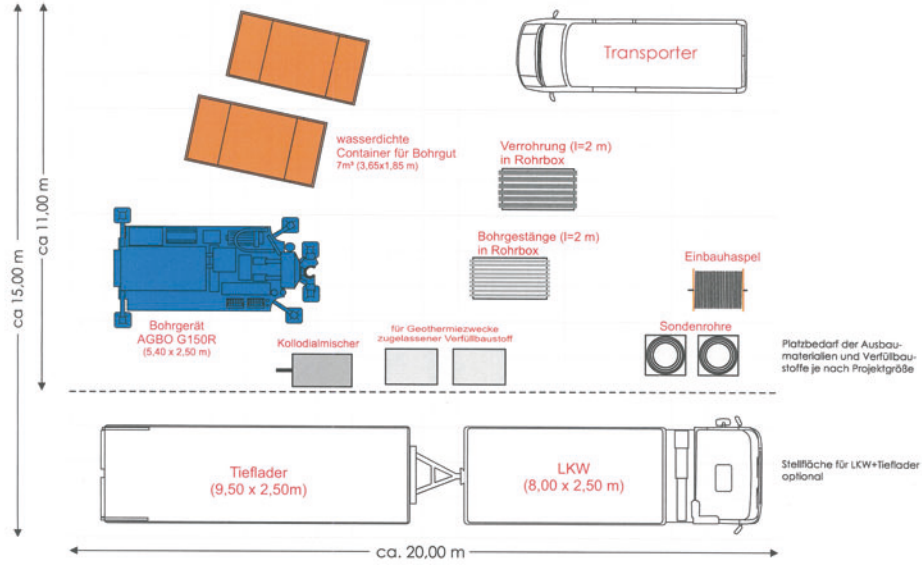


Abb. 11.15 Beispielhafte Bohrplatzeinrichtung für Erdwärmesondenbohrung. (© Celler Brunnenbau)

sowohl vonseiten des Auftraggebers als auch des Auftragnehmers versucht, den Platzbedarf während der Bauausführung möglichst klein zu halten. Gewisse Flächen müssen aber zur Verfügung stehen (siehe Abb. 11.15), um saubere Arbeitsabläufe und damit

die notwendige Arbeitssicherheit zu gewährleisten. Sicherlich kann der eine oder andere Ausrüstungsgegenstand anders als dargestellt positioniert werden, aber ein minimaler Platzbedarf von ca. 250–300 m^2) muss für einen sicheren reibungslosen Arbeitsablauf zur Verfügung stehen (siehe Abb. 11.15).

11.3.6 Die Logistik während der Bohrarbeiten

Bei Projekten, für die mehr als zwanzig Erdwärmesonden auf begrenztem Raum niedergebracht und ausgebaut werden müssen, hängt der zeitliche und technische Erfolg der Projektausführung nicht von der Anzahl der zum Einsatz kommenden Bohranlagen ab. Viel wichtiger ist hierfür die Organisation der Bauabläufe. Hier gilt es, das einzusetzende Bohrverfahren auf die geologischen Gegebenheiten anzupassen und dieses vor Beginn der Bauausführung perfekt zu planen. Diese Planung – auch *drilling work on paper* (DWOP) genannt – schließt alle Arbeiten wie:

- Mobilisation und Demobilisation aller Gerätschaften,
- Auf- und Abbau des Bohrgerätes und das Umsetzen von Bohrpunkt zu Bohrpunkt,
- das Setzen eines Standrohres mit Preventer,
- die Installation und den Umbau eines Tanksystems,
- die Bestimmung der voraussichtlichen Absetztiefe einer Hilfsverrohrung und
- die Festlegung der zu erreichenden Endtiefe der Bohrungen ein.

Da es heute üblich ist, dass alle Ausbaumaterialien wie Doppel-U-Sonden und Verpressmaterialien dem Bauablauf folgend *just in time* auf die Baustelle geliefert werden, können die Bohrarbeiten optimal auf die Erstellung aller anderen Gewerke, wie der Verlegung der Vorlauf- und Rücklaufrohre und der Sammler- und Verteilerschächte abgestimmt werden (siehe Abb. 11.16).

Nur wenn die Platzverhältnisse für die Erstellung von großen Sondenfeldern sehr großzügig sind, kann der Einsatz von mehr als zwei Bohranlagen gleichzeitig von wirtschaftlichem Vorteil sein, zumal die Bohranlagen bei der Ausführung solcher Projekte immer häufiger im Zweischichtbetrieb, d. h. in Tag- und Nachtschicht betrieben werden (siehe Kap. 14).

11.4 Die Bohrverfahren

Im Folgenden werden lediglich die drei gängigsten Bohrverfahren beschrieben, mit denen heute in Mitteleuropa etwa 95–98 % aller Bohrungen für den Einbau von Erdwärmesonden geteuft werden.

Für die Ausführung aller im Folgenden beschriebenen Bohrverfahren für die Erstellung von Erdwärmesonden sollten nur Bohrunternehmen beauftragt werden, die gemäß DWGW W 120 oder vergleichbar qualifiziert sind. Das bedeutet auch, dass die Bohrarbeiten von

Abb. 11.16 Während mit der Bohranlage die Doppel-U-Sonde eingebaut wird, werden gleichzeitig Vor- und Rücklaufrohre verlegt. (© Celler Brunnenbau)

einem gemäß DIN 22475-1 ausgebildeten und qualifizierten Bohrgeräteführer ausgeführt werden müssen!

11.4.1 Das Rotary-Druckspülbohrverfahren ohne Hilfsverrohrung

Für das Niederbringen von bis zu 100 m tiefen Bohrungen zum Einbau von Doppel-U-Sonden in Lockergesteinsformationen wie Tonen, Schluffen und Sanden, die zu dem noch wassergesättigt sind, ist das wirtschaftlichste Bohrverfahren das Rotary-Druckspülbohrverfahren (siehe Abb. 11.17).

Für solche Bohrungen, die in den meisten Fällen einen Endbohrdurchmesser von 150 mm haben, muss nicht unbedingt eine Bohranlage mit Doppelkopf als Drehantrieb eingesetzt werden, sondern ein Drehantrieb ohne Spannkopf ist ausreichend. Somit ist es auch nicht notwendig Bohrrohre, die außen glatt sind, einzusetzen. Für diese Art Bohrungen werden entweder Bohrrohre mit einem Außendurchmesser von 82,5 mm (95 mm über der Muffe) oder von 108,0 mm (121 mm über der Muffe) eingesetzt. Beide Bohrrohrtypen haben eine Wandstärke von 8,0 mm. Damit sind beide Rohrstränge sehr stabil. Durch den Einsatz von Meißelstabilisatoren und Schwerstangen kann gewährleistet werden, dass die Bohrungen nahezu vertikal oder wenn gewünscht auch richtungstreu leicht geneigt geteuft werden können. Ganz wichtig ist, dass eine Auftriebsgeschwindigkeit der mit Bohrgut aufgeladenen Spülung von mindestens 0,7 m/s., idealerweise

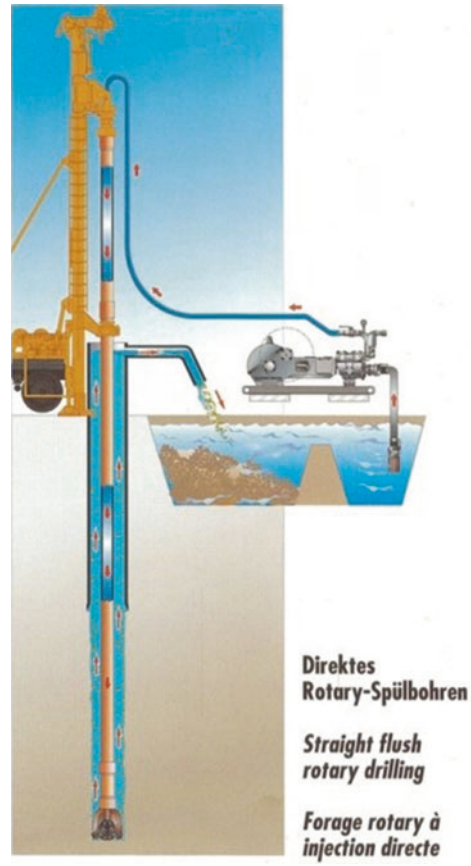


Abb. 11.17 Schematische Darstellung des Rotary-Druckspülbohrverfahrens mit Standrohr und Auslaufkopf. (© Nordmeyer)

von etwa 1,0 m/s. erreicht wird. Dafür müssen den Bohrgestängedurchmessern angepasst entsprechend große Kreisel-, Kolben- oder Exzenterschneckenpumpen für das Bohren zur Verfügung stehen, die Pumpraten von mindestens 700 l/min gewährleisten. Diese geforderten Auftriebsgeschwindigkeiten sind auch dazu notwendig, um das Bohrklein tatsächlich teufengerecht und ohne Beimischungen von Nachfall aus darüberliegenden Gesteinsformationen zutage zu fördern. Um ein möglichst kaliberhaltiges Bohrloch zu produzieren, werden der Spülflüssigkeit geringe Mengen von Spülungsadditiven beigemischt, um die Viskosität (Tragfähigkeit) der Spülflüssigkeit zu erhöhen und damit die Bohrlochwand zu benetzen und Auskolkungen zu verhindern. Am häufigsten werden Polymere unterschiedlicher Reinheit als Spülungszusatz verwendet. Je nach geologischen Gegebenheiten kann zusätzlich Bentonit eingesetzt werden, wodurch sich aber die Separation des Bohrkleins aus der Spülflüssigkeit in dem Tanksystem über Tage deutlich erschwert. In Einzelfällen führt die Beimischung auch von geringen Mengen Bentonit dazu, dass für die Spülungsaufbereitung (Bohrkleinseparation) zusätzlich Schüttelsiebe oder gar Desandersysteme zur Reduzierung des Feststoffanteils eingesetzt werden müssen

(siehe Abschn. 11.4.2). Besondere Bedeutung bei der Anwendung dieser Bohrmethode hat das Setzen des Standrohres mit dem Auslaufkopf oder Auslauftopf, um einen perfekten Spülungskreislauf zu dem Tanksystem sicherzustellen.

Die Verbindung von dem Auslaufkopf zu dem Wannensystem sollte wie in Abb. 11.18 gezeigt eine offene „Rinne“ sein, aus der in den zuvor festgelegten Abständen (nach jedem Meter oder bei jedem Schichtwechsel) die teufengerechten Bohrproben entnommen werden können.

Darüber hinaus kann ein erfahrener Bohrgeräteführer durch die Beobachtung des Spülungsrückflusses aus der Bohrung Rückschlüsse auf mögliche Spülungsverluste während des Bohrens ziehen und darauf entsprechend reagieren. Reaktionen können sein:

- Erhöhung der Dichte der Spülung,
- Veränderung der Zusammensetzung der verwendeten Additive,
- Erhöhung der Spülmenge, um Spülungsverluste zu kompensieren.

Die Weiterentwicklung der Bohrwerkzeuge für das Teufen solcher Bohrungen in den letzten Jahren hat auch dazu geführt, dass der Bohrfortschritt deutlich erhöht werden konnte und das bei gleichzeitig längeren Standzeiten der Werkzeuge. Das liegt in erster Linie an den verbesserten Schneidplättchen aus polykristallinem synthetischem Diamant (PDC) und deren geometrischen Anordnung auf den Stufenmeißeln.

Somit ist das Rotary-Druckspülbohrverfahren ohne Hilfsverrohrung in den Regionen, in denen die geologischen Verhältnisse wie oben beschrieben sind und die Bohrtiefen es zulassen, das wirtschaftlichste aller Bohrverfahren und es kommt auch deshalb immer wieder zur Anwendung.

Abb. 11.18 Auslaufrinne vom Auslaufkopf in die Spülwanne. (© Prakla Bohrtechnik)

11.4.2 Das Rotary-Druckspülbohrverfahren mit gleichzeitiger Verrohrung

In vielen Fällen lassen die geologischen Verhältnisse es nicht zu, das Rotary-Druckspülbohrverfahren wie oben beschrieben einzusetzen, sondern es müssen bestimmte oberflächennahe Bereiche der Bohrungen gleichzeitig mit dem Bohren temporär verrohrt werden. Die Gründe für das gleichzeitige Bohren und Verrohren sind immer geologisch bzw. hydrogeologisch bedingt.

Gründe können z. B. darin liegen, dass die oberflächennahen Schichten nicht grundwassergesättigt sind und daher erhebliche Spülungsverluste die Folge sind. Diese Spülungsverluste verursachen in den allermeisten Fällen eine deutliche Vergrößerung des Bohrlochkalibers, was wiederum sehr nachteilig für eine ordnungsgemäße Verfüllung des Ringraumes um die Erdwärmesonde ist.

Ein anderer Grund für das Bohren mit Doppelkopf-Bohranlage, d. h. für das Bohren und Verrohren in einem Arbeitsschritt (siehe Abb. 11.19), kann darin begründet sein, dass im tieferen Teil einer Bohrung Festgesteinsfolgen angetroffen werden, die mit einem anderen Bohrwerkzeug wirtschaftlicher gebohrt, d. h. schneller geteuft werden können. Dies sind dann Rollenmeißel oder Vollbohrwerkzeuge, die mit polykristallinen Diamantplättchen besetzt sind (siehe Abb. 11.20).

Wie in Abb. 11.19 dargestellt, erfolgt der Spülungs- und damit der Bohrgutaustrag bis zum Absetzen der Verrohrung über ein Preventersystem zwischen dem unteren und oberen Drehantrieb (siehe Abb. 11.21). Nachdem die Verrohrung (in den meisten Fällen sind

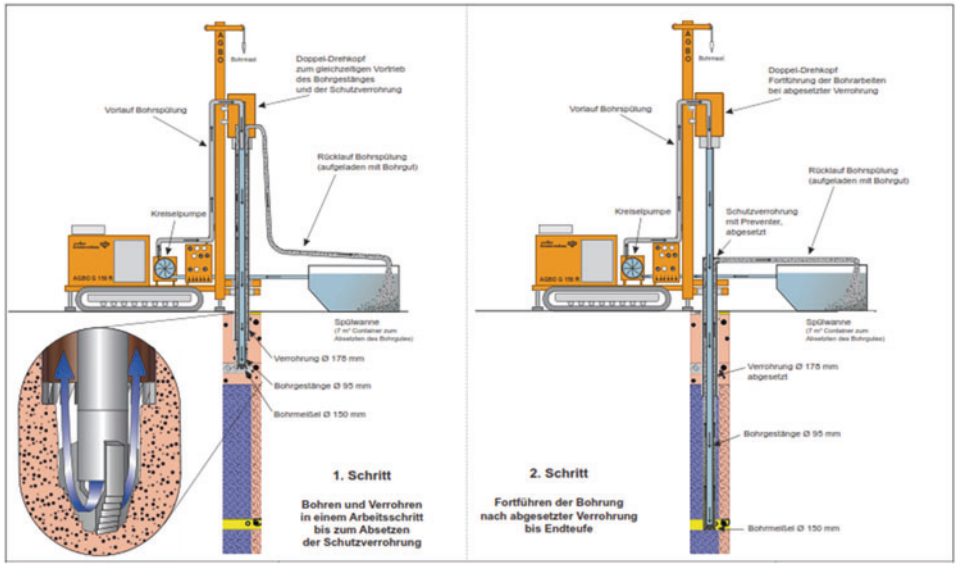


Abb. 11.19 Das Rotary-Spülbohrverfahren mit gleichzeitigem Verrohren unter Verwendung einer Doppelkopf-Bohranlage. (© Celler Brunnenbau)

Abb. 11.20 Vollbohrwerkzeuge mit polykristallinen Diamantplättchen besetzt. (© Comdrill)

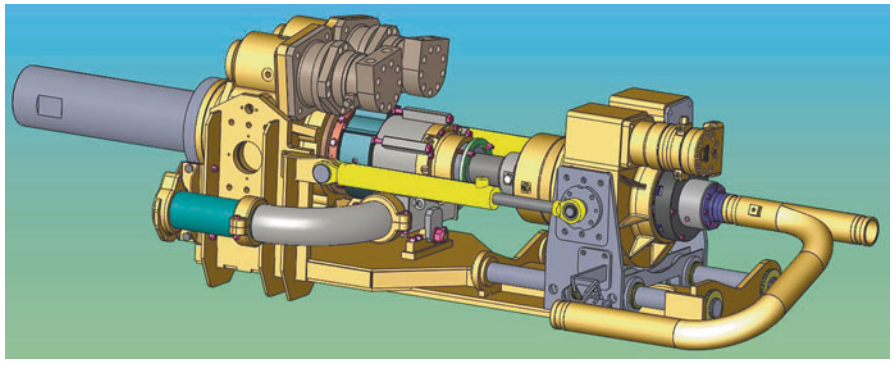


Abb. 11.21 Spülungspreventer zwischen unterem und oberen Drehantrieb. (© Klemm)

das Rohre mit einem Außendurchmesser von 178 mm) abgesetzt ist, wird mit dem oberen Drehantrieb und der schlankeren Bohrrohrtour tiefer gebohrt. Die mit Bohrgut aufgeladene Spülung wird jetzt über einen Auslaufkopf oder Preventer, der auf der Schutzverrohrung montiert ist (Abb. 11.19) und über eine Spülungsrinne oder einen Spülschlauch dem Tanksystem zugeführt. (siehe Abb. 11.4, 11.6, Abb. 11.18 und 11.19)

Da mit den modernen PDC-Vollbohrwerkzeugen (Abb. 11.20) im Zusammenspiel mit den leistungsstarken Drehantrieben Bohrfortschritte von 20 m/h nicht mehr die Ausnahme, sondern eher die Regel sind, kommt der obertägigen Spülungsaufbereitung eine besondere Bedeutung zu. Bei einem Bohrdurchmesser von 150 mm (= 6“) fallen bei einem Bohrfortschritt von 20 m/s mindestens 360 l/h Bohrklein an, das sind je nach geologischen Formationen zwischen 800 kg (bei einer Dichte von 2,2 kg/l) und ca. 1000 kg (bei einer Dichte von 2,8 kg/l), die aus der Spülung getrennt werden müssen. Wie in Abschn. 11.3.3 beschrieben, sollte die Spülungsaufbereitung, d. h. die Separation der Feststoffe aus der

Spülung, den erbohrten geologischen Formationen angepasst sein. Eine feststofffreie Spülung erhöht die Standzeiten der Bohrwerkzeuge erheblich und verringert den Verschleiß der Bohrgarnitur und aller Spülleitungen erheblich. Was den Einsatz von Spülungsadditiven betrifft, gilt beim Einsatz von Doppelkopf- Bohranlagen und beim gleichzeitigen Bohren und Verrohren das in Abschn. 11.4.1 gesagte.

Wichtig festzuhalten bleibt, dass es heute durch den Einsatz moderner Bohranlagen, perfekter Bohrstranggarnituren und der Geologie angepasster Bohrwerkzeuge – und das alles betrieben von bestens geschulten Geräteführern – möglich ist, an einem Tag (14–16 h) durchschnittlich 200–250 m Erdwärmesondenbohrungen abzuteufen, diese auszubauen und ordnungsgemäß zu verfüllen (siehe Grosspeter Tower, Basel).

11.4.3 Das Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren mit Luft als Spülungsmedium

Für das Teufen von Bohrungen für den Einbau von Erdwärmesonden in Felsformationen (Bodenklasse 5–7) hat sich das Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren mit Luftspülung bestens bewährt und damit durchgesetzt.

Das drehend schlagende Bohrverfahren erfordert den Einsatz zweistufiger Hochdruckkompressoren, um den Im-Loch-Hammer mit dem Stiftbohrmeißel oder *button bit* anzutreiben.

Da die grundlegenden technischen und physikalischen Parameter des Im-Loch-Hammerbohrens als bekannt vorausgesetzt werden, soll hier auf einige Entwicklungen der letzten Jahre eingegangen werden, die dieses Bohrverfahren deutlich effizienter und damit wirtschaftlicher werden ließen. Zum einen werden die Hämmer weiterentwickelt, d. h. ihre Schlageffizienz bei gleichem Kompressordruck und bei gleicher Luftmenge ist verbessert worden, aber auch die Standzeit der *button bits* (siehe Abb. 11.22) wurde deutlich verbessert. Dies wurde in erster Linie dadurch erreicht, dass die Öffnungen des Luftaustritts aus den Meißeln vergrößert und auch anders angeordnet wurden (siehe Abb. 11.23). Des Weiteren wurden mehr und größere „Öffnungen“ (*slots*) geschaffen, um die Bohrlochsohle besser und schneller von deren Bohrklein (*cutting*s) zu reinigen.

Es wurden neue Oberflächen der Bohrmeißel mit neuen z. T. unterschiedlichen Hartmetallstiften (*buttons*) auf einem Meißel gefertigt. Darüber hinaus kann man heute mit Werkzeugen, die die Hersteller der Bohrwerkzeuge (*button bits*) liefern, jede Geometrie der Hartmetallstifte, ob rund oder ballistisch, nachschleifen und somit die Standzeiten der Bohrmeißel erheblich verlängern.

Da in früheren Zeiten mit der Im-Loch-Hammer-Bohrmethode vorwiegend kurze Bohrungen (15–100 m kurze Sprengloch- oder Ankerbohrungen) geteuft wurden, kam dem Schutz des Außenkalibers der Bohrmeißel keine sehr große Bedeutung zu. Da das aber für das Teufen von Bohrungen bis 400 m und dann in stark abrasiven geologischen Formationen wie Quarziten, anderen hochmetamorphen Gesteinen oder magmatischen Gesteinen immens wichtig ist, sind die Außenkaliber der Bohrwerkzeuge deutlich verstärkt. Diese

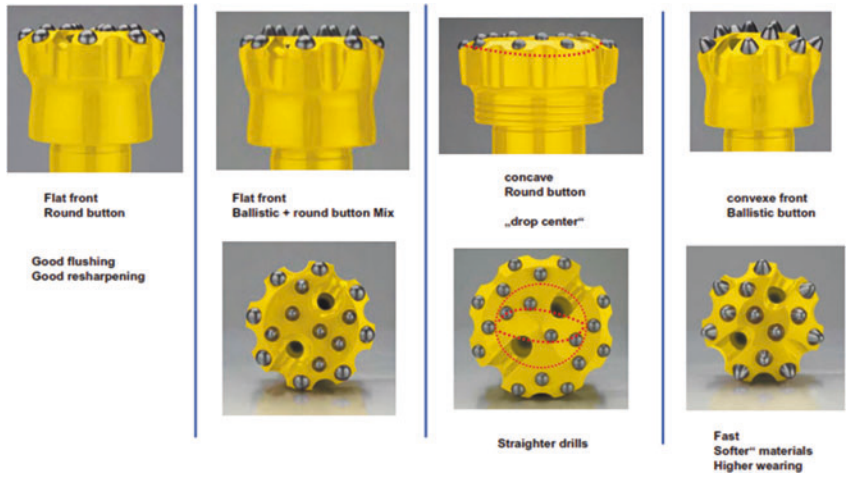


Abb. 11.22 Bohrkronen mit unterschiedlichen Oberflächen und Luftwegen. (© Klemm)

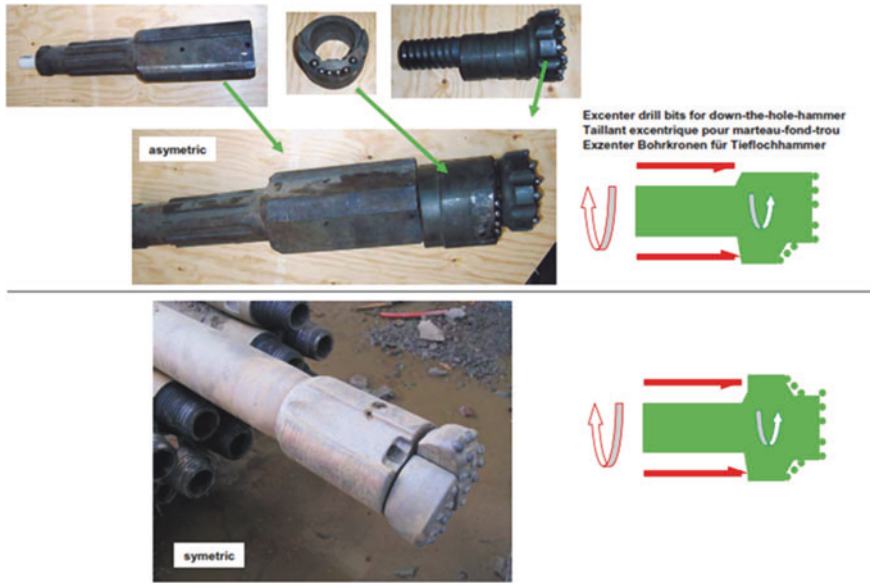


Abb. 11.23 Exzenter-Bohrmeißel. (© Klemm)

Weiterentwicklung in Verbindung mit den größeren und zahlreicheren *slots* an den Meißeln garantiert heute – bei ordnungsgemäßem Einsatz solcher Meißel – Standzeiten von 400–600 m bei gleichzeitig verbessertem Bohrfortschritt (siehe weiter unten). Bei optimalen Bohrbedingungen sind sogar Standzeiten von bis zu 800 m pro Bohrmeißel erreichbar.

Da die geologischen Gegebenheiten aber in vielen Fällen ein Verrohren der ersten 5–50 m einer Bohrung erforderlich machen, weil Verwitterungshorizonte anstehen oder Wechsellagerungen von weichen und harten Gesteinen die im tieferen Teil der Bohrung anstehenden sehr harten Felsarten überlagern, die aber dennoch mit der Im-Loch-Hammer Bohrmethode gebohrt werden sollen, ist das nur mit gleichzeitigem Verrohren der Lockergesteinsformationen möglich. Dafür werden heute exzentrische Bohrmeißel eingesetzt, mit denen entweder symmetrisch oder asymmetrisch (siehe Abb. 11.23) ein so großer Durchmesser gebohrt wird, der das gleichzeitige Mitführen einer entsprechend großen Hilfsverrohrung erlaubt. Nachdem die Hilfsverrohrung in entsprechender Tiefe nach Antreffen von standfesten Gesteinsfolgen abgesetzt ist, wird entweder mit dem größeren Bohrdurchmesser weitergebohrt oder das Bohrwerkzeug gewechselt und mit einem Meißel gebohrt, der auf den Innendurchmesser der Hilfsverrohrung angepasst ist.

Um die Bohrmethode wirtschaftlich einzusetzen, sind folgende Dinge unbedingt zu gewährleisten:

- Niemals mit mehr als ca. 1 t Andruck auf Bohrlochsohle bohren, um die Schlagenergie des Hammers optimal zu nutzen.
- Bei einem Meißeldurchmesser zwischen 5“ und 6,5“ (das sind die gängigen Bohrdurchmesser für Erdwärmesondenbohrungen) niemals mit mehr als 20 U/min rotieren.
- Zugabe von Wasser bzw. von Wasser und Schaum in den Luftstrom, um Staubbildung über Tage zu verhindern, den Schlagkolben zu schmieren und zu kühlen, das Werkzeug besser zu reinigen und den Austrag der möglichst großen *cuttings* zu verbessern.
- Eine Auftriebsgeschwindigkeit des Bohrgutes durch eine genügend große Luftmenge von ca. 20 m/sec. gewährleisten.

Wenn all diese technischen Voraussetzungen gegeben sind und die Geräteführer erfahren sind, gibt es heute kein wirtschaftlicheres Bohrverfahren, um Bohrungen für die Installation von Erdwärmesonden in geologischen Formationen der Bodenklasse 5–7 zu teufen.

Literatur

Urban, D.: Arbeitshilfen für den Brunnenbauer. 2. vollständig überarbeitete Auflage. wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 608 Seiten (2013)

Die Anforderungen der Wärmepumpe an die Wärmequelle

12

Martin Sabel und Alexander Sperr

Inhaltsverzeichnis

12.1 Die Wärmepumpe 396
12.2 Energieeffizient Heizen und Kühlen 398
12.2.1 Energieeffizienz – was ist das? 398
12.2.2 Energieeinsparverordnung (EnEV) 398
12.2.3 Energieeffizienz von Wärmepumpen 400
12.2.4 Kühlen mit Wärmepumpen 404
Literatur 408

Zusammenfassung

Neben dem Ausbau erneuerbarer Energien ist die Energieeffizienz eine weitere tragende Säule der Energiewende. Alleine durch Effizienzmaßnahmen und den direkten Einsatz erneuerbarer Energien wird die notwendige vollständige Dekarbonisierung des Gebäudesektors aber kaum gelingen. Um in diesem Sektor fossile Brennstoffe zu ersetzen, ist der Einsatz von Strom aus CO_2-freien und erneuerbaren Quellen notwendig. Daher werden bei der Sektorenkopplung vorrangig solche Technologien zum Einsatz kommen, die Strom möglichst effizient in Wärme und Kälte umwandeln. Wärmepumpen sind zudem flexible Verbraucher und können ihre Stromnachfrage an das fluktuierende Wind- und Solarstromangebot anpassen. Die Wärmepumpe ist daher die perfekte Technologie für die Energiewende im Wärmesektor. Die Effizienz des Wärmepumpensystems hängt neben der Güte der Wärmepumpe selbst von der Temperatur der Wärmequelle und der zu erreichenden Temperatur der Wärmesenke ab.

Martin Sabel (✉) · Alexander Sperr
Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V. Französische Straße 47, 10117 Berlin, Deutschland
e-mail: sabel@waermepumpe.de; sperr@waermepumpe.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_12

Schlüsselwörter
Wärmepumpe · Heizen · Kühlen · Energieeffizienz

12.1 Die Wärmepumpe

Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik kann Wärme, ohne die Aufwendung von Arbeit, ausschließlich von einem Niveau höherer Temperatur zu einem Niveau tieferer Temperatur fließen. Es erscheint auf den ersten Blick also ungewöhnlich, die Temperatur des Untergrundes von ca. 10 °C nutzen zu wollen, um ein Gebäude auf eine Raumtemperatur von 22 °C aufheizen zu wollen. Um dies zu ermöglichen, ist der Einsatz von Wärmepumpen notwendig. Eine Wärmepumpe ist eine thermodynamische Maschine, die Energie in Form von Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau aus einer Wärmequelle aufnimmt und nach Zufuhr von Antriebsenergie Wärme auf einem höheren Temperaturniveau an eine Wärmesenke wieder abgibt. Die Wärmeenergie der Umgebung wird dabei auf ein Kältemittel übertragen, welches dabei kälter ist als die Temperatur der Wärmequelle, womit der 2. Hauptsatz der Thermodynamik erfüllt wird. Bei erdgekoppelten Wärmepumpen, die oberflächennahe Erdwärme als Wärmequelle nutzen, beträgt das Verhältnis von der bereitgestellten Wärmeenergie zu der aufzuwendenden Antriebsenergie in der Regel mindestens 4:1, d. h. mit einem Teil Antriebsenergie werden mindestens 3 Teile regenerativer Umweltenergie hinzugewonnenen und es resultieren 4 Teile Wärmeenergie, die an das Heizungssystem abgegeben werden.

Man unterscheidet Kompressions- und Sorptionswärmepumpen, die sich in der Form der zugeführten Antriebsenergie unterscheiden. Kompressionswärmepumpen wird die notwendige Antriebsenergie in Form von mechanischer Energie zugeführt. Sorptionswärmepumpen hingegen nutzen Wärme als Antriebsenergie. In Abb. 12.1 ist das Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe dargestellt. Es handelt sich um einen Kreisprozess, in dem ein geeignetes Kältemittel in einem geschlossenen Kreislauf durch Zufuhr von Umweltwärme verdampft und nach Abgabe von Wärme an den Heizkreislauf des Gebäudes wieder kondensiert.

Im Einzelnen besteht der Kreisprozess einer Kompressionswärmepumpe aus folgenden Einzelprozessen:

- Verdampfung:
  Im Verdampfer der Wärmepumpe wird die gesammelte Wärmeenergie der Wärmequellenanlage über einen Wärmeübertrager an das Kältemittel der Wärmepumpe abgegeben. Die Siedetemperatur des Kältemittels unter den gegebenen Druckverhältnissen liegt unter der Umgebungstemperatur des Verdampfers, folglich siedet und verdampft das Kältemittel und nimmt so die Wärme auf, die kontinuierlich von der Wärmequelle bereitgestellt wird. Die auf niedrigem Temperaturniveau im Untergrund vorhandene

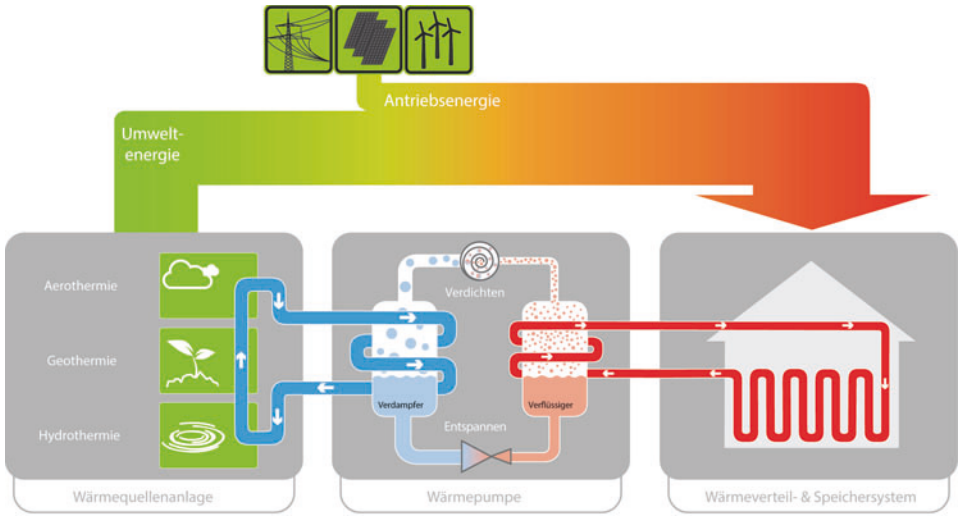


Abb. 12.1 Funktionsprinzip einer Wärmepumpe. (© BWP e. V.)

Wärmeenergie fließt also zum noch kälteren Kältemittel der Wärmepumpe. Sie wird durch die Energie aus dem Erdinneren und durch die Sonnenenergie, also durch nach menschlichen Dimensionen unerschöpfliche und regenerative Energiequellen, kontinuierlich ersetzt.

- Verdichtung:
  Das nun dampfförmige Kältemittel wird ständig vom Verdichter aus dem Verdampfer abgesaugt und verdichtet. Bei der Verdichtung steigen der Druck des Dampfes und dessen Temperatur.
- Verflüssigung:
  Im Kondensator der Wärmepumpe wird die Wärme an den Heizungsvorlauf abgegeben. Die im Verdampfer aufgenommene thermische Energie des Untergrundes, zuzüglich der durch die Verdichtung zugeführten elektrischen Energie, wird im Kondensator an das kältere Wasser des Heizungskreislaufs abgegeben. Es fließt also wieder Wärme von einem hohen zu einem niedrigeren Temperaturniveau. Bei diesem Vorgang kondensiert das Kältemittel.
- Expansion:
  Das flüssige Kältemittel wird über ein Expansionsventil wieder dem Verdampfer zugeführt. Es wird vom Kondensatordruck auf den Verdampferdruck entspannt, dabei kühlt es sich bis auf Verdampfertemperatur ab. Beim Eintritt in den Verdampfer sind also Anfangsdruck und Anfangstemperatur wieder erreicht. Der Kreislauf ist geschlossen und beginnt von Neuem.

Die Umweltwärme kann dabei aus verschieden Quellen stammen. Der Markt hält eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen für die Gewinnung von oberflächennaher Erdwärme

bereit. Grundsätzlich ist es zu empfehlen, die Wärmequellenanlage von einem Fachunternehmen ausführen zu lassen, welches ebenfalls die Anbindung der Wärmequelle bis in den Heizungsraum übernimmt. Dort sollte die Wärmequellenanlage mit Absperrventilen für den Vor- und Rücklauf unkompliziert von der Wärmepumpe abtrennbar sein. Man unterscheidet zwischen geschlossenen und offenen Systemen. In einem geschlossenen System zirkuliert ein Wärmeträgermedium in einem Kreislauf durch den Untergrund, wo es Wärmeenergie aufnimmt und diese über einen Wärmeübertrager an den Verdampfer der Wärmpumpe abgibt. Der geschlossene Kreislauf kann dabei sehr unterschiedlich ausfallen und je nach den speziellen Randbedingungen vor Ort gewählt werden. Offene Systeme hingegen nutzen die im Untergrund vorhandene Wärmeenergie, indem über eine Brunnenanlage Grundwasser an die Oberfläche gepumpt wird. Das Grundwasser gibt einen Teil seiner thermischen Energie an den Verdampfer der Wärmepumpe ab und das um wenige Grad abgekühlte Wasser wird anschließend wieder dem Grundwasserreservoir im Untergrund zugeführt.

12.2 Energieeffizient Heizen und Kühlen

12.2.1 Energieeffizienz – was ist das?

Energieeffizienz ist ein Maß für den Energieaufwand zur Erreichung eines bestimmten Nutzens. Ein Vorgang ist also dann effizient, wenn ein bestimmter Nutzen mit minimalem Energieaufwand erreicht wird. Je effizienter wir die uns zur Verfügung stehende Energie nutzen, desto mehr entlasten wir Klima und Portemonnaie. Die Bewertung der Effizienz eines Gebäudes (Heizung und Trinkwassererwärmung) bezieht sich auf den Bedarf an sogenannter „Primärenergie“. Diese berücksichtigt auch den Energieaufwand, der bei der vorgelagerten Prozesskette für Gewinnung, Verarbeitung und Transport des Energieträgers anfällt. Dieser Aufwand ist bei allen Energieträgern unterschiedlich. Die Menge Energie, die in einem Gebäude zur Wärmebereitstellung benötigt und für diesen Zweck „eingekauft“ wird, bezeichnet man hingegen als Endenergiebedarf. Um den Energiebedarf und damit die energetische Qualität verschiedener Gebäude vergleichbar zu machen, wird der Primärenergiebedarf auf die Nutzfläche eines Hauses bezogen. So regelt die Energieeinsparverordnung (EnEV), wie viel Primärenergie pro Quadratmeter und Jahr (kWh/(m^2a)) ein neu errichtetes Gebäude maximal für Heizung, Lüftung, Kühlung und Trinkwassererwärmung bzw. bei Nichtwohngebäuden auch für die eingebaute Beleuchtung verbrauchen darf.

12.2.2 Energieeinsparverordnung (EnEV)

12.2.2.1 Auswirkungen der EnEV

Seit dem 1. Mai 2014 ist die neue Energieeinsparverordnung (EnEV) bereits in Kraft, und sie brachte entscheidende Veränderungen mit sich. Die eigentlichen Verschärfungen

greifen jedoch erst seit dem 1. Januar 2016. Seit diesem Stichtag gelten 25 % schärfere Anforderungen an den Primärenergiebedarf von Neubauten. Auch wenn die Systematik der Berechnung nach dem 1. Januar 2016 grundsätzlich erhalten geblieben ist, führte die Art der Umsetzung der Verschärfung zu einer Änderung der Vorgehensweisen.

12.2.2.2 Referenzgebäudeverfahren

Unverändert erhalten blieb das Referenzgebäudeverfahren. Bei dem beschriebenen Referenzgebäude sind sowohl die energetische Qualität (U-Werte) der Bauteile der Gebäudehülle festgelegt als auch die technische Anlage zur Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung.

Der Jahresprimärenergiebedarf des zu errichtenden Gebäudes wird nun mit dem berechneten Jahresprimärenergiebedarf des entsprechenden Referenzgebäudes (mit gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung) verglichen. Dadurch bestehen einige Freiheitsgrade für die Ausführung des Gebäudes: Es kann zu Gunsten einer besseren Anlagentechnik (z. B. Wärmepumpenheizung) etwas weniger in einzelne Komponenten der Gebäudehülle investiert werden (Fenster, Wände etc.).

12.2.2.3 Verschärfung der Gesamteffizienz

Die neue EnEV setzt die Verschärfung der primärenergetischen Anforderungen ab Januar 2016 nicht direkt durch eine Anpassung des Referenzgebäudes um, sondern reduziert den zulässigen Jahresprimärenergiebedarf pauschal um 25 % (Multiplikation mit dem Faktor 0,75). Diese Umstellung der Methodik führt dazu, dass ein Gebäude, das genau wie das Referenzgebäude ausgeführt wird, die EnEV-Anforderungen nicht mehr erfüllt (Abb. 12.2).

Neben der reinen Verschärfung über den Faktor 0,75 wirken sich auf den Jahresprimärenergiebedarf auch noch die nachfolgend erläuterten Veränderungen aus:

Referenzklima

Die Verlagerung des Referenzklimas von Würzburg nach Potsdam bewirkt zusammen mit der Aktualisierung der Testreferenzjahre unterm Strich einen niedrigeren Jahresprimärenergiebedarf. Daher zieht diese Veränderung keine höheren Anforderungen an Gebäudehülle oder -technik nach sich.

Primärenergiefaktor

Durch die Absenkung des Primärenergiefaktors für Strom – genauer gesagt für den nicht erneuerbaren Anteil des Strommixes – von 2,6 auf 2,4 zum Inkrafttreten der EnEV 2014 und weiter auf 1,8 zum 1. Januar 2016 verringert sich der Primärenergiebedarf für den Hilfsstrom des Referenzgebäudes. In einer Musterrechnung des BWP ergibt sich allein dadurch im Zuge der EnEV 2014 eine Verringerung des Jahresprimärenergiebedarfs um 4 % im Vergleich zur EnEV 2009.

Der Primärenergiefaktor kennzeichnet das Verhältnis von insgesamt aufgewendeter Primärenergie zur Endenergie beim Nutzer. Bei der Ermittlung des Primärenergiefaktors für den Strommix wird beispielsweise die gesamte Umwandlungskette – von der Gewinnung

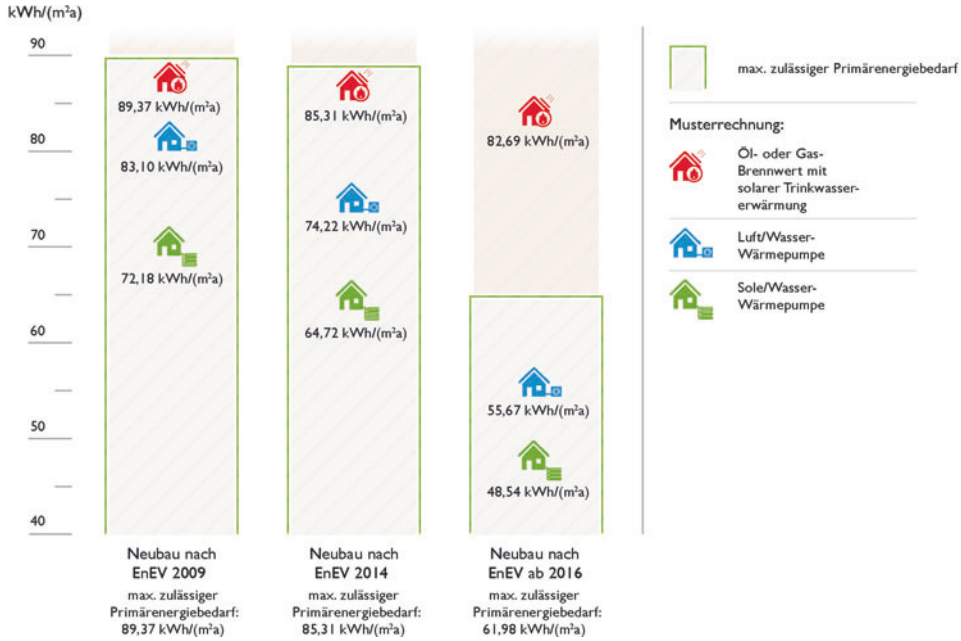


Abb. 12.2 Vorgaben für den Energiebedarf von Neubauten. (© BWP e. V.)

des nicht erneuerbaren Energieträgers, über dessen Transport, die Verstromung im Kraftwerk sowie die Transportverluste – berücksichtigt.

Durch die wiederholte Anpassung des Primärenergiefaktors soll dem wachsenden Anteil von Strom aus regenerativen Quellen Rechnung getragen werden. Die DIN V 18599 berücksichtigt deshalb seit ihrer Änderung im Mai 2013 schon einen Primärenergiefaktor von 2,0. Dieser Wert korreliert gut mit dem tatsächlichen Anteil erneuerbar erzeugten Stroms im bundesdeutschen Strommix des Jahres 2014. Die EnEV operierte hingegen noch bis Anfang 2016 aus politischen Gründen mit dem Faktor 2,4. Der seit 1. Januar 2016 anzusetzende Primärenergiefaktor von 1,8 spiegelt den prognostizierten Anteil erneuerbaren Stroms wider und ist auch in der aktuellen Fassung der DIN V 18599 von Oktober 2016 enthalten. Unberücksichtigt bleibt nach wie vor, dass der Anteil regenerativen Stroms während der Lebensdauer der elektrischen Geräte noch deutlich steigen wird.

12.2.3 Energieeffizienz von Wärmepumpen

Vergleicht man Technologien, die unterschiedliche Heizenergieträger nutzen, primärenergetisch, sind zwei Größen von zentraler Bedeutung:

- der Primärenergiefaktor, der angibt, wie viele Kilowattstunden im Vorfeld notwendig sind, damit eine Kilowattstunde des jeweiligen Energieträgers ins Gebäude kommt.

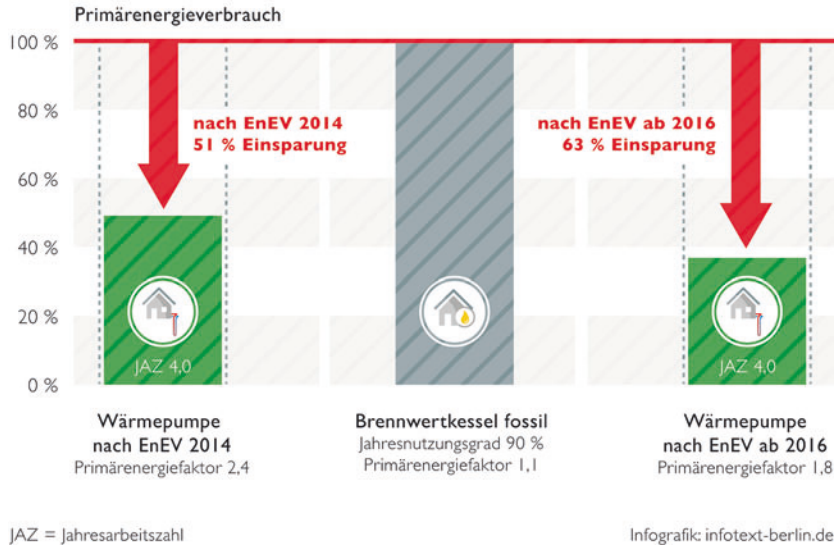


Abb. 12.3 Primärenergieverbrauch von Wärmepumpen nach EnEV 2014 und EnEV ab 2106. (© BWP e. V.)

- der Jahresnutzungsgrad, also das Verhältnis aus der nutzbar gemachten Energie und der zugeführten Energie innerhalb eines Jahres. Bei Wärmepumpen spricht man hier von der Jahresarbeitszahl (JAZ).

Im Gegensatz zu Wärmepumpen, die überwiegend erneuerbare Umweltwärme nutzen, können die Nutzungsgrade bei fossilen Technologien aus rein physikalischen Gründen nicht größer sein als 100 %. Die wenigsten Systeme erreichen in der Praxis mehr als 90 % Wolff et al. (2004). Die Nutzungsgrade von Sole-Wasser-Wärmepumpen liegen dagegen laut Feldtest des Fraunhofer ISE zwischen 300 und 540 % (JAZ 3,0–5,4). Der primärenergetische Aufwand ergibt sich aus dem Quotienten von Primärenergiefaktor und Jahresnutzungsgrad: Damit benötigt eine Wärmepumpe mit einer JAZ von 4,0 nur etwa halb so viel Primärenergie wie ein fossiler Kessel mit einem Jahresnutzungsgrad von 90 %. Seit Januar 2016, mit einem Primärenergiefaktor für Strom von 1,8, sind es sogar 63 % weniger (Abb. 12.3).

12.2.3.1 Leistungszahl

Die Leistungszahl oder der *coefficient of performance* (COP) ist eine leistungsbezogene Größe, die im Labor als Quotient aus der Heizwärmeleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme unter definierten Randbedingungen gemessen werden kann. Mit ihr kann also die Güte der Wärmepumpe selbst ausgedrückt werden, das angeschlossene Heizungssystem wird nicht betrachtet. Die Messung findet bei definierten Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke statt. Die Leistungszahlen werden also an bestimmten

Normprüfpunkten nach DIN EN 14511 bestimmt. Diese sind für Sole-Wasser- Wärmepumpen B0/W35 und für Wasser-Wasser-Wärmepumpen W10/W35. Hierbei steht jeweils die erste Angabe für die Temperatur aus der Wärmequelle am Eintritt in die Wärmepumpe, die zweite für die Temperatur des Heizungsvorlaufs, also der Wärmesenke. B steht also für Sole (*brine*) und W für Wasser (*water*). Die jeweiligen Leistungszahlen nach DIN EN 14511 gehen direkt in die Berechnung der Jahresarbeitszahlen nach VDI 4650 Blatt 1 ein.

12.2.3.2 Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl wird allgemein als der Quotient aus der über ein ganzes Jahr abgegebenen Wärme und der aufgenommenen elektrischen Energie des Wärmepumpenheizungssystems definiert. Sie ist also ein Maß für die Effizienz einer Wärmepumpenheizungsanlage und nicht zu verwechseln mit den Leistungszahlen von Wärmepumpen, die in den Produktunterlagen der Geräte angegeben werden. Diese bilden allerdings die Grundlage der Berechnung von Jahresarbeitszahlen, etwa nach der VDI-Richtlinie 4650 Blatt 1. Die erste Ausgabe der VDI 4650 stammt aus dem Jahr 2003. Die letzte Ausgabe von 2009 wurde kürzlich überarbeitet, um dem technischen Fortschritt Rechnung zu tragen. Die Neuausgabe ist im Dezember 2016 erschienen und enthält keine grundlegend neue Berechnungsmethodik, das Verfahren ist nach wie vor einfach zu handhaben und liefert ausreichend genaue Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpenanlagen. Die Methodik der VDI zur Berechnung der Jahresarbeitszahlen beruht auf einem Temperaturklassen-Verfahren, wie es auch in den Normen DIN EN 14825 und DIN EN 15316-4-2 beschrieben ist. Um den Rechenaufwand überschaubar zu halten, wurden verschiedene Vereinfachungen getroffen. Die Richtlinie strebt eine Genauigkeit der Jahresarbeitszahlen von ca. $\pm 10\,\%$ an. Das Verfahren selbst ist in der Anwendung relativ simpel und kann mithilfe von Tabellenwerten und einem Taschenrechner leicht durchgeführt werden.

Wird von Arbeitszahlen gesprochen, muss jedoch nicht zwangsläufig die Jahresarbeitszahl nach VDI 4650 gemeint sein. Auch andere Normen wie die DIN EN 15316-4-2 oder die DIN EN 14825 beschreiben Verfahren zur Ermittlung von Arbeitszahlen – allerdings mit etwas unterschiedlichen Methoden, Randbedingungen und Bezugszeiträumen. So bildet der *seasonal coefficient of performance* (SCOP) nach DIN EN 14825 die Grundlage für die Berechnung der *jahreszeitbedingten Raumheizungsenergieeffizienz* η_s von Wärmepumpen. Abhängig von diesem η_s-Wert erfolgt die Bewertung für das seit 26.09.2015 verpflichtende EU-Energielabel für Raumheizgeräte. Der Wert ist also ausschlaggebend dafür, ob eine Wärmepumpe mit A+, A++ oder in Verbundanlagen auch mit A+++ eingestuft wird (Abb. 12.4). Im Gegensatz zur VDI 4650 ist der SCOP der EN 14825 nicht auf ein ganzes Jahr, sondern auf eine Heizperiode bezogen.

12.2.3.3 Einflüsse auf die Effizienz von Wärmepumpen

Neben der Leistungszahl einer Wärmepumpe, als Maß der Qualität und Effizienz der Wärmepumpe selbst, beeinflussen im Wesentlichen zwei Faktoren die Effizienz des Gesamtsystems, nämlich zum einen die Temperatur der Wärmequelle und zum anderen die zu erreichende Temperatur der Wärmesenke. Je geringer die Differenz zwischen der

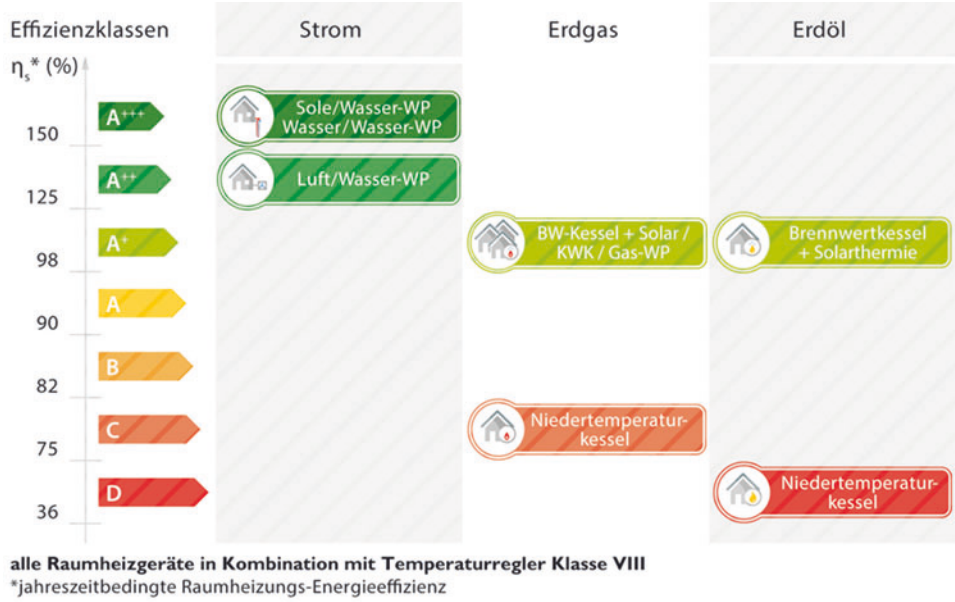


Abb. 12.4 Effizienzklassen der Raumheizsysteme für das Verbundanlagenlabel. (© BWP e. V.)

Temperatur der Wärmequelle und der Wärmesenke ist, desto günstiger sind die Auswirkungen auf die Effizienz des Gesamtsystems. Eine hohe Effizienz lässt sich demnach mit hohen Quellentemperaturen und niedrigen Temperaturen der Wärmesenke erzielen. Dies ist bei der Nutzung von Erdwärmesonden oder Grundwasser als Wärmequelle in Kombination mit einem Flächenheizungssystem grundsätzlich gegeben. Eine fachgerecht geplante und installierte Flächenheizung, z. B. eine Fußbodenheizung, gewährleistet eine niedrige Vorlauftemperatur und damit den effizienten Betrieb der Anlage. Allerdings reichen ausreichend dimensionierte Heizkörper oft ebenfalls aus, um das Verteilsystem mit einer für eine gute Effizienz hinreichend niedrigen Vorlauftemperatur zu betreiben. Möglicherweise ist es sinnvoll, lediglich einzelne Radiatoren gegen Heizkörper mit größerer Oberfläche zu tauschen, um die Vorlauftemperatur deutlich senken zu können. Auch einzelne Sanierungsmaßnahmen, wie etwa die nachträgliche Dämmung der Kellerdecke oder des Daches, ermöglichen eine Absenkung der Vorlauftemperatur. Voraussetzung für den effizienten und nachhaltigen Betrieb der Anlage ist immer eine fundierte Ermittlung der Heizlast des Gebäudes (Heizlastberechnung nach DIN EN 12831) und eine fachgerechte Auslegung der Wärmequelle.

In der Regel werden Wärmepumpenanlagen neben der Bereitstellung von Wärme für den Heizbetrieb auch für die Trinkwassererwärmung eingesetzt. Da die zu erreichende Temperatur dafür in der Regel höher ist als die erforderliche Vorlauftemperatur eines Flächenheizsystems, sinkt die Gesamteffizienz der Anlage mit steigendem Anteil der Trinkwassererwärmung an der erforderlichen Gesamtenergie. Insbesondere bei Gebäuden mit einem besonders niedrigen Heizenergiebedarf ist der Energiebedarf für die Trinkwarmwasser bei der Auslegung der Wärmequelle hinreichend zu berücksichtigen.

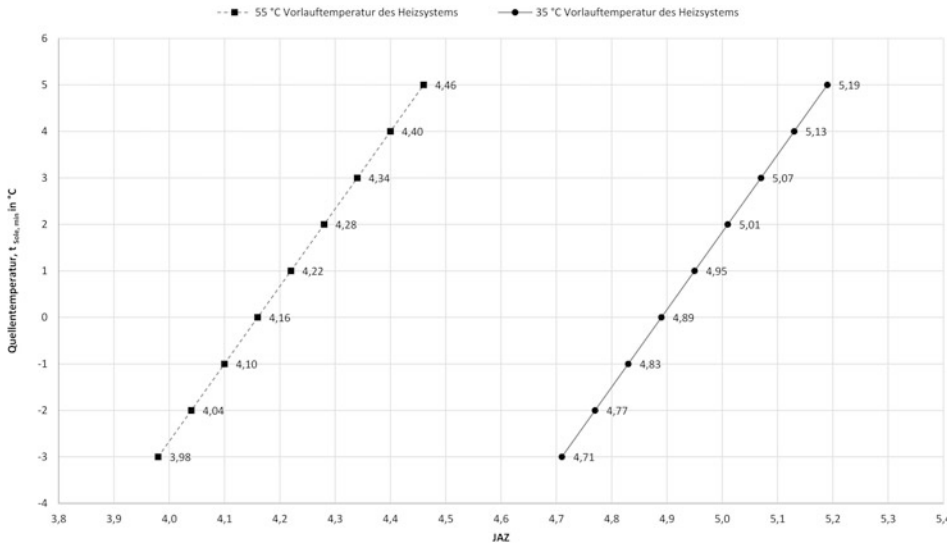


Abb. 12.5 Änderung der berechneten JAZ (nach VDI 4650) einer Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmequelle (Sole, Erdwärmesonde). (© BWP e. V., berechnet nach VDI 4650)

Zur Veranschaulichung wurde in Abb. 12.5 die Änderung der nach VDI 4650 berechneten Jahresarbeitszahl einer erdgekoppelten Wärmepumpe mit einer Erdwärmesonde als Wärmequelle in Abhängigkeit von der Quellentemperatur aufgetragen. Die berechneten Werte stammen von einer monovalent betriebenen Wärmepumpe. Es handelt sich um ein handelsübliches Modell mit einem COP von 4,7, das im Neubaubereich eingesetzt wird. Der Anteil der Trinkwassererwärmung am gesamten Wärmebedarf beträgt 18 % und die Leistung der Pumpe zur Umwälzung der Sole in der Erdwärmesonde beträgt 100 W. Der Kurvenverlauf wird für zwei unterschiedliche Vorlauftemperaturen dargestellt, und zwar für 35 °C (Rücklauftemperatur 28 °C) und für 55 °C (Rücklauftemperatur 48 °C). Eine entsprechende Darstellung für ein offenes System findet sich in Abb. 12.6. Die berechneten Jahresarbeitszahlen ergeben sich unter den dargestellten Randbedingungen für eine handelsübliche Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit einem COP von 6,1. Die Quellenpumpe wurde mit einer Leistung von 100 W berücksichtigt. Der Anteil für die Erwärmung des Trinkwassers am gesamten Wärmebedarf beträgt genau wie bei der Sole-Wasser-Wärmepumpe 18 %.

12.2.4 Kühlen mit Wärmepumpen

In modernen gut gedämmten Wohngebäuden ist auf den sommerlichen Wärmeschutz ein besonderes Augenmerk zu richten. Es kann leicht passieren, dass Wohnungen wegen

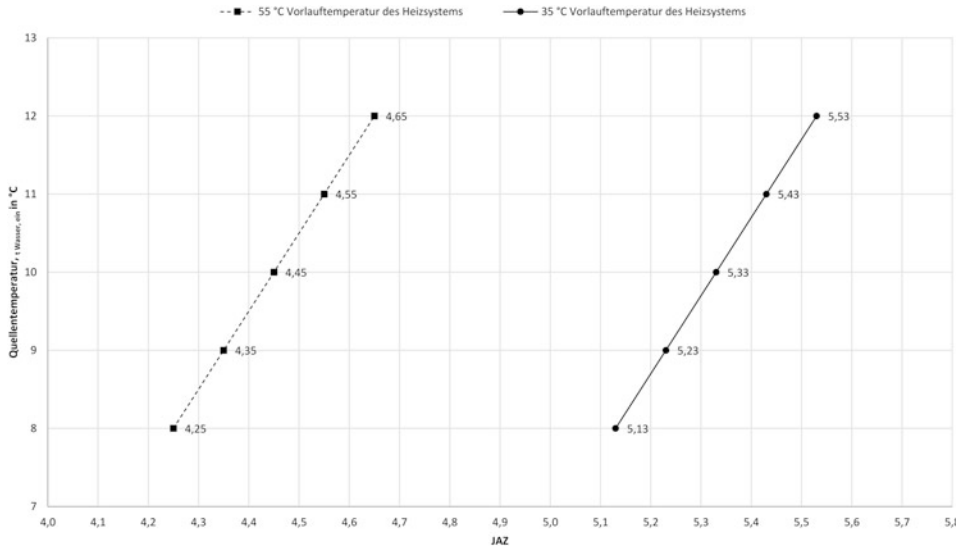


Abb. 12.6 Änderung der berechneten JAZ (nach VDI 4650) einer Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmequelle (Wasser, Brunnenanlage). (© BWP e. V., berechnet nach VDI 4650)

mangelnder Verschattung überhitzen. Dazu kommt das gestiegene Komfortbedürfnis der Menschen, die heutzutage in vielen Bereichen eine Kühlung gewohnt sind und auf diese gerade in den eigenen vier Wänden nicht verzichten wollen. Eine besonders effiziente Art der Kühlung ist die passive Kühlung mit einer erdgekoppelten Wärmepumpenanlage.

12.2.4.1 Behaglichkeit

Ob sich Menschen in ihrer Umgebung wohlfühlen, hängt von etlichen Einflussfaktoren ab. Über Heizung und Klimatisierung kann natürlich lediglich die thermische Behaglichkeit beeinflusst werden. Hier machen sich vor allem folgende Größen bemerkbar: Raumlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad, die Oberflächentemperaturen der umgebenden Wände sowie Aktivitätsgrad und Bekleidung der Personen.

Für behagliche Temperaturen im Sommer wird die Raumluft gekühlt und ggf. auch entfeuchtet. Hierbei sollten Temperaturunterschiede zwischen Außen- und Raumlufttemperatur von mehr als 5 K möglichst vermieden werden. Im Falle der Kühlung mittels Wärmepumpen erfolgt die Kühlung meist über Flächenkühlsysteme: Fußboden- oder Wandheizung, Kühldecken und Betonkerntemperierung. Eine Entfeuchtung ist nur bei der Verwendung von Ventilatorkonvektoren möglich. Bei den Flächenkühlsystemen muss über eine Taupunktregelung verhindert werden, dass die Taupunkttemperatur auf den Oberflächen unterschritten wird.

12.2.4.2 Kühllast

Mit Kühllast wird der Wärmestrom bezeichnet, der aus einem Raum oder einem Gebäude abgeführt werden muss, um den gewünschten Zustand der Raumlufttemperatur zu erhalten. Die Haupteinflussfaktoren auf die Kühllast sind:

- Sonneneinstrahlung und Transmission (äußere Faktoren),
- Wärmeabgabe von Personen, Geräten und Beleuchtung (innere Faktoren),
- Gegebenenfalls auch Stoffströme, z. B. Außenluftanteile bei Fugenlüftung oder Lüftungsanlagen.

Die Berechnung der Kühllast sollte möglichst genau ausgeführt werden. Hierzu bietet sich das Verfahren nach VDI 2078 an. Überschlägige Verfahren sollten allenfalls für erste grobe Abschätzungen verwendet werden.

12.2.4.3 Passive Kühlung

Hatten Heizungsanlagen in Gebäuden ursprünglich ausschließlich den Zweck, die Räume mit Heizwärme zu versorgen, gibt es nun mit der Wärmepumpe auch die Möglichkeit, die Räume zu kühlen. Behagliche Temperaturen können auf diese Weise also nicht nur an kalten, sondern auch an heißen Tagen erreicht werden. Die erdgekoppelte Wärmepumpe kann abhängig vom Bedarf Umweltwärme aus Erde oder Grundwasser ins Gebäude bringen oder die überschüssige Raumwärme abführen.

Grundsätzlich müssen zwei unterschiedliche Methoden der Kühlung mit Wärmepumpen unterschieden werden: die aktive Kühlung, bei welcher der Verdichter der Wärmepumpe in Betrieb ist und die passive Kühlung, bei der direkt die Wärmequelle genutzt wird. Bei der passiven Kühlung können daher nur Wärmequellen mit einer relativ niedrigen Temperatur – also Erde und Grundwasser – genutzt werden. Im Fall der aktiven Kühlung ist es erforderlich, dass der Kältekreis der Wärmepumpe umkehrbar ist, möglich ist dies bei sämtlichen Wärmequellen.

Das Erdreich, das den SoleWasser-Wärmepumpen als Wärmequelle dient, hat in Tiefen von mehr als 8 m ganzjährig eine Temperatur von etwa 9–10 °C. Damit ist es nicht nur während der Heizsaison eine hervorragende Wärmequelle, sondern auch im Sommer eine ausgezeichnete „Kältequelle“. Ähnlich verhält es sich mit dem Grundwasser, dessen Temperatur im Sommer ebenfalls deutlich unter den gewünschten Raumtemperaturen liegt. Mit diesen Wärmequellenanlagen kann im Sommer auf einfache Art direkt für die Kühlung der Gebäude gesorgt werden. Notwendig ist dafür ein zusätzlicher Plattenwärmeübertrager. Mittels diesem wird die Wärme, die den Räumen über die Heizbeziehungsweise Kühlflächen entzogen wurde, auf den Quellenkreislauf übertragen. Die Wärme wird anschließend über die Erdwärmesonde oder den Schluckbrunnen an Erdreich bzw. Grundwasser abgegeben. Mit Soletemperaturen von 15 °C können Kaltwassertemperaturen von etwa 17 °C erreicht werden. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen bei der Kühlung sind größere Massenströme notwendig als bei der Heizung. Da der Verdichter der Wärmepumpe nicht in Betrieb ist, wird von passiver Kühlung oder *natural*

cooling gesprochen. Notwendig ist neben dem zusätzlichen Plattenwärmeübertrager noch ein soleseitiges Umschaltventil.

Bei SoleWasser-Wärmepumpen mit Erdsonden ist die passive Kühlung meist ausreichend. Andernfalls besteht die Möglichkeit der energieintensiveren aktiven Kühlung, möglicherweise genügt aber auch eine „Ankühlung", also eine Kühlung, die in einigen Fällen etwas weniger als die erforderliche Kühlleistung zur Verfügung stellt.

12.2.4.4 Kühlflächen

Bei der Kühlung über die Wand- oder die Fußbodenfläche muss unbedingt die Unterschreitung des Taupunkts der Raumluft vermieden werden, da sonst Wasserdampf auf der Kühlfläche kondensieren kann. Zur Vermeidung der Kondensatbildung werden üblicherweise ein Raumtemperatur- und ein Feuchtefühler eingesetzt, die an den Wärmepumpenregler angeschlossen sind. Der Regler kann damit die minimal zulässige Kaltwassertemperatur berechnen. Eine Entfeuchtung der Raumluft findet hier nicht statt. Da die relative Luftfeuchte bei sinkender Temperatur steigt, kann sich dies negativ auf die Behaglichkeit auswirken. Unter bestimmten Bedingungen kann die Kühlleistung durch die Gefahr der Taupunktunterschreitung begrenzt sein.

Bei Verwendung der Fußbodenheizung als Kühlsystem kann eine Kühlleistung von etwa 25 W/m^2 übertragen werden, dies entspricht unter Umständen nur der Hälfte oder einem Viertel der benötigten Kühllast. Aufgrund der relativ hohen Oberflächentemperaturen ist nicht mit kalten Füßen zu rechnen. Bei der Kühlung über Wandflächen kann eine etwas höhere Kälteleistung übertragen werden, da sowohl die Wärmeübertagung durch Strahlung als auch die durch Konvektion höher ist.

12.2.4.5 Kosten

Verglichen mit der traditionellen Kühlung über Split-Klimageräte, Kaltwassersätze oder VRF-Systeme ist die Kühlung über Wärmepumpen relativ preiswert. Bei passiver Kühlung eines Bürogebäudes können bis zu 80 % der Kühlkosten gespart werden, bei aktiver Kühlung immerhin ca. 20 %. Ob die Effizienz des Heizbetriebes durch die bessere Regenerierung der Wärmequelle durch den Kühlbetrieb tatsächlich deutlich gesteigert werden kann, ist strittig.

12.2.4.6 Planung und Auslegung

Normativ gibt es derzeit wenige Grundlagen für wassergeführte Kälteanlagen, das Thema steht aber beim zuständigen Normenausschuss auf der Agenda. Beachtet werden sollten folgende Punkte:

- Bei der Kühlung ist eine möglichst genaue Kühllastberechnung z. B. nach VDI 2078 durchzuführen.
- Auslegung der Kälteerzeuger kann für unterschiedliche Zwecke erfolgen: Kühlung oder nur Ankühlung.
- Gegebenenfalls Entscheidung ob aktive Kühlung, passive Kühlung oder beides.

- Bei gemeinsamer Nutzung zur Heizung und Kühlung ist besonderes Augenmerk auf die bei der Kühlung größeren erforderlichen Volumenströme gegenüber Heizungsanlagen zu richten.
- Verwendung kühlgeeigneter Komponenten (Pumpen, Ventile),
- Auslegung der Heizflächen für Kühlung oder Ankühlung,
- Berücksichtigung der gemeinsamen Verwendung für Heizung und Kühlung,
- Kondensatvermeidung bzw. Kondensatabfuhr,
- gegebenenfalls Taupunktregelung,
- umgekehrte Regelung im Kühlfall gegenüber dem Heizfall,
- Wärmedämmung: besondere Anforderungen an Kälteleitungen (Diffusionsdichtigkeit).

Literatur

DIN EN 12831:Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast; Deutsche Fassung EN 12831:2003

DIN EN 14511-1:2013-12: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung – Teil 1: Begriffe und Klassifizierung; Deutsche Fassung EN 14511-1:2013

DIN EN 14825:2013-12: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung – Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl; Deutsche Fassung EN 14825:2013

DIN EN 15316-4-2:2008-09: Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen – Teil 4-2: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Wärmepumpensysteme

DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung

VDI 2078: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)

VDI 2078:2015-06: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)

VDI 4650 Blatt 1:2009-03: Berechnungen von Wärmepumpen – Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen – Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung

Wolff et al: Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln, FH Braunschweig Wolfenbüttel, FB Versorgungstechnik, IfHK (2004)

Geothermische Phasenwechselsonden als Wärmeentzugssystem

13

Thomas Storch, Thomas Grab und Ulrich Groß

Inhaltsverzeichnis

13.1 Einleitung 410
13.2 Funktionsweise einer geothermischen Phasenwechselsonde 411
13.2.1 Aufbau und Funktionsweise von Heat Pipes und Thermosiphons 411
13.2.2 Aufbau und Funktionsweise einer Phasenwechselsonde 413
13.2.3 Vor- und Nachteile im Vergleich zu Flüssigkeitszirkulationssonden 414
13.3 Anwendungsbereiche von Thermosiphons bzw. Fallfilmverdampfern 415
13.3.1 Geschichtliche Entwicklung von Thermosiphons in der Oberflächennahen Geothermie 416
13.3.2 Anwendungsbeispiele von Thermosiphons und Fallfilmverdampfern 417
13.4 Auslegungsgrundlagen und physikalische Grundlagen 420
13.4.1 Arbeitsstoffe 420
13.4.2 Leistungsgrenzen und Arbeitsbereich 421
13.4.3 Anfahrverhalten und zyklischer Wärmeentzug 427
13.4.4 Temperaturverteilung entlang der Sonde 430
13.4.5 Füllmenge und statische Dampfdrucksäule 432
13.4.6 Sondeninterne Regeneration 435
13.4.7 Energetische Betrachtung 438
13.4.8 Simulationen zum Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom 441
13.5 Schlussbemerkung und Ausblick 444
Literatur 445

Thomas Storch (✉) · Thomas Grab · Ulrich Groß
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Lehrstuhl Technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 7, 09599 Freiberg, Deutschland
e-mail: thomas.storch@ttd.tu-freiberg.de; thomas.grab@ttd.tu-freiberg.de; gross@iwtt.tu-freiberg.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_13

Zusammenfassung

Für die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie als erneuerbare Energiequelle zur Bereitstellung von Heizwärme im Gebäudebereich existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Wärmeentzugssystemen. Bei allen Systemen sind die thermophysikalischen als auch die materialspezifischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Dichte etc.) u. a. des Erdreiches, des Bohrlochs, des Zementes und der Geothermiesonde oder des Kollektors wichtige Einflussgrößen und müssen in der Planung und Auslegung entsprechend berücksichtigt werden. Ein innovatives und zugleich sehr effizientes Prinzip für den Wärmeentzug aus dem Erdreich stellt eine Anwendung der Fallfilmverdampfung in einem geothermischen Thermosiphon (auch Phasenwechselsonde genannt) in Kombination mit einer Wärmepumpe dar. Erste Anwendungen von Thermosiphons in oberflächennahen Erdschichten datieren aus der Zeit um 1960, z. B. in Alaska, wobei es sich vorwiegend um die Untergrundstabilisierung in Regionen mit Permafrostböden handelte. Das wohl bekannteste Projekt ist die 1977 fertiggestellte Trans-Alaska-Pipeline, welche auf ca. 730 km mit über 122.000 Thermosiphons stabilisiert wird. Seit 1997 wird dieses einfache Prinzip auch in Kombination mit Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Gebäuden genutzt. In diesem Beitrag werden hierzu die Funktionsweise und die Betriebsbedingungen von geothermischen Phasenwechselsonden mit den Vor- und Nachteilen gegenüber Flüssigkeitszirkulationssonden auf dem neuesten Stand der Forschung sowohl für Anwender als auch für Wissenschaftler umfangreich dargelegt. Dabei werden die ablaufenden Prozesse für verschiedene Betriebsphasen (Start, zyklischer oder dauerhafter Wärmeentzug, Regeneration) u. a. hinsichtlich der Filmausbreitung, der Poolaktivität und einer energetischen Bewertung beschrieben. Abschließend werden kurz zukünftige Forschungsfelder geothermischer Phasenwechselsonden umrissen sowie relevante Perspektiven und Herausforderungen diskutiert.

Schlüsselwörter

Wärmeentzug · Thermosiphon · Wärmerohr · HeatPipe · Fallfilmverdampfer · Phasenwechselsonde: Vor- und Nachteile · Grenzen · Auslegungsgrundlagen · Simulation

13.1 Einleitung

Seit einigen Jahren steht die effiziente Gewinnung erneuerbarer Energien und speziell auch der Oberflächennahen Geothermie zur Nutzung der speicherbaren bzw. gespeicherten Wärme des oberen Erdreiches im Fokus von Gesellschaft und Politik. Die gespeicherte Wärme kann mittels verschiedener Wärmeentzugssysteme aus dem Erdreich gewonnen und so als Wärmequelle für Wärmepumpenanwendungen verwendet werden. Mit diesen

wird schließlich die Wärme von niedrigem auf ein höheres nutzbares Temperaturniveau zur Wärmebereitstellung, z. B. zum Beheizen von Gebäuden, angehoben (Kaltschmitt et al. 2006).

Als ein spezielles geothermisches Wärmeentzugssystem findet das effiziente Prinzip eines Thermosiphons (auch als Wärmerohr bezeichnet) Anwendung als geothermische Phasenwechselsonde. Neben dem langjährigen Einsatz von Thermosiphons zur Stabilisierung von Pipelines auf Permafrostböden werden diese nun seit ca. 1997 auch in Kombination mit Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Wohn- und Industriegebäuden genutzt. Das Funktionsprinzip basiert auf einem im Inneren eines geschlossenen Rohres (Phasenwechselsonde) selbsttätig zirkulierenden Wärmeträgermediums (reines Kältemittel). Dieses kondensiert bei Wärmeentzug am Sondenkopf in einem Wärmeübertrager und gibt dabei Wärme an den Wärmepumpenkreislauf ab. Der Kondensatfilm rieselt anschließend schwerkraftgetrieben im Inneren des Rohres herab und verdampft durch Wärmeaufnahme aus dem Erdreich wieder. Die Zirkulation benötigt folglich keinerlei zusätzliche Pumpen bzw. Antriebsenergie. Aufgrund dieses Wirkprinzips kann im Vergleich zu standardmäßigen Flüssigkeitszirkulationssonden Wärme effektiver entzogen werden, was sich theoretisch in einer um bis zu 15–25 % höheren Arbeitszahl widerspiegelt (Verhältnis der dem Nutzer zur Verfügung gestellten Wärmemenge zur eingesetzten Endenergie), siehe u. a. Peterlunger et al. (2004), Grüniger und Wellig (2009) und Kruse et al. (2008).

In diesem Beitrag werden die prinzipielle Funktionsweise und die ablaufenden Prozesse im Inneren einer Phasenwechselsonde, ausgehend von den Arbeiten von Grab (2015) und Storch (2015), ausführlich hinsichtlich physikalischer Grundlagen (Arbeitsbereich und spezifischen Betriebsgrenzen, maximale Wärmemenge, zyklischer Wärmeentzug, Einfluss von Füllmenge, Benetzungsgrad und Regenerationszeit) erläutert.

13.2 Funktionsweise einer geothermischen Phasenwechselsonde

13.2.1 Aufbau und Funktionsweise von Heat Pipes und Thermosiphons

Der Wärmetransport von einer Wärmequelle zu einer Wärmesenke ohne elektrisch betriebene Pumpen ist für viele technische Anwendungen wie z. B. Geothermie, Solarthermie, Abwärmenutzung oder allgemeine Kühlungsaufgaben interessant. Als Technologien zum Transport von Wärme entgegen der Schwerkraft (nach oben) ist der Einsatz von Thermosiphons (auch Wärmerohr), von Heat Pipes (durch Kapillarkräfte, mit oder ohne Schwerkraft) und als Sonderbauform als Reverse Thermosiphons bekannt. Dobriansky (2011) und Khandekar (2004) geben eine Übersicht zu den verschiedenen Bauformen an. Nachfolgend werden der Aufbau und die Funktionsweise der beiden wichtigsten Technologien (Thermosiphon und Heat Pipe) kurz erläutert.

13.2.1.1 Thermosiphon

Ein Thermosiphon (siehe Abb. 13.1) oder auch Wärmerohr ist ein abgeschlossenes, evakuiertes System als Rohr- (Thermosiphon) oder Kreislaufausführung (*loop thermosiphon*), welches mit einem Kältemittel (Arbeitsmittel) gefüllt ist. Das Arbeitsmittel kann in den verschiedenen Aggregatzuständen:

- flüssig (1-Phasen-Thermosiphon) oder
- flüssig und gasförmig (2-Phasen-Thermosiphon)

vorliegen. Ein Thermosiphon lässt sich dabei von unten nach oben in eine Heizzone (Wärmequelle), eine adiabate Transportzone und eine Kühlzone (Wärmesenke) einteilen. Durch Verdampfung an der Wärmequelle sinkt die Dichte des Arbeitsmittels, wodurch der entstandene Dampf zur Wärmesenke aufsteigt und dort durch Kondensation Wärme abgibt. Die dabei gebildete Flüssigkeit hat eine deutlich höhere Dichte und kehrt schwerkraftgetrieben wieder zur Wärmequelle zurück. Der Wärmetransport durch das Arbeitsmittel basiert dabei für alle Thermosipons auf natürlicher Konvektion (Faghri 1995, Khandekar 2004). Die Wärmequelle befindet sich daher stets räumlich unterhalb der Wärmesenke, sodass der gravitationsgetriebene Rücktransport des flüssigen Arbeitsmittels von der Wärmesenke zur Wärmequelle gewährleistet ist. Dieser einfache Aufbau ermöglicht dem Thermosiphon auch den Einsatz in der Oberflächennahen Geothermie, siehe Abschn. 13.2.2.

13.2.1.2 Heat Pipes

Eine Heat Pipe (siehe Abb. 13.1) ist ebenfalls ein abgeschlossenes, evakuiertes, meist zylinderförmiges System, welches anteilig mit einem Kälte-/Arbeitsmittel befüllt ist. Das

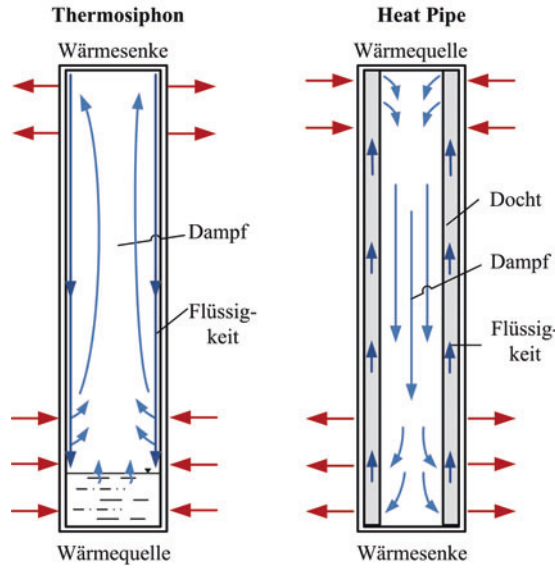


Abb. 13.1 Schematischer Aufbau eines Thermosiphons mit teilweiser Filmverdampfung sowie einer Heat Pipe. (Nach Grab 2015)

Kältemittel liegt somit immer in den beiden Aggregatzuständen flüssig und gasförmig vor. Als Hauptunterscheidungsmerkmal zum Thermosiphon besitzen Heat Pipes einen Docht, durch welchen mittels Kapillarkräften (ggf. durch Schwerkraft, Zentrifugal-, elektrostatische oder osmotische Kräfte beeinflusst) der Rücktransport des flüssigen Arbeitsmittels von der Wärmesenke (Kondensator) zur Wärmequelle (Verdampfer) geschieht (Fahgri 1995).

Die Effizienz einer Heat Pipe nimmt allerdings beim prinzipiell möglichen Kondensatrücktransport entgegen der Schwerkraft drastisch ab (Hamilton 1979). Aufgrund des aufwändigeren Aufbaus und der höheren Herstellungskosten gegenüber Thermosiphons ist ein Einsatz von Heat Pipes auf kleinere Baulängen beschränkt (z. B. elektronische Bauteilkühlung), vgl. Groll (1995).

13.2.2 Aufbau und Funktionsweise einer Phasenwechselsonde

Die Funktionsweise einer Phasenwechselsonde (PWS) basiert auf dem Thermosiphonprinzip. Bei der Herstellung einer oberflächennahen Phasenwechselsonde (Abb. 13.2) wird dazu ein Rohr in ein Bohrloch eingebracht. Dies kann z. B. ein aufgewickeltes Rohr (*coil*) oder ein aus mehreren Segmenten verschweißtes Rohr sein. Dafür kommen neben beschichteten Stahl- und Edelstahlrohren auch PE-ummantelte Kupferrohre oder in Einzelfällen Kunststoffrohre zum Einsatz. Das installierte Rohr wird durch eine Zementierung fest mit dem umgebenden Erdreich verbunden. Am oberen Ende des Rohres wird ein Wärmeübertrager (Platten- oder Rohrwendelwärmeübertrager) installiert, welcher bei Gebäudeheizzwecken in der Regel Bestandteil einer Wärmepumpe ist.

Der Rohrinnenraum wird evakuiert und mit dem Arbeitsmittel (siehe Abschn. 13.4.1) befüllt. Das flüssige Kältemittel sammelt sich im Sumpf, und im restlichen Rohrraum bildet sich eine gesättigte Dampfsäule aus. Wird am oberen Ende Wärme durch den

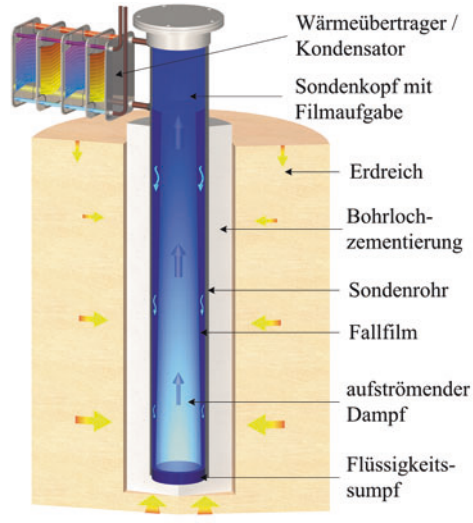


Abb. 13.2 Schematischer Aufbau einer geothermischen Phasenwechselsonde. (Aus Grab 2015)

Wärmeübertrager (Kondensator) entzogen, kondensiert der anstehende Kältemitteldampf unter Abgabe der Kondensationsenthalpie. Das kalte Kondensat wird anschließend auf die Sondeninnenseite aufgegeben und rieselt gravitationsgetrieben nach unten ab. Da die Temperatur des Kondensates unterhalb der Erdreichtemperatur liegt, kommt es zu einem radialen Wärmestrom in Richtung Erdwärmesonde. Unter Aufnahme dieser Wärme verdampft der abrieselnde Flüssigkeitslm kontinuierlich auf seiner gesamten Lauflänge. Der Kältemitteldampf steigt aufgrund von Dichte- und Druckunterschieden zum Sondenkopf auf und kondensiert erneut im Wärmeübertrager. Dieser selbstständige Prozess benötigt keine Fremdenergie zur Umwälzung des Wärmeträgermediums (Grab 2015).

Der Naturumlauf erfolgt auch bei ausgeschalteter Wärmepumpe, da aufgrund des geothermischen Gradienten in der Regel eine Temperaturdifferenz zwischen tieferen und weniger tiefen Erdschichten herrscht. In dieser Tatsache besteht ein weiterer Vorteil von geothermischen Phasenwechselsonden gegenüber herkömmlichen Zirkulationssystemen, denn aufgrund der Eigenzirkulation wird die Regeneration des Erdreiches während Entzugspausen unterstützt, siehe Abschn. 13.4.7.

Die Funktionsweise einer Direktverdampfersonde entspricht der einer Phasenwechselsonde, jedoch wird bei jener der Kältemitteldampf am Sondenkopf direkt in einen Verdichter geleitet und komprimiert. Dem in der Wärmepumpe verdichteten Dampf wird, analog zum geschlossenen Wärmepumpenkreislauf, Wärme entzogen, das dadurch entstandene Kondensat wird entspannt und direkt wieder in die Geothermiesonde eingeleitet, vgl. VDI 4640 Blatt 1. Im Vergleich zur Phasenwechselsonde kann dadurch der Verdampfer des Wärmepumpenkreislaufes mit separatem Arbeitsmittel (z. B.: R134a; R404A; R407C) eingespart werden. Direktverdampfersonden versprechen eine weitere Erhöhung der Effizienz u. a. durch Wegfall der Widerstände beim Wärmeübergang (Wärmeübertrager), jedoch sind mehrere technische Bedingungen zu berücksichtigen. Damit ein problemloser Betrieb gewährleistet werden kann, werden z. B. entsprechend ausgelegte ölfreie Verdichter, welche gegenüber herkömmlichen Verdichtern derzeit deutlich teurer sind, benötigt.

13.2.3 Vor- und Nachteile im Vergleich zu Flüssigkeitszirkulationssonden

Seit einigen Jahren werden die Vor- und Nachteile von Phasenwechselsonden im Vergleich zu Flüssigkeitszirkluations- bzw. Solesonden heftig diskutiert, siehe Tab. 13.1. Ein sehr wichtiger Vorteil von Phasenwechsel- gegenüber Flüssigkeitszirkulationssonden ist, dass nach Peterlunger et al. (2004), Ochsner (2008) und Grüniger und Wellig (2009) z. B. mit CO_2 betriebene PWS theoretisch eine um bis zu 15–25 % höhere Arbeitszahl möglich ist. Dies resultiert u. a. aus einem deutlich besseren Wärmeübergang bei der Kondensation im Wärmeübertrager (Sondenkopf), wodurch die Verdampfungstemperatur für CO_2-PWS theoretisch um 5 K höher liegt als bei vergleichbaren Flüssigkeitszirkulationssonden (Grüniger und Wellig 2009). Bei dieser theoretischen Steigerung der Arbeitszahl wurden noch keinerlei Effekte infolge einer förderlichen Eigenzirkulation bei Stillstand in der Regenerationsphase (Regeneration des Erdreiches, vgl. Abschn. 13.4.6) berücksichtigt, welche einen weiteren positiven Einfluss erwarten lassen.

Tab. 13.1 Vor- und Nachteile vertikaler Phasenwechsel- und Flüssigkeitszirkulationssonden, nach Wesselak und Schabbach (2009), Rieberer (2005), Häfner et al. (2007), Grüniger und Wellig (2009), Wellig und Grüniger (2010). (Aus Storch 2015)

	Phasenwechselsonde (PWS)	Flüssigkeitszirkulationssonde (FZS)
Vorteile	• Hohe treibende Temperaturdifferenz (Fluid/Erde) über gesamte Sondenlänge • niedrige Widerstände (WÜ) bei Filmverdampfung und Kondensation (bei geringer Temperaturdifferenz) • effizienter Wärmetransport durch Dampf (hohe Energiedichte) • theor. ca. 15–25 % höhere Arbeitszahl als FZS • aktive Regeneration • CO_2, C_3H_8 nicht wassergefährdend	• Einfacher Aufbau – standardisierte Sondentypen am Markt verfügbar → geringe Herstellungskosten (Material, Arbeitszeit) • Heizen und Kühlen (Wärmeentzug und Wärmeeintrag) möglich • lange Standzeiten
Nachteile	• Aufwändigere Auslegung und komplexer Aufbau • höhere Herstellungskosten (Material, Arbeitszeit) • keine Kühlung möglich • nicht kondensierbare Gase sind zu entfernen (behindern Kondensation)	• Geringere treibende Temperaturdifferenz (Fluid/Erde) über gesamte Sondenlänge • hohe Temperaturdifferenz (WÜT) notwendig → geringerer Wärmeentzug aus der Erde • Wärmeverlust zwischen auf- und absteigendem Wärmeträgermedium → sinkende Fluidtemperatur und Arbeitszahl • Pumpe und Regelung notwendig (zusätzl. Stromverbrauch) • steigender WÜ im durchströmten Rohr durch steigenden Volumenstrom → steigender Druckverlust und Pumpenleistung • meist Nutzung eines Wasser-Frostschutz-Gemisches (Wassergefährdungsklasse 1)

WÜ Wärmeübergang; WÜT Wärmeübertrager

13.3 Anwendungsbereiche von Thermosiphons bzw. Fallfilmverdampfern

Der Wärmetransport von einer Wärmequelle zu einer Wärmesenke ohne zusätzliche Antriebsenergie, z. B. mithilfe von Thermosiphons entgegen der Schwerkraft, kann für viele technische Anwendungen adaptiert werden. In der Literatur sind hierzu umfangreiche Ergebnisse aus Forschungsarbeiten an Thermosiphons und Heat Pipes vorhanden. Mit Bezug auf Einsatzbereiche in der Oberflächennahen Geothermie als Phasenwechselsonden bis in

Tiefen von ca. 250 m sind wiederum nur spärliche und z. T. nur sehr spezielle anwendungsorientierte Forschungsbeiträge vorhanden, siehe Storch (2015) als umfassende Übersicht.

13.3.1 Geschichtliche Entwicklung von Thermosiphons in der Oberflächennahen Geothermie

Die historische Entwicklung kann auf die Patentierung eines 1-Phasen-Thermosiphons (ohne Phasenwechsel: flüssig → gasförmig) im Jahre 1836 durch J. Perkins als „Perkins Tube“ zurückgeführt werden. Circa 60 Jahre später wurde 1892 durch L. P. Perkins und W. E. Buck das gravitationsgetriebene 2-Phasen-Thermosiphon (mit Phasenwechsel: flüssig → gasförmig) patentiert, wodurch ein deutlich höherer Wärmetransport und folglich neue Anwendungsfelder möglich wurden (Cheng und Zarling 1990; Faghri 1995).

Noch lange bevor erste Anwendungen in oberflächennahen Erdschichten realisiert wurden, patentierte R. Gaugler 1944 ein „wärmeübertragendes Gerät“ mit Docht zum Kondensatrücktransport, welches heute als „Heat Pipe“ bekannt und in weitreichenden Anwendungsgebieten (u. a. Elektronikbauteilkühlung) vertreten ist (Faghri 1995).

Bei den ersten Anwendungen in oberflächennahen Erdschichten handelte es sich vorwiegend um die Stabilisierung des Untergrundes in Regionen mit Permafrostböden, wie z. B. 1960 in Alaska mit der ersten dokumentierten Untergrundstabilisierung mittels Thermosiphons für Häuser. Dabei fungiert die im Winter sehr kalte Umgebungsluft als Wärmesenke (Kondensator des Thermosiphons) und das Erdreich als Wärmequelle (Verdampfer des Thermosiphons). Hierdurch wird das Erdreich radial um das Thermosiphon tief ausgekühlt, wodurch sich ein Eiskegel ausbildet, welcher auch über die Sommerzeit nicht auftaut. Das wohl bekannteste Projekt stellt die 1977 fertiggestellte Trans-Alaska-Pipeline dar, welche auf circa 730 km mit mehr als 122.000 Thermosiphons (d_i = 37 mm; l = 9 – 23 m; Kältemittel: Ammoniak) stabilisiert wurde (Cheng und Zarling 1990). Eine Zusammenfassung von weiteren Arbeiten zur Untergrundtemperaturkontrolle zwischen 1963 und 1986 wird in Esch (2004) gegeben.

Nach der Ölkrise 1973 begann ein erstes Umdenken hin zum Einsatz energieeffizienter Systeme, wobei die erste Pilotanlage mit Brückenbeheizung zur Schnee- und Eisfreihaltung im Jahre 1976 in Wyoming/USA von Wilson et al. (1978) als ein Beispiel gelten kann. Weitere Anlagen zur Schnee- und Eisfreihaltung auf Highways, Parkplätzen und Rampen folgten (Cheng und Zarling 1990; Zorn et al. 2010; Zorn et al. 2012).

Eine Sonderform der oberflächennahen Anwendung stellt die Eiserzeugung als Kältespeicher (Kühlraum) dar, wofür ab 1982 erste Feldtests in Japan in Cheng und Zarling (1990) dokumentiert sind.

Die ersten Forschungsarbeiten zur Verwendung von Thermosiphons zum Wärmeentzug aus dem Erdreich für die Gebäudebeheizung erfolgten wärmequellen- und temperaturabhängig ohne bzw. mit Wärmepumpe. Im Jahr 1981 wird vom Wärmeentzug von heißen Aquiferen mit Tiefen kleiner 50 m berichtet (Cannaviello et al. 1981).

Für 1987 sind erste Untersuchungen mit Direktverdampfungssonden (vgl. Abschn. 13.2.2) in der BRD durch Knoblich et al. (1993) beschrieben.

In Österreich werden ab 1997 erste Prototypen von Phasenwechselsonden kleinen Durchmessers (d_i = 15 mm) aus PE-ummantelten Kupfer-Glattrohren ($l \sim$ 50–65 m) hinsichtlich verschiedener Kältemittel (R22, R134a, C_3H_8, CO_2) untersucht. Daraus resultierend wurden CO_2 und R410A für die Markteinführung durch Fa. M-Tec verwendet (Rieberer et al. 2002).

Ab 1997 sind ebenfalls Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit Wellrohren (d_i = 39 – 65 mm; l = 100–250 m; Kältemittel: CO_2) in Hannover dokumentiert (Kruse et al. 2011; Zorn et al. 2007; Zorn et al. 2008).

Seit 2007 existiert die in Abschn. 13.3.2 betrachtete Forschungsgeothermieanlage mit sieben Propan-Phasenwechselsonden (d_i = 50 – 63, 2 mm, l = 85–100 m) für den realen Heizbetrieb in Freiberg/Sachsen (Grab et al. 2010 und Storch et al. 2010). Die in diesem Kapitel vorgestellten Forschungsergebnisse beziehen sich auf detaillierte Untersuchungen an einer weiteren Phasenwechselsonde mit visuellem Zugang, vgl. Storch et al. (2012), Storch et al. (2014), Storch (2015), Grab et al. (2011), Grab (2015).

13.3.2 Anwendungsbeispiele von Thermosiphons und Fallfilmverdampfern

13.3.2.1 Übersicht zu installierten geothermischen Anlagen

Für die Branche der Direktverdampfersonden/-kollektoren (DV) bzw. Phasenwechselsonden (PWS) sind in Tab. 13.2 beispielhaft Hersteller und Vertreiber dargestellt.

Erdwärmekollektoren mit einem verdampfenden Kältemittel werden in Kombination mit einer Wärmepumpe oder auch als Direktverdampferkollektoren schon seit Längerem mit hohen Arbeitszahlen (~4–5) eingesetzt (Rieberer et al. 2002). Für Innenstädte sind diese Flächenkollektoren aufgrund einer geringen Flächenverfügbarkeit nur selten verwendbar, weshalb eine Anwendung als vertikale Phasenwechselsonde favorisiert wird.

Tab. 13.2 Beispiele von Herstellern von Phasenwechsel- bzw. Direktverdampfersonden und Direktverdampferkollektoren. (Nach Storch 2015)

Firma (seit)	DV/PWS	Kältemittel	Anlagen	Sonden
M-Tec* (1999)	Glattrohr-PWS (Cu)	CO_2	> 853[a)]	> 3554[b)]
Lüumel GmbH** (1999)	DV-Kollektor (Cu) DV-Sonde (Cu)	R410A[c)] R410A[c)]	~ 135 Stk./a ~ 15 Stk./a	– –
BLZ Geotechnik GmbH** (2001)	Glattrohr-PWS (Stahl/Edelstahl)	C_3H_8	> 121[d)]	> 258[d)]
Ochsner GmbH** (2006)	Wellrohr- PWS (Edelstahl)[e)] DV-Kollektor (Cu)	CO_2 R407C	– –	– –
GeCO2/Brugg Rohrsystem AG** (2010)	Wellrohr-PWS (Edelstahl)	CO_2	>31	>50

*Österreich, **Deutschland, [a)]durch Firma installierte Anlagen, [b)]alle installierten Sonden (inkl. Lizenznehmer), [c)]zukünftig CO_2 bzw. C_3H_8 denkbar, [d)]Daten bis 2009, [e)]Bau eingestellt

13.3.2.2 Forschungsanlage Reiche Zeche

Die TU Bergakademie Freiberg betreibt seit 2007 am Standort Reiche Zeche eine Geothermieforschungsanlage mit sieben Phasenwechselsonden mit dem Kältemittel Propan (R290) zur Teildeckung des Heizbedarfes eines Lehrgebäudes, siehe Abb. 13.3. Das Sondenfeld besteht aus fünf Edelstahl-Glattrohr-Sonden und zwei Wellrohrsonden. Die Glattrohrsonden wurden hierbei aus 6 m langen Einzelrohren hergestellt, verbunden über verlötete Rohrmuffen, was heutzutage über Orbitalschweißen realisiert wird. Die Wellrohrsonden wurden im Vorfeld durch die Herstellerfirma aus einem Endlosrohr konfektioniert (Verschluss des unteren Endes, Flanschanschluss oberes Ende). Außerdem sind zusätzlich sieben Flüssigkeitszirkulationssonden (U-Rohr; Koaxialrohr) zur Kälteversorgung von Labor- und Serverräumen in denselben betonierten Bohrlöchern installiert. Für Forschungsarbeiten wurde eine weitere Phasenwechselsonde (Sonde 8) abgeteuft, um damit visuelle Untersuchungen des Filmverhaltens und der im Inneren einer Phasenwechselsonde ablaufenden Prozesse im realen Betrieb zu ermöglichen, siehe Abb. 13.4. Details zum Aufbau und zur Messtechnik sind in Grab et al. (2011), Grab (2015), Storch et al. (2013), Storch (2015) aufgeführt.

Die in Abschn. 13.4 dargestellten Auslegungsgrundlagen und physikalischen Grundlagen sind Ergebniszusammenfassungen, welche u. a. aus der mehrjährigen Forschungsarbeit an dieser Forschungsanlage resultieren, siehe auch Storch (2015), Grab (2015).

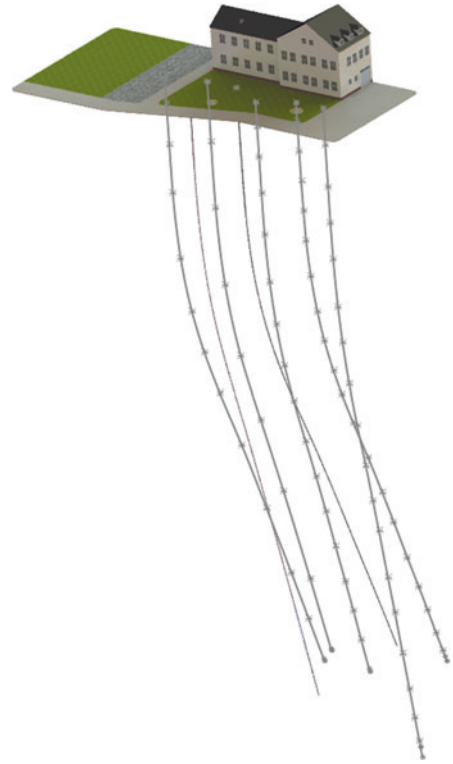


Abb. 13.3 3D-Bild als Größenvergleich (maßstabsgetreu) des Forschungssondenfeldes Reiche Zeche mit Verlauf (Bohrlochneigung) der 8 Propan-Phasenwechselsonden

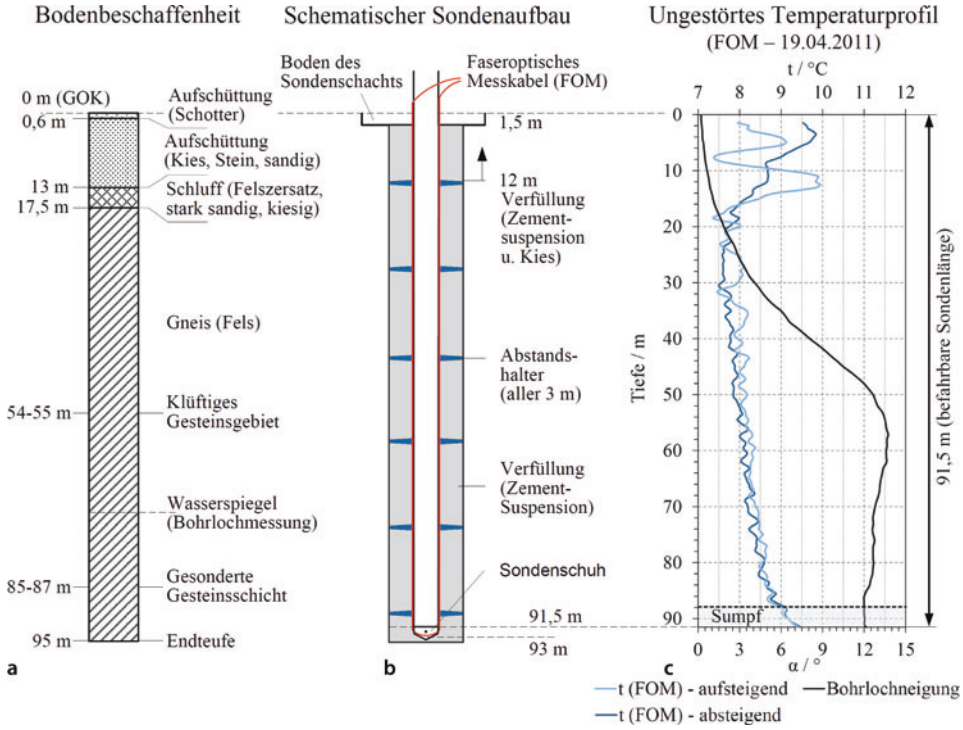


Abb. 13.4 **a** Bodenaufbau, **b** Sondenaufbau im Bohrloch, **c** Bohrlochneigung und Temperaturverlauf (faseroptische Temperaturmessung). (Aus Storch 2015)

13.3.2.3 Geothermieferne Anwendungen von Fallfilmverdampfern

Die Anwendungen der Fallfilmverdampfung in der Industrie sind vielfältig und können im Folgenden nur auszugsweise aus Grab (2015) beschrieben werden.

Die Meerwasserentsalzung und Herstellung von hochreinem Wasser erfordert einen großen Energieeinsatz, welcher u. a. durch die Anwendung von mehrstufigen Fallfilmverdampferanlagen bereits gesenkt werden konnte, Brendel (2003). Der Einsatz von Mehrfachdestillationsanlagen mit Rohr- oder Plattenfallfilmverdampfern wurde u. a. von Christmann et al. (2013) oder Darwish und Alsairafi (2004) untersucht. Für die Herstellung von Arzneimitteln und Injektionslösungen wird sterilisiertes Wasser benötigt, wofür in Europa die Destillation zwingend vorgeschrieben ist. Diese erfolgt häufig schrittweise in einer mehrstufigen Anlage mit Fallfilmwärmeübertragern in bis zu 8 Kolonnen, siehe Kerschbaumer (2008).

Im Bereich der Lebensmittelindustrie gibt es eine Vielzahl von Verdampfern mit unterschiedlichen Prozesszielen wie:

- Erhöhung der Haltbarkeit und mikrobiologischen Stabilität des Produktes, z. B. Aufbereitung von Milch, Verdampfung von Wasser aus wässrigen Lebensmitteln und Lösungen.

- Aufkonzentration von Stoffen in Flüssigkeiten, z. B. zur Zuckerherstellung oder zur Verringerung von Transport- und Lagerkosten bei Gemüse- und Fruchtsäften. Für das Aufkonzentrieren werden bis zu 7-stufige Fallfilmverdampferanlagen eingesetzt (Brennan 2006). Prost et al. (2006) geben typische Parameter industrieller Anlagen an, wobei die Verdampfungstemperaturen zwischen 11 und 28 °C liegen, was einem Druck von 0,1–0,55 bar entspricht.
- Erhöhung des Feststoffanteils als Vorstufe, z. B. zur Sprühtrocknung (Pulverherstellung).

Bei einer Vielzahl an Nahrungsmitteln kann es bei zu hohen Temperaturen zur Schädigung des Produktes kommen, weshalb kurze Verweilzeiten sowie geringe Verdampfungstemperaturen anzustreben sind (Smith 2011). Besonders das Prinzip der Fallfilmverdampfung erfüllt neben den Aspekten einer geringen Verdampfungstemperatur (Vakuumbetrieb) auch andere für die Qualität der Produkte bedeutende Punkte, wie z. B. hohe Wärmedurchgangskoezienten bei kleinen Temperaturdifferenzen, geringer Flüssigkeitsinhalt, relativ geringe Kosten, kleiner Druckverlust sowie keine hydraulische Höhe, siehe Ahmed und Rahman (2012), Schuchmann (2005). Als typische geometrische Dimensionen von Fallfilmverdampfern in der Lebensmittelindustrie werden die Verdampferlänge mit 3–20 m sowie Rohrdurchmesser mit 25–50 mm beziffert, siehe Brennan (2006), Berk (2013), Valentas et al. (1997).

Bei der Herstellung von Papier nach dem Sulfatverfahren entsteht als Nebenprodukt Schwarzlauge, ein Gemisch aus Extrakten des Grundstoffes Zellulose sowie weiteren organischen Bestandteilen. Zur Energierückgewinnung wird diese Schwarzlauge verbrannt, weshalb der Feststoffanteil auf 50–75 % angehoben werden muss, siehe Tikka (2001).

Für Trennungsprozesse werden u. a. in der chemischen Industrie vermehrt Packungskolonnen eingesetzt. Dabei ießt die flüssige Phase in Abhängigkeit von Berieselungsdichte und Stoffeigenschaften als Film-, Rinnsal- oder Tropfenströmung auf der Packungsoberfläche, siehe Hoffmann et al. (2004). Eine weitere Anwendung besteht in der Reinigung von Öl-Wasser-Emulsionen bei der Gewinnung von Erdöl. In bis zu 15 m hohen Fallfilmverdampfern wird das Wasser recycelt, wodurch bis zu 98 % des Wasserbedarfs durch gereinigtes Wasser abgedeckt werden kann, siehe Bjorklund et al. (2010).

13.4 Auslegungsgrundlagen und physikalische Grundlagen

13.4.1 Arbeitsstoffe

Als Wärmeträgermedien können theoretisch alle Kältemittel (Arbeitsstoffe zum Wärmetransport in Kältemaschinen) eingesetzt werden, die bei technisch erreichbaren Drücken verflüssigt und bei tiefen Temperaturen verdampft werden können. Weiterhin sind nach dem Montrealer Protokoll (1987) und dessen Anpassungen nur noch chlor- und bromfreie Kältemittel erlaubt (Hainbach et al. 2013). Die sicherheitstechnischen

und umweltrelevanten Anforderungen an Kältemittel sind in der DIN EN 378-1 für Kälteanlagen und Wärmepumpen klassifiziert und beinhalten nach Cube (1997) und Hainbach et al. (2013) die nachfolgend gewichtete Auflistung hinsichtlich guten:

- ökologischen Eigenschaften (niedriges Ozonabbau- (ODP) und Treibhauspotential (GWP), sowie keine Gefährdung durch Abbauprodukte),
- thermodynamischen Eigenschaften (hohe Verdampfungsenthalpie und volumetrische Kälteleistung),
- physikalischen Eigenschaften (günstige Lage: kritischer Punkt, Siedepunkt; niedrige dynamische Viskosität, hohe Wärmeleitfähigkeit),
- chemischen Eigenschaften (chemische Beständigkeit im Kältemittelkreislauf, gute Werkstoffverträglichkeit, nicht brennbar, gute Mischbarkeit mit Kältemaschinenöl),
- physiologischen Eigenschaften (niedrige Toxizität bzw. toxikologisch unbedenklich),
- ökonomischen Eigenschaften (hohe Verfügbarkeit bei geringen Kosten).

Für Phasenwechselsonden (PWS) sind weiterhin geringe Dampfdrücke bei den vorherrschenden Erdreichtemperaturen als auch eine niedrige Wassergefährdungsklasse (WGK) zu beachten. Peterlunger et al. (2004) vergleichen die Kältemittel Kohlendioxid (CO_2), Propan (C_3H_8), Ammoniak (NH_3), Methanol (CH_3OH), Wasser (H_2O) und R125 (C_2HF_5) als mögliche Arbeitsstoffe in PWS in der Oberflächennahen Geothermie (Tiefe bis 350 m). Nach Häfner et al. (2007) ist zusätzlich Ethan (C_2H_6) als Wärmeträgermedium für PWS bis 800 m Tiefe denkbar, vgl. auch Abschn. 13.4.2. Dabei muss bei allen Kältemitteln (außer Wasser) stets überprüft werden, ob unter Vorhandensein von geringen Anteilen an Wasser eine mögliche Gefährdung des Anlagenbetriebs durch Hydrateisbildung besteht (Storch 2015).

Bisher finden nur C_3H_8, CO_2, und NH_3 Anwendung in geothermischen PWS. Aufgrund der Umweltgefährlichkeit von NH_3 und den resultierenden hohen Sicherheitsanforderungen existieren bisher nur wenige mit NH_3 betriebene PWS. Bei PWS mit dem Kältemittel Propan ist dessen Brennbarkeit in Bezug auf die Installation zu berücksichtigen. CO_2 wiederum bedarf einer druckbeständigen PWS bis hin zu sehr hohen Drücken, vgl. Tab. 13.3 (Stober und Bucher 2012).

In Abb. 13.5 sind die Dampfdruckkurven der bisher theoretisch betrachteten Kältemittel im relevanten Temperaturbereich mit Ausnahme von R123, dargestellt. Für den Einsatz in Phasenwechselsonden in der Oberflächennahen Geothermie sind die Wärmeträgermedien Methanol und Wasser infolge des notwendigen Unterdrucks (vgl. Abb. 13.5) ungeeignet, da dessen Aufrechterhaltung einen hohen konstruktiven Aufwand erfordern würde.

13.4.2 Leistungsgrenzen und Arbeitsbereich

Die Leistungsgrenzen von Thermosiphons sind in der Literatur umfangreich beschrieben, vgl. u. a. VDI-Wärmeatlas (2006), Faghri (1995). Für geothermische Phasenwechselsonden nach dem Thermosiphonprinzip sind dabei die:

Tab. 13.3 Technische und physikalische Vor- und Nachteile der bisher in PWS eingesetzten natürlichen Kältemittel Propan (C_3H_8), Ammoniak (NH_3) und Kohlendioxid (CO_2) nach Hainbach et al. (2013), Cube (1997) und Stober und Bucher (2012). (Nach Storch 2015)

	C_3H_8 (R290)	CO_2 (R744)	NH_3 (R717)
Vorteile	• ↓Druck, $p\,(t = 10\,°C) \sim 6,4$ bar • gute Mischbarkeit mit Kältemaschinenöl (nachteilig für DVD-Sonden) • ODP = 0; GWP = 3 • WGK = 0	• thermisch stabil ($\leq 1500\,°C$) • ↑ volumetrische Kälteleistung • ↓kin. Viskosität, ↓ Druckverlust • preiswertes Kältemittel • ODP = 0; GWP =1 • WGK = 2	• ↓ Druck, $p(t = 10\,°C) \sim 6,1$ bar • ↑ spezifische Kälteleistung • chemisch u. thermisch stabil • preiswertes Kältemittel • ODP = 0; GWP = 0 • WGK = 0
Nachteile	• Brennbar • Bildung von Gashydraten/Clathraten bei vorhandener Feuchtigkeit ($c_{H2O} > 10$ ppm) möglich, (Makogon 1997)	• ↑Druck, $p(t = 10\,°C) \sim 45$bar • hohe Anlagenanforderung • Gashydratbildung (Clathrate) bei Feuchtigkeit möglich, • unlöslich im Kältemaschinenöl → Ölabscheider in DVD-Sonden	• Toxisch, entzündlich, ätzend, umweltgefährlich • korrosiv gegenüber Buntmetallwerkstoffen (u. a. Cu) • stark wasserlöslich • unlöslich im Kältemaschinenöl → Ölabscheider in DVD-Sonden

ODP: Ozonabbaupotential; GWP: global warming potential; WGK: Wassergefährdungsklasse; DVD-Sonden: bei Direktverdampfersonden, d. h. die Wärmepumpe ist im Sondenkreislauf integriert

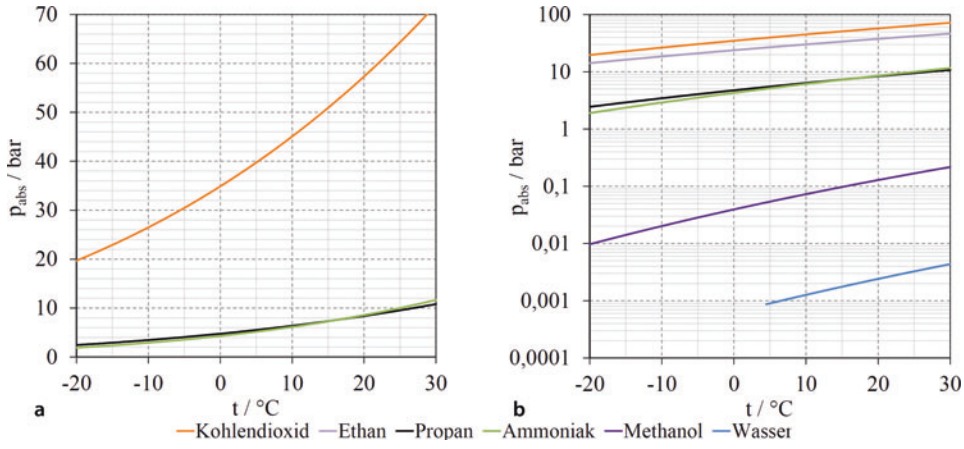


Abb. 13.5 Sättigungsdruck, **a** von bisher in PWS eingesetzten Kältemitteln, **b** von möglichen einsetzbaren Kältemitteln, Stoffdaten aus VDI-Wärmeatlas (2006). (Aus Storch 2015)

- Benetzungsgrenze,
- Wechselwirkungsgrenze/Staugrenze (Fluten),
- der Füllgrad,
- die Siedegrenze (mit Einschränkungen)

von Bedeutung. All diese Grenzen besitzen einen Einfluss auf die Filmausbreitung (Benetzungsgrad) bzw. Filmstabilität im Verdampferbereich und werden nachfolgend in Bezug auf Phasenwechselsonden erläutert.

13.4.2.1 Benetzung

Wie bereits in Abschn. 13.2.2 vorgestellt, basieren geothermische Phasenwechselsonden auf dem Grundprinzip der Rieselfilmverdampfung in einem Thermosiphon. Ein besonderes Augenmerk muss daher auf den Flüssigkeitsfilm und eine möglichst vollständig benetzte Verdampferoberfläche gelegt werden. Aufgrund unterschiedlicher Mechanismen kann es zum Filmaufriss kommen.

Die Entstehung von Strähnen und Trockenstellen beim Herabrieseln oder bei der Oberflächenverdampfung eines Rieselfilmes ist in einem Stabilitätsproblem begründet. Durch die Verringerung der Filmdicke und Unterschreitung der minimalen Filmdicke (Δ_{min}) bilden sich temporäre oder bleibende Trockenstellen aus (Gross 1991).

In geothermischen Phasenwechselsonden stellt sich die Filmdicke in Abhängigkeit von den treibenden Druck- und Temperaturdifferenzen selbstständig ein. Es herrscht im stationären Zustand also immer ein Gleichgewicht zwischen abwärts rieselndem Flüssigkeitsfilm und aufströmendem Dampf. Der aufgegebene Kondensatmassenstrom wird mit zunehmender Lauflänge verdampft und die Filmdicke nimmt ab. Bei idealer Filmaufgabe müsste der Film beim Erreichen des Sumpfes vollständig verdampft sein. Der Flüssigkeitsfilm nähert sich mit zunehmender Lauflänge jedoch kontinuierlich der minimalen Filmdicke und unterschreitet diese, bevor er den Sumpf erreicht hat.

Nach dem Unterschreiten der minimalen Filmdicke reißt der Film auf und bildet Rinnsale aus, welche in Abhängigkeit vom Betriebsregime bis zum Sumpf nicht vollständig verdampfen. Um das Gleichgewicht zwischen Dampf und Rieselfilm aufrechtzuerhalten, muss der Flüssigkeitsanteil der Rinnsale wieder aus dem Sumpf verdampft werden. In welchem Abstand zum Sumpf der Flüssigkeitsfilm aufreißt, wird maßgeblich durch den Ort der Unterschreitung der minimalen Filmdicke beeinflusst (Grab 2015).

Minimale Filmdicke

Zur Berechnung der kritischen minimalen Filmdicke ist in der Literatur eine Vielzahl an mathematischen Modellen vorhanden, welche aus empirischen Untersuchungen oder analytischen Ansätzen hervorgingen und im Wesentlichen von der Benetzung abhängig sind. Unter Benetzung versteht man die Ausbildung einer Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit und einem Feststoff. Ein Tropfen bildet an der Grenzfläche, in welcher alle drei Phasen (fest, flüssig, gasförmig) zusammentreffen, einen definierten Winkel, den Kontaktwinkel oder Rand- bzw. Benetzungswinkel (θ). Kontaktwinkel von Arbeitsstoffen geothermischer PWS wie z. B. Propan, Kohlendioxid oder Ammoniak

auf Sondenmaterialien sind in der Literatur kaum untersucht. Da die Benetzung dieser Flüssigkeiten sehr gut ist, kann man von Kontaktwinkeln kleiner 10° ausgehen. Werte für Propan auf unterschiedlichen Materialien werden von Grab (2015), Grab et al. (2015) und Eichinger et al. (2014) mit kleiner 5° angegeben.

Für die Bestimmung der dimensionslosen minimalen Filmdicke (Δ_{min}) existieren verschiedene Angaben in der Literatur. Eine gute Übersicht unterschiedlicher Berechnungsvorschriften wird durch Grab (2015) gegeben. El-Genk und Saber (2001) entwickelten anhand der Minimierung der Gesamtenergie eine Gleichung zur Vorhersage der minimalen Filmdicke bzw. Berieselungsdichte und verglichen diese bei sehr guter Übereinstimmung mit der nachfolgenden empirischen Gleichung.

$$\Delta_{min} = (1 - \cos\theta)^{0,22} \tag{13.1}$$

Die Umrechnung der dimensionslosen Filmdicke in eine dimensionsbehaftete Größe (δ_{min}) erfolgt mit einem stoffabhängigen Faktor, El-Genk und Saber (2001), Hartley und Murgatroyd (1964).

$$\delta_{min} = \Delta_{min} \left(\frac{\rho_f^3 \cdot g^2}{15 \cdot \eta_f^2 \cdot \sigma_f} \right)^{-0,2} \tag{13.2}$$

Dazu werden die Stoffwerte dynamische Viskosität (η), Oberflächenspannung (σ) und Dichte sowie die Gravitationskonstante (g) benötigt. Es wird weiterhin angegeben, wie wichtig die korrekte Bestimmung des Kontaktwinkels ist. Für die Ermittlung der minimalen Berieselungsdichte bei Erstbenetzung muss der Vorrückwinkel bzw. bei Aufreißen eines bestehenden Flüssigkeitsfilmes der Rückzugswinkel eingesetzt werden.

Mechanismen zur Unterschreitung der minimalen Filmdicke

Bei Simon und Hsu (1970), Aviles (2007), Schnabel und Palen (2006) oder im VDI-Wärmeatlas (2013) werden u. a. folgende Ursachen zur temporären oder dauerhaften Unterschreitung der minimalen Filmdicke aufgeführt:

- unzureichende Flüssigkeitszufuhr an der Filmaufgabe (FA). Es gilt zu beachten $\Delta_{real} > \Delta_{min;FA} > \Delta_{min}$ (Morison et al. 2006).
- Verringerung der Filmdicke durch Verdampfung mit zunehmender Verdampferlänge.
- Lokale Benetzungsunterschiede der berieselten Oberfläche.
- Unterschreitung der minimalen Filmdicke auf der Rohroberseite bei geneigten Rohren.
- Marangoni-Effekte (auch Thermokapillarität), durch welche sich Oberflächenspannungsgradienten ausbilden und die somit zur lokalen Unterschreitung der minimalen Filmdicke führen können (Joo et al. 1996; Simon und Hsu 1970; Zaitsev et al. 2007 und Gambaryan-Roisman 2007).
- Bei einer hohen Verdampfungsrate kann es zu deutlichen Schubspannungen zwischen Dampf und Flüssigkeitsfilm kommen, was zur lokalen Aufstauung oder dem Mitriss der Flüssigkeit (Flutpunktüberschreitung) führen kann.

13.4.2.2 Staugrenze/Fluten

Die Geschwindigkeit des Rieselfilmes beträgt an der Rohrwand Null (Haftbedingung) und steigt in Richtung der Phasengrenzfläche an. Die höchsten Dampfgeschwindigkeiten (j_g) treten in der Rohrmitte auf. Infolge von Reibungskräften (Schubspannung) findet an der Grenzfläche zwischen abwärtsfließendem Fallfilm und aufsteigender Dampfströmung eine Wechselwirkung statt, wodurch die Volumenströme der Phasen (Flüssigkeit/Dampf) begrenzt sind. Dieser Zustand wird als Wechselwirkungsgrenze bzw. auch als „Staugrenze" oder „Fluten" bezeichnet und würde in einer geothermischen PWS als erstes am Sondenkopf erreicht, da hier die maximalen Massenströme (Flüssigkeit, Dampf) aufeinander treffen. Zur Bestimmung dieser Grenze werden in der Literatur sehr häufig Korrelationen ausgehend von Wallis (1969), die auf dem Gleichgewicht zwischen Trägheits- und hydrostatischen Kräften beruhen, verwendet. Diese gelten bei besagter Gegenstromführung mit ($j_{g/f}$) als Leerrohrgeschwindigkeiten (Gl. 13.4) (VDI 2006; Grüniger und Wellig 2009; Storch 2015).

Tien und Chung (1979) geben eine weitere Beziehung zur Flutpunktberechnung (Gl. 13.3, 13.4) von Kutateladze (1972) mit dimensionsloser Kutateladze-Zahl (K) an, welche die Oberflächenspannung σ berücksichtigt.

$$\sqrt{K_g} + \sqrt{K_f} = C_{K1} = \sqrt{3,2} \tag{13.3}$$

$$\text{mit } K_g = \frac{j_g \rho_g^{1/2}}{\left[g\sigma\left(\rho_f - \rho_g\right)\right]^{1/4}} \quad \text{und} \quad K_f = \frac{j_f \rho_f^{1/2}}{\left[g\sigma\left(\rho_f - \rho_g\right)\right]^{1/4}} \quad \text{mit} \quad j_{g/f} \equiv \frac{4\dot{V}_{g/f}}{\pi d_i^2} \tag{13.4}$$

Eine Weiterentwicklung dieser Beziehungen durch die Variation der Konstante C_{K2} unter Einbeziehung der Bond-Zahl (Bo) zeigt Gl. 13.5. Unter Berücksichtigung der Massen- und Energieerhaltung (Randbedingung: stationärer Betrieb des Thermosiphons) ergeben sich mit der Rohrquerschnittsfläche A die Gl. 13.6 und 13.7 für die Ermittlung eines theoretisch maximal transportierbaren Wärmestromes ($\dot{Q}_{krit}$) in Thermosiphons (Tien und Chung 1979).

$$\sqrt{K_g} + \sqrt{K_f} = \sqrt{3,2}\tanh\left(0,5\,Bo^{1/4}\right) \equiv C_{K2} \quad \text{mit} \quad Bo = d_i\sqrt{\frac{g\left(\rho_f - \rho_g\right)}{\sigma}} \tag{13.5}$$

$$\dot{Q}_{krit}/A = \rho_f j_f h_{fg} = \rho_g j_g h_{fg} \tag{13.6}$$

$$\dot{Q}_{krit} = C_K^2 A h_{fg}\left(\rho_f^{-1/4} + \rho_g^{-1/4}\right)^{-2}\left[g\sigma\left(\rho_f - \rho_g\right)\right]^{1/4} \tag{13.7}$$

Grüniger und Wellig (2009) zeigten bei ihren theoretischen Staugrenzenuntersuchungen zu Phasenwechselsonden, dass die Berechnungsvorschrift von Tien und Chung (1979) im Vergleich zu anderen (u. a. Wallis 1969) ein sehr konservatives Ergebnis erwarten lässt. Somit kann bei Anwendung und Einhaltung dieser Berechnungsvorschrift ein Erreichen bzw. Überschreiten der Staugrenze im annähernd stationären Betrieb für PWS ausgeschlossen werden.

In Abb. 13.6 und Abb. 13.7 ist der durch verschiedene Arbeitsstoffe nach Gl. 13.7 maximal transportierbare Wärmestrom ($\dot{Q}_{krit}$) in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers (d_i)

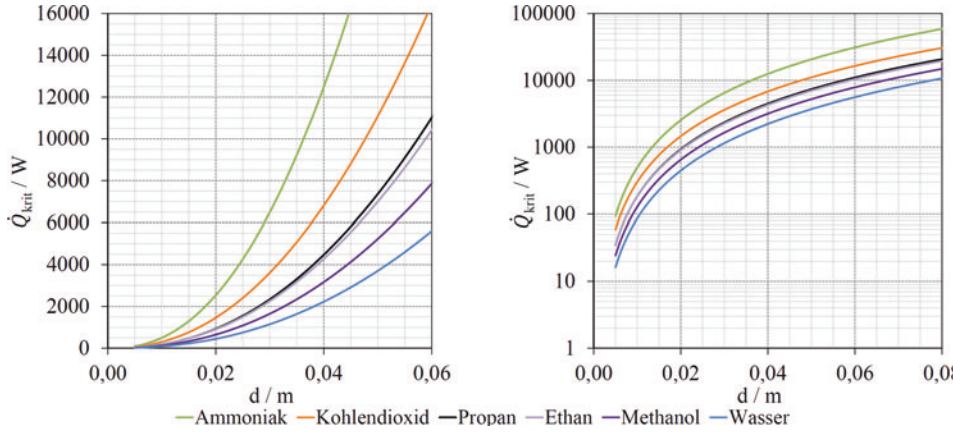


Abb. 13.6 Staugrenzenkorrelation für maximalen Wärmestrom ($\dot{Q}_{krit}$) nach Tien und Chung (1979) bei variierendem d_i, links: gezoomter Ausschnitt, Stoffwerte bei t_{Dampf} = 0 °C (H_2O: 5 °C) aus VDI-Wärmeatlas (2006), Coolpack Version 1.50, Skovrup et al. (2012). (Aus Storch 2015)

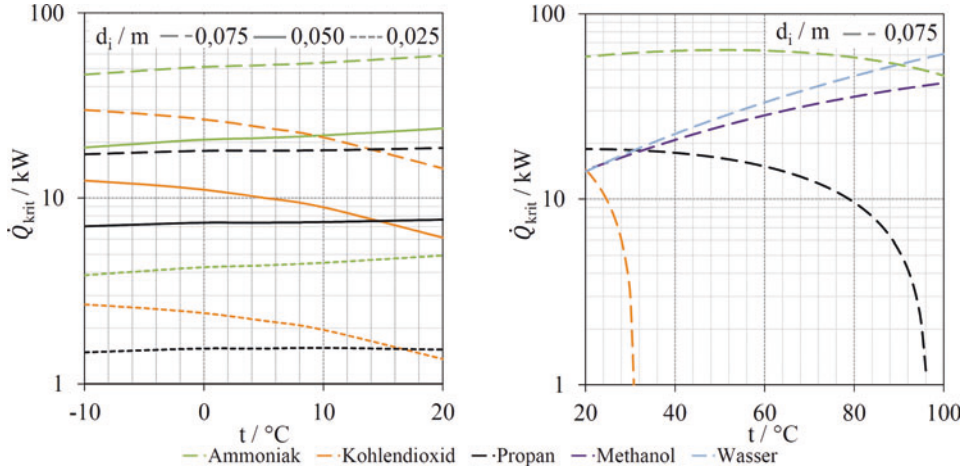


Abb. 13.7 Staugrenzenkorrelation für maximalen Wärmestrom ($\dot{Q}_{krit}$) nach Tien und Chung (1979) bei variierendem d_i, links: gezoomter Ausschnitt, Stoffwerte bei t_{Dampf} = 0 C (H_2O: 5 °C) aus VDI-Wärmeatlas (2006), Coolpack Version 1.50, Skovrup et al. (2012). (Aus Storch 2015)

und der Verdampfungstemperatur dargestellt. Die drei bisher in geothermischen Phasenwechselsonden eingesetzten Kältemittel (NH_3, CO_2, C_3H_8) weisen gegenüber den anderen natürlichen Kältemitteln für eine Verdampfungstemperatur von 0 °C die größten transportierbaren Wärmeströme auf. Dabei nimmt Ammoniak eine Ausnahmestellung ein, da es z. B. gegenüber CO_2 einen fast doppelt so hohen maximalen Wärmestrom transportieren könnte.

Dieser maximal transportierbare Wärmestrom ist wiederum von den temperatursensitiven Stoffwerten abhängig, was in Abb. 13.7 für einen Rohrinnendurchmesser von 75 mm in einem Temperaturbereich von –10 °C bis 100 °C dargestellt ist. Für CO_2 und C_3H_8 wird der kritische Punkt überschritten, wobei mit Annäherung an diesen die Verdampfungsenthalpien drastisch ab- und infolgedessen bei konstantem Wärmestrom die durch Verdampfung erzeugten Massenströme stark zunehmen. Hierdurch wird die Wechselwirkungsgrenze (Fluten) bei deutlich niedrigeren Wärmeströmen erreicht.

Für einen zukünftigen Einsatz bei höheren Verdampfungstemperaturen, z. B. in der tiefen Geothermie, können von den hier betrachteten Wärmeträgermedien nur H_2O, CH_3OH und NH_3 verwendet werden (Gerke et al. 2004, Häfner et al. 2007). Für die Auslegung des Rohrdurchmessers sind dazu jedoch noch weitere Randbedingungen wie Arbeitsstoff, benötigte maximale Sondenentzugsleistung, Temperatur- und Druckniveau (Flüssigkeit/Dampf) bei Stillstand oder Betrieb und evtl. abrupte Querschnittverengungen bzw. -erweiterungen (z. B. Flüssigkeitsaufgabe) zu berücksichtigen.

13.4.2.3 Füllgrad

Der Füllgrad (engl. *filling ratio*) ist eng mit der Benetzungsgrenze, dem zu transportierenden Wärmestrom und der Geometrie der Verdampfungsstrecke verknüpft. Der Füllgrad ist dabei auf das Gesamtvolumen eines Thermosiphons bezogen und besitzt sowohl eine obere als auch untere Grenze. Der untere Füllgrad ist durch eine unvollständige Benetzbarkeit der Verdampferfläche durch den Kondensatrieselfilm bzw. ein Austrocknen des Flüssigkeitspools charakterisiert (Shiraishi et al. 1984; Unk 1989; El-Genk und Saber 1997, 1999). Gegenüber Thermosiphons kleiner Abmessungen ist für geothermische Phasenwechselsonden aufgrund der großen Verdampferlänge, einer nicht existenten adiabaten Zone und der geringen Wärmestromdichte hauptsächlich der untere Füllgrad bzw. die minimale Füllhöhe des Pools zu berücksichtigen, siehe weiterführend Abschn. 13.4.5.

13.4.2.4 Siedegrenze

Die Siedegrenze beschreibt bei Thermosiphons analog zu Heat Pipes ohne offene Kapillarrillen das lokale Austrocknen des Verdampferbereiches bei hohen Wärmestromdichten durch auftretendes Blasensieden (VDI-Wärmeatlas 2006). Bei Überschreitung einer kritischen Wärmestromdichte (oder kritischen Temperatur) kann ein Übergang zum Filmsieden auftreten, bei dem die Oberfläche von Dampf bedeckt ist, wodurch die Verdampferfläche ebenfalls austrocknet. Dies ist jedoch bei oberflächennah eingesetzten geothermischen Phasenwechselsonden infolge der geringen Temperaturdifferenzen zwischen Gestein und Kältemittel nicht zu erwarten.

13.4.3 Anfahrverhalten und zyklischer Wärmeentzug

Der zyklische bzw. periodische Wärmeentzug resultiert aus der in der Praxis üblichen periodischen Wärmeanforderung und ist für eine Anlagenauslegung zu berücksichtigen.

Erb et al. (2004) stellten in einer umfangreichen *Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen* (FAWA) u. a. die realen Wärmeentzugszeiten mit 2 min bis ca. 4,5 h (u. a. Sole-Wasser-Wärmepumpen) dar. Aus dem Anfahrprozess und dem zyklischen Wärmeentzug von geothermischen Phasenwechselsonden können bei genauer Betrachtung von anlagenspezifischen Messwerten (z. B. Sondenkopfdruck) wichtige Aussagen über das allgemeine Betriebsverhalten und die Güte der Anlageninstallation gefolgert werden. Beispielhaft sind hierzu in Abb. 13.8 der Sondenkopfdruckverlauf für einen dauerhaften Wärmeentzug (DV II) und für einen zyklischen Wärmeentzug gegenübergestellt.

Unmittelbar nach dem Start des Wärmeentzuges weisen beide Druckverläufe eine steile Druckabsenkung um ca. 1,1 bar ($\tau \leq 6$ min), gefolgt von einem bis $\tau \approx 12,5 - 15$ min stagnierenden Sondenkopfdruck (Abb. 13.8, Markierung A) auf. Dieser Verlauf ist folgendermaßen erklärbar: Bei dem instationären Prozess des Wärmeentzuges erreicht der am Sondenkopf aufgegebene Kondensatrieselfilm (Kältemittel) nach Wärmeentzugsstart eine bestimmte Sondentiefe, bei der der Wärmesenke eine ausreichende Wärmemenge zur Verfügung gestellt wird. Damit geht ein stagnierender Sondendruck p_{abs} einher. Bis zum Erreichen des unteren Sondenendes (Pool) durch den Rieselfilm bleibt p_{abs} (und t_{sat}) aufgrund der stetig neuen Benetzung tiefer liegender „warmer" Rohrflächen nahezu konstant, was u. a. auch in Messungen der Druck- und Temperaturverläufe (letzteres tiefenabhängig) von Rieberer et al. (2004), Rieberer (2005), Kruse et al. (2008) und Zorn et al. (2007) für CO_2-gefüllte PWS erkennbar ist. Dieser Druckverlauf kann damit als

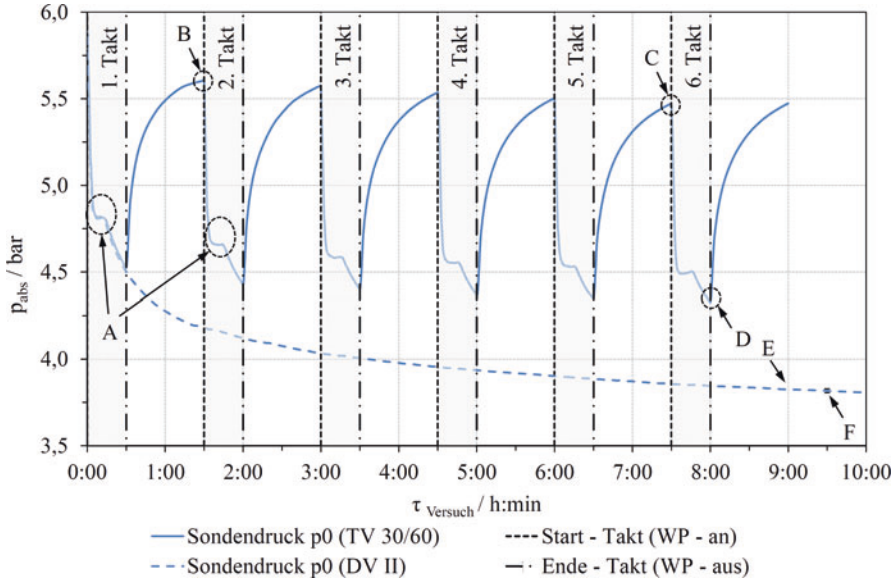


Abb. 13.8 Gegenüberstellung der Verläufe des Propan-Sondenkopfdruckes für einen zyklischen Wärmeentzug (30 min) und 60 min Regeneration (TV 30/60) und für einen Dauerversuch (DV II), Anlage Reiche Zeche. (Aus Storch 2015)

wichtiges Erkennungsmerkmal für Phasenwechselsonden zur Filmausbreitung über die Tiefe dienen.

Die Filmankunft am Flüssigkeitspool beendet die weitere Filmausbreitung auf „warme“ unbenetzte Wandoberflächen und geht somit einher mit einer erneuten Druckabsenkung, da der Kondensatfilm die bereits benetzten Wandflächen weiter auskühlt, wodurch die Sattdampftemperatur und folglich der Dampfdruck sinken, bis ein annähernd „stationärer“ Zustand erreicht ist. Dies ist der Fall, wenn die bei annähernd konstanter Rohrwandtemperatur aus dem umliegenden Gestein nachströmende Wärmemenge gleich dem Wärmebedarf der Wärmesenke ist, was in Abb. 13.8 an Punkt E noch nicht der Fall ist. Dieses instationäre Verhalten wird ebenfalls zur Charakterisierung des Untergrundes in sogenannten TRT-Messungen (sprunghafte Erwärmung des Untergrundes und anschließend Auswertung der Temperatur-Abklingkurve) verwendet.

Nach beendetem Wärmeentzug steigt der Sondendruck ebenso sprunghaft mit einem asymptotischen Verlauf hin zum Ruhedruck wieder an, vgl. 1.Takt in Abb. 13.8. Dabei ist beim zyklischen Wärmeentzug auffällig, dass der Sondendruck am Ende jeder Regenerationsphase stets auf einem geringfügig niedrigeren Niveau liegt als beim vorangegangenen Takt (siehe Abb. 13.8 von Punkt B zu Punkt C). Dies setzt sich ebenso beim Vergleich der Höhen der stagnierenden Druckniveaus (A) und dem Druck am Taktende (D) fort und ist auf eine unvollständige Temperaturregeneration des Untergrundes trotz einer gegenüber der Entzugszeit verdoppelten Regenerationszeit zurückzuführen. Daraus sind für einen realen Hausbetrieb wichtige Schlussfolgerungen für die installierte bzw. zu planende geothermische Phasenwechselsonden-Konfiguration (Wärmepumpe, Sondenlänge, Zementage, Gesteinsart etc.) hinsichtlich notwendiger Regenerationszeiten zu ziehen:

- Eine verlängerte gesamte Taktzeit (Entzug und Regeneration) auf beispielsweise 2,5 h bei gleichzeitig kleinen Verhältnissen von Entzugs- zu Regenerationszeit erscheint sinnvoll, da die Entzugszeit größer als die Filmankunftszeit am Flüssigkeitspool sein sollte, um die gesamte PWS-Länge zum Wärmeentzug zu nutzen.
- Generell sollte sowohl bei zyklischen als auch bei längeren Wärmeentzugszeiten sowohl für PWS als auch Flüssigkeitszirkulationssonden die Regenerationszeit ein Vielfaches der Entzugszeit betragen, um das Erdreich nicht über längere Zeiträume zu stark auszukühlen.

In der Arbeit von Storch (2015) wurden darüber hinaus weitere im Inneren einer geothermischen PWS ablaufende Prozesse wie z. B. der Einfluss und das Verhalten des Flüssigkeitspools beim Start des Wärmeentzuges untersucht. Es konnte damit die große Bedeutung des Flüssigkeitspools bei PWS während des Startvorgangs und in der Regeneration (vgl. Abschn. 13.4.6) nachgewiesen werden.

Eine chronologische Bilderabfolge der beobachteten Poolzustände ist hierzu mit Blick auf die Flüssigkeitsoberfläche in Abb. 13.9 dargestellt. Zu Beginn des Wärmeentzugs (00:00) (Abb. 13.9a) ist ein Teil der Wandfläche oberhalb der Pooloberfläche benetzt, welcher mit Start des Wärmeentzuges und dem daraus resultierenden weiteren Absinken

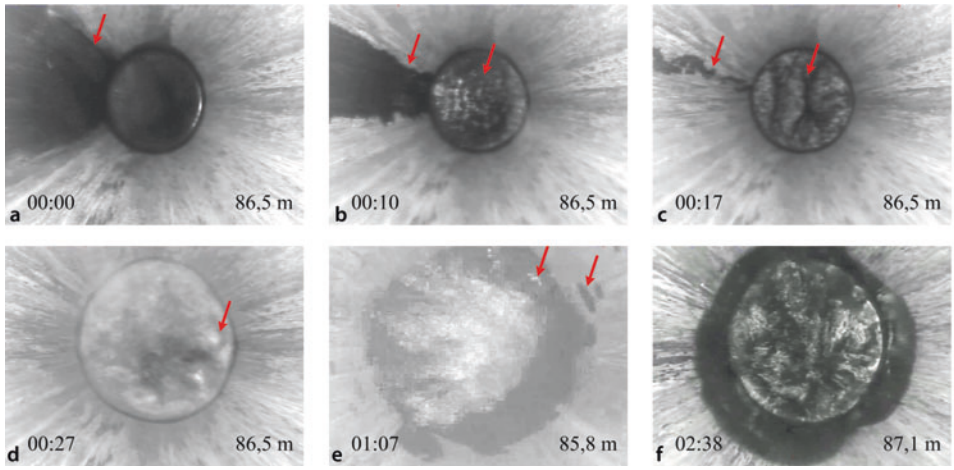


Abb. 13.9 Aktivitätszustände des Flüssigkeitspools nach Start des Wärmeentzuges (T_{Start} = 00 : 00 in Minuten:Sekunden). (Aus Storch 2015)

von Druck und Sattdampftemperatur im Inneren der PWS innerhalb kurzer Zeit vollständig abtrocknet. Währenddessen finden im Pool Oberflächenverdampfung und erstes Blasensieden statt (Abb. 13.9b), was durch eine bewegte Oberfläche mit ersten Blasen zu erkennen ist (Pfeil). Aufgrund der kleinen Pooloberfläche kann diese nur eine geringe Wärmemenge durch Oberflächenverdampfung abgeben, wodurch die Flüssigkeit überhitzt ($t_{Pool} > t_{sat}$). Mit stetig sinkendem Sondendruck steigt die Überhitzung des Pools weiter an, was zu einer Zunahme der Siedeintensität (Abb. 13.9c) mit einem evtl. plötzlichen Emporschießen (*geysering*, Imura et al. (1999)) der siedenden Poolflüssigkeit (Abb. 13.9d, e) führt. Mit fortschreitender Zeit nimmt die Siedeintensität aufgrund des sich abkühlenden Flüssigkeitspools und infolge der Kondensatfilmaufgabe am Sondenkopf mit einer dadurch verringerten weiteren Druckabsenkung in der PWS ab. Damit einhergehend sinkt der Poolspiegel (Abb. 13.9f) bei stetigem Sieden (weitere Wärmebereitstellung) ab.

Die benannten Siedezustände des Pools konnten ebenfalls in faseroptischen Temperaturmessungen mit variierender Poolhöhe zeitlich versetzt erkannt werden. Zwei bis vier Minuten nach Start des Wärmeentzuges ist über die gesamte Poolhöhe eine Temperaturabsenkung um ca. 0,5–2,5 K aufgrund der eruptiven Siedevorgänge (vgl. Abb. 13.9d, e und Pfeil in Abb. 13.10) zu detektieren. Die Wärmebereitstellung durch den Pool dauert hierbei auch nach der Filmankunft (FAZ*) an, was in einer weiteren Auskühlung sichtbar ist.

13.4.4 Temperaturverteilung entlang der Sonde

Unter realen Betriebsbedingungen werden oberflächennahe geothermische Sonden stets je nach Heizanforderung zyklisch belastet. D. h. der Untergrund erfährt in einem gewissen

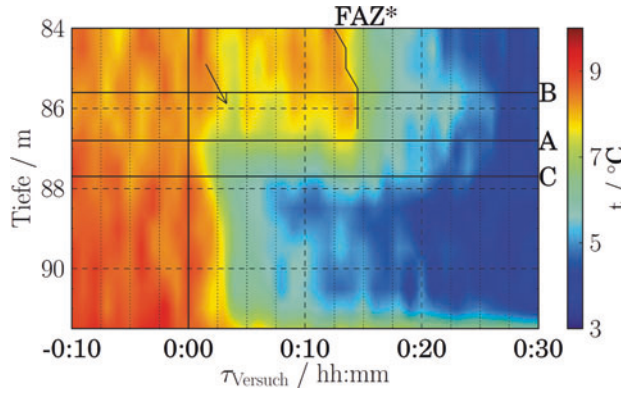


Abb. 13.10 Interpolierter 2D-Temperaturverlauf der Rohraußenwand beim Startvorgang mit eruptivem Sieden (Pfeil), Filmankunftszeit (FAZ*) $\geq$ 830 s, A = h_{Pool}, Ruhe, B = h_{Pool}, max., C = h_{Pool}. (Aus Storch 2015)

wiederkehrenden Zyklus eine Wärmeentzugs- und eine Regenerationsphase. Das Verhältnis beider Phasen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Untergrundtemperaturen (siehe Abschn. 13.4.6) und folglich auf die energetische Effizienz (Arbeitszahl, siehe Abschn. 13.4.7).

In Abb. 13.11 ist beispielhaft für eine Belastung der PWS über sechs Takte mit je 30 min Wärmeentzug und 60 min Regeneration das sondennahe Temperaturfeld dargestellt. Unregelmäßigkeiten in dem Temperaturprofil sind u. a. durch die Lage des faseroptischen

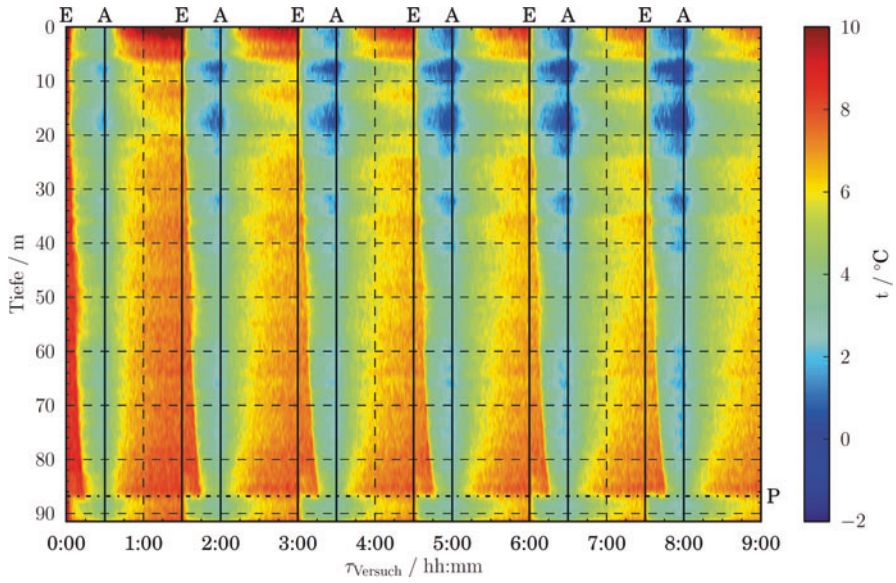


Abb. 13.11 Interpolierter 2D-Temperaturverlauf an der Phasenwechselsonden-Rohraußenwand bei einem zyklischen Wärmeentzug (6 Takte á 30 min Entzug/60 min Regeneration, Füllmenge = 8,1 kg) mit: E: Einschalten, A: Ausschalten der Wärmepumpe, P: Poolhöhe im Ruhezustand. (Aus Storch 2015)

Temperaturmesskabels zur Sonde und auch durch die Zementation bzw. mit dem geologischen Schichtenaufbau zu erklären. Aus dem Temperaturverlauf können u. a. die Vorgänge beim Start mit der zeitabhängigen Filmausbreitung vom Sondenkopf bis hinunter zum Sondenpool (Dauer ca. $\geq$ 12–14 min, ist füllstandsabhängig, Abschn. 13.4.5), sowie die Poolaktivität erkannt werden. Der Pool liefert somit stets direkt mit dem Wärmeentzugsstart über die gesamte Wärmeentzugszeit aktiv einen Beitrag zum Wärmeentzug und folglich zum umlaufenden Kältemittelmassenstrom. Weiterhin wird dabei deutlich, dass der Flüssigkeitsfilm bei jedem neu gestarteten Wärmeentzug mit einer entsprechend ähnlichen Verzögerung tiefere Sondenbereiche bis hin zum Pool erreicht, weshalb die zyklischen Wärmeentzugszeiten nicht zu kurz gewählt werden sollten, um die gesamte Sondenlänge für den Wärmeentzug nutzen zu können (Storch et al. 2015; Storch 2015).

13.4.5 Füllmenge und statische Dampfdrucksäule

Wie bereits erwähnt, befindet sich in Abhängigkeit von der Füllmenge und dem Betriebszustand in einer PWS ein Flüssigkeitspool (Pool) am Sondenboden (vgl. Abschn. 13.2.2). In dem restlichen Sondenraum liegt das Wärmeträgermedium (Kältemittel) im dampfförmigen Zustand mit einem Sattdampfdruck (p_{sat}) und einer -temperatur (T_{sat}) vor, Stoffwerte siehe u. a. VDI-Wärmeatlas (2006). Dieses sich im Gleichgewicht befindliche System reagiert dabei im Betrieb sowohl sehr sensitiv auf Temperaturänderungen als auch auf zu geringe Poolfüllhöhen, siehe Storch (2015).

Die statische Dampfdrucksäule bewirkt einen Druckanstieg mit zunehmender Tiefe, wodurch die Verdampfungstemperatur (T_{sat}) ebenfalls ansteigt. Somit sinkt in Abhängigkeit des eingesetzten Kältemittels die treibende Temperaturdifferenz zwischen Kondensatfilm und Erdreich mit steigender Tiefe. Gegenüber Flüssigkeitszirkulationssonden ist dieses geringe Absinken der treibenden Temperaturdifferenz jedoch vernachlässigbar und führt z. B. für eine CO_2-Dampfsäule zu einem aus dem Druck resultierenden Temperaturanstieg von 0,015 K/m, siehe Rieberer (2005). Die in der Dampfsäule gespeicherte Wärmemenge im Ruhezustand ist dabei wiederum abhängig vom eingesetzten Kältemittel und ist z. B. für CO_2 gegenüber Propan, aufgrund einer höheren Dampfdichte und Verdampfungsenthalpie, um den Faktor von ca. 5,8 größer (Randbedingung: gleiche PWS-Konfiguration, Kondensationstemperatur $\sim$ 5°C) (Storch 2015).

Für Thermosiphons wurde der Füllgrad in der Literatur sehr umfangreich vor allem mit dessen Einfluss auf die kritische Wärmestromdichte betrachtet, wobei als Hauptkriterium für einen optimalen Füllgrad der Wärmeübergang betrachtet wird. Dieser ist dabei in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte bei der Filmverdampfung deutlich größer als im Flüssigkeitspool durch Oberflächenverdampfung (nat. Konvektion) bzw. Blasen-, Behältersieden. Des Weiteren steigt der Druck im Flüssigkeitspool mit steigender Füllmenge (hydrostatische Säule), wodurch die treibende Temperaturdifferenz unter Umständen nicht mehr für das Blasensieden ausreicht. Daraus folgt, dass die Füllhöhe (Pool) im Betrieb zu minimieren ist (Unk 1989).

In der Literatur sind für geothermische Phasenwechselsonden nur wenige Angaben zur optimalen Füllmenge zu finden, wobei nach Grüniger und Wellig (2009) für CO_2-gefüllte PWS jedoch mindestens eine geringe Poolhöhe als Puffer zum Ausgleich von Druckschwankungen beim Betrieb zu berücksichtigen ist.

Simulationen zu CO_2-PWS mit der Annahme, dass bei einer *Unterfüllung* im Betrieb kein Flüssigkeitspool mehr vorhanden ist, weisen einen deutlichen Abfall des Sondendrucks aus, wodurch der herabrieselnde Flüssigkeitsfilm im oberen Sondenbereich bereits vollständig verdampft. Hierdurch würde nicht die gesamte Verdampferlänge genutzt und somit der obere Bereich des Erdreichs übermäßig ausgekühlt (Grüniger und Wellig 2009).

Eine geringe Überfüllung (Ausbildung eines Flüssigkeitspools) wiederum führt zu keiner negativen Beeinträchtigung des Sondendrucks (Rieberer et al. 2005). Diese Aussagen werden durch experimentelle Ergebnisse u. a. mit visuellen Beobachtungen im Inneren einer propangefüllten Phasenwechselsonde durch Storch (2015) und Grab (2015) (vgl. Abschn. 13.3.2) bestätigt.

Für die Untersuchungen wurden für eine 91,5 m tiefe PWS ausgehend von einer empirisch ermittelten funktionalen Füllmenge ($\sim$ 89g / $m_{Sondenlänge}$) 8,1 kg Propan (= 100 %) eingefüllt, wobei sich bei einer Sondenfußtemperatur von 9 °C ca. 32,3 Massen-% der Füllmenge in Dampfform (Poolfüllung $\sim$ 5,5 kg $\rightarrow$ Poolhöhe $\sim$ 4,8 m) befinden.

Die Untersuchungen wurden ausgehend von der „Standartfüllmenge“ (100 %) mit schrittweise abgesenkten Füllmengen ($\rightarrow$ 6,0 kg/h (74 %) $\rightarrow$ 4,5 kg/h (55 %) $\rightarrow$ 4,0 kg/h (49 %) $\rightarrow$ 3,6 kg/h (44 %, kein nennenswerter Sumpf mehr)) durchgeführt, wobei einerseits die physikalischen Sondenparameter Sondendruck und Sattdampftemperatur (Abb. 13.12) und andererseits der zeitabhängig am Sondenkopf aufgegebene Kältemittel-Massenstrom und die Filmausbreitung vom Sondenkopf hinab zum unteren Sondenende (mit Start des Wärmeentzuges, Abb. 13.13) wesentliche Beeinflussungen aufwiesen. Letzteres führt wiederum zu einem starken Einfluss auf die sondennahe Untergrundtemperatur und wurde bisher in der Literatur noch nicht berücksichtigt.

Die in Abb. 13.12 dargestellten Druckplateaus (A–D) sind folgendermaßen zu erklären: Wie schon in Abschn. 13.4.3 beschrieben, erreicht der aufgegebene Kondensatrieselfilm nach Wärmeentzugsstart eine bestimmte Sondentiefe, ab welcher der Wärmesenke eine ausreichende Wärmemenge zur Verfügung gestellt wird. Folglich stagniert der Sondendruck p_{abs} (und T_{sat}) aufgrund der stetig neuen Benetzung tiefer liegender „warmer“ Rohrflächen, bis der Rieselfilm das untere Sondenende (Pool) benetzt. Durch eine Reduzierung der Füllmenge bis hin zum Verschwinden des Pools kommt es beim Start des Wärmeentzuges zu einer verfrühten, länger andauernden starken Absenkung der Sattdampftemperatur (= Verdampfungstemperatur), was vor allem bei kurzen Betriebszeiten der Wärmepumpen-Sonden-Anordnung (zyklischer Wärmeentzug) einen negativen Einfluss auf die entziehbare Wärmemenge und folglich auf energetische Effizienz haben kann, siehe Kruse et al. (2008), Zorn et al. (2007), Storch (2015).

Die in Abb. 13.13 dargestellte Filmausbreitung wurde aus faseroptischen Temperaturmessungen an der Rohraußenseite der PWS bestimmt. Die mit der Reduzierung der Füllmengen einhergehende, über die PWS-Tiefe größer werdende Filmausbreitungszeit

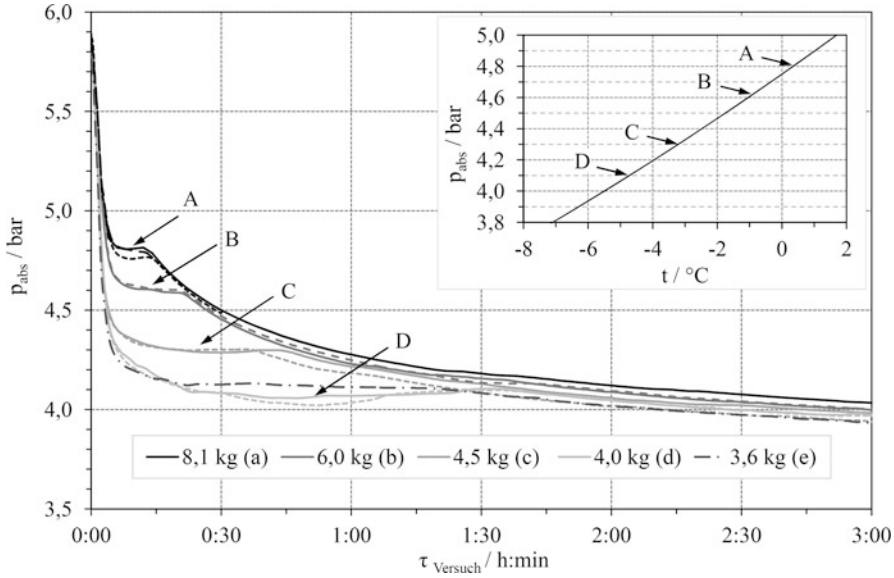


Abb. 13.12 Gegenüberstellung der gemessenen Druckverläufe (Sondenkopf) in Abhängigkeit von der Füllmenge; A–D Druckniveaus unterschiedlicher Füllmenge bei voranschreitendem Film bis zur Filmankunft am unteren Sondenende (Pool); rechts oben: Auszug der Dampfdruckkurve von Propan nach VDI-Wärmeatlas (2006). (Aus Storch 2015)

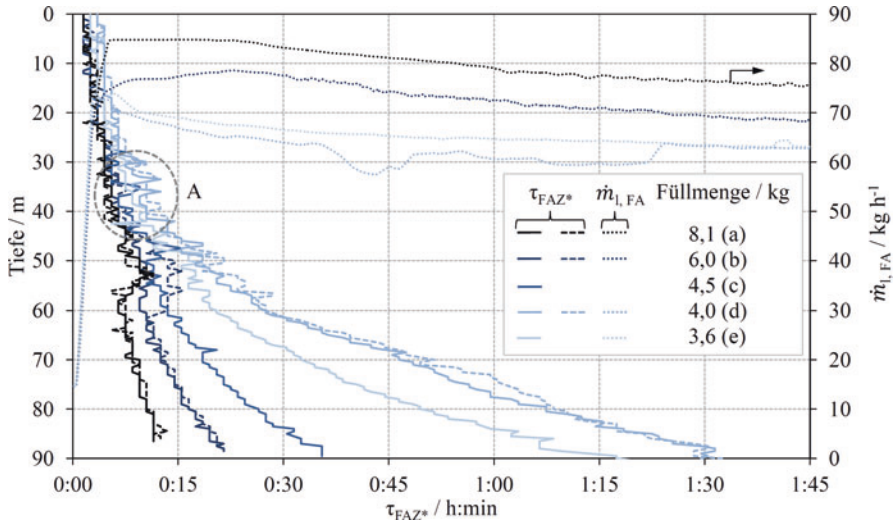


Abb. 13.13 Gegenüberstellung aus faseroptischen Temperaturmessungen ermittelter tiefenabhängiger Filmankunftszeiten (T_{FAZ*})) und der aufgegebenen Kondensatmassenströme ($m_{l,FA}$) für unterschiedliche PWS-Füllmengen (3,6–8,1 kg); * ... reale Filmankunftszeit (FAZ) ca. 2 min früher. (Aus Storch 2015)

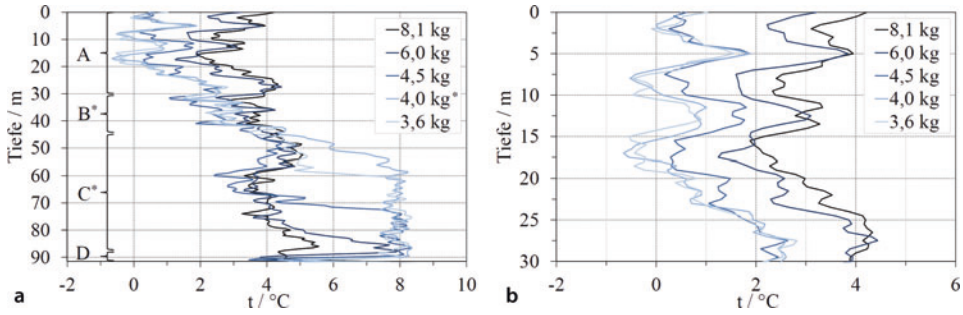


Abb. 13.14 Temperaturverläufe an Sondenaußenwand nach 20 min Wärmeentzugszeit (faseroptische Temperaturmessung) bei variierter Füllmenge, **a** gesamte Sondentiefe mit D = Flüssigkeitspool, **b** gezoomter oberer Abschnitt (A). (Aus Storch 2015)

(τ_{FAZ^*}; max. zeitlicher Versatz am Pool ca. das 6–7fache gegenüber Füllmenge von 8,1 kg) ist dabei folgendermaßen zu erklären: Beim Startprozess mit verminderter Füllmenge verringert sich beim Flüssigkeitspool einerseits die gespeicherte Wärmemenge und andererseits die wärmeübertragende Wandfläche, wodurch der Pool beim Start des Wärmeentzuges ebenfalls nur einen verminderten Dampfmassenstrom (d. h. geringere Wärmemenge) bereitstellt. Damit verzögert sich die Kondensatfilmaufgabe, das Kondensat wird stärker unterkühlt und der umlaufende Massenstrom zur Erstbenetzung der PWS-Rohrflächen verringert (z. B.: $\dot{m}_{l,FA}(4\,\text{kg}) \sim 0{,}78\ \dot{m}_{l,FA}(8{,}1\,\text{kg})$). Bei konstanter Wärmeanforderung durch den Verbraucher (Wärmesenke – mobiler Verdichter) kommt es folglich zu einer weiteren Druckabsenkung in der PWS und zur Erhöhung der treibenden Temperaturdifferenz zwischen warmer unbenetzter Rohroberfläche und tiefer Sattdampf- und Kondensationstemperatur. Aufgrund dieser an der untersten Rieselfilmfront vorliegenden hohen Temperaturdifferenz bei der Erstbenetzung durch den Rieselfilm steht eine größere Wärmemenge zur Verdampfung des an dieser Stelle geringen Filmmassenstromes zur Verfügung. Dies bremst das weitere Voranschreiten des Rieselfilmes deutlich ab (Bereich A in Abb. 13.13), da erst die neu benetzte Rohrwandfläche auf das Temperaturniveau der darüber liegenden, zeitlich länger benetzten Wandflächen abgekühlt wird. Diese stärkere Auskühlung der Phasenwechselsonde und speziell der oberen PWS-Bereiche, die ebenfalls aus der in Abb. 13.12 dargestellten Druckabsenkung gefolgert werden können, wurden auch mit dem faseroptischen Temperaturmesskabel an der PWS-Außenwand detektiert (vgl. Abb. 13.14) und unterstützen folglich die getroffenen Aussagen.

Zu den bisher vorgestellten Einflüssen durch eine variierte Füllmenge ist der Einfluss auf die interne Regeneration (Eigenzirkulation mit vertikaler Temperaturangleichung) noch zu berücksichtigten, siehe Abschn. 13.4.6.

13.4.6 Sondeninterne Regeneration

Bei geothermischen Wärmeentzugssystemen stellt die Regeneration der Untergrundtemperatur (Anstieg der Gesteinstemperatur nach dem Wärmeentzug) ein wichtiges

Auslegungskriterium für eine nachhaltige Betriebsweise dar. Dabei spielen verschiedene thermophysikalische als auch materialspezifische Parameter (Wärmeleitfähigkeit (λ); spez. Wärmekapzität (c_p); Dichte (ρ) etc.) u. a. des Erdreiches, des Bohrlochs und der Geothermiesonde eine wichtige Rolle. Bei geothermischen Phasenwechselsonden existiert nach Storch (2015) mit der „internen Zirkulation“ ein zusätzlicher positiver Einflussfaktor. Eine eigenständige „interne Zirkulation“ des Arbeitsmittels innerhalb der PWS ohne äußere Einflüsse führt zu einem vertikalen Wärmetransport, von Regionen höherer Temperatur hin zu Bereichen niedrigerer Temperatur, und führt folglich zu einer beschleunigten Angleichung und Anhebung der Untergrundtemperaturen nach jedem beendetem Wärmeentzug. Grüniger und Wellig (2009), Wellig und Grüniger (2010) und Storch (2015) nennen hierzu eine mit der vertikalen Temperaturangleichung theoretisch einhergehenden Steigerung der Gesamtanlageneffizienz und eine Maximierung der dem Untergrund entziehbaren Wärme als theoretische Vorteile dieser Zirkulationsprozesse.

Wie schon in Abschn. 13.4.3 beschrieben, ist die Kenntnis über die notwendige Regenerationszeit (instationäres Problem) für eine nachhaltige Nutzung des Untergrundes als Wärmequelle wichtig. Zur Bestimmung der Regenerationszeit von Phasenwechselsonden zeigt Storch (2015), dass sowohl aus dem Druckanstieg am Sondenkopf als auch aus kontinuierlichen entlang der Sondenaußenwand durchgeführten Temperaturmessung (z. B.: faseroptische Temperaturmessung, vgl. u. a. Abschn. 13.4.4) standortspezifisch die notwendige Sondenregenerationszeit bestimmt werden kann. Auszugsweise sind in Abb. 13.15a–d für vier verschiedene zyklische Betriebsregime (Taktversuche: TV $\tau_{Entzug}/\tau_{Regeneration}$ in Minuten; z. B.: TV 15/75) die an der PWS-Rohraußenwand über der Tiefe faseroptisch gemessenen Temperaturen (Abschn. 13.3.2) mit interpoliertem 2D-Temperaturverlauf gezeigt.

Analog zu Abschn. 13.4.4 ist bei jedem Taktversuch die Filmausbreitung mit ansteigender Entzugszeit (τ_{Entzug}) über der Tiefe durch die Änderung der Untergrundtemperatur von rot („warm“) → orange → gelb → grün → blau („kalt“) ebenso gut erkennbar wie die Temperaturabsenkung in Poolnähe durch dessen sofortige und andauernde Wärmebereitstellung. Es zeigt sich außerdem, dass sehr kurze Entzugszeiten (wie z. B. TV 15/75, Abb. 13.15a) aufgrund der sondenspezifisch verzögerten Filmankunft (hier ~12–14 min) für eine reale Anwendung von PWS nicht sinnvoll sind, da hiermit nicht die gesamte PWS-Länge zur Wärmebereitstellung beitragen würde.

Mit Beendigung des Wärmeentzugs sind über die Sondentiefe unterschiedliche Temperaturabsenkungen detektierbar. Dabei fungieren Flächen mit den tiefsten Temperaturen als Kondensationsflächen und Flächen mit höheren Temperaturen als Verdampfungsflächen (sofern die Fläche benetzt ist). Bei der Kondensation wird der Wandfläche Wärme zu- und bei der Verdampfung abgeführt. Mit zunehmender Regenerationszeit steigen die detektierten rohraußenwandnahen Temperaturen erst zügig und anschließend mit einem asymptotischen Verlauf hin zur Ruhetemperatur an, wobei einzelne Temperaturminima in größeren Tiefen (Kondensationsbereiche) bestehen bleiben, vgl. Abb. 13.16b, c.

Anhand der Temperaturverläufe lässt sich weiterhin die Aussage ableiten, dass für die vermessene Anlagenkonfiguration die betrachteten Regenerationszeiten noch nicht

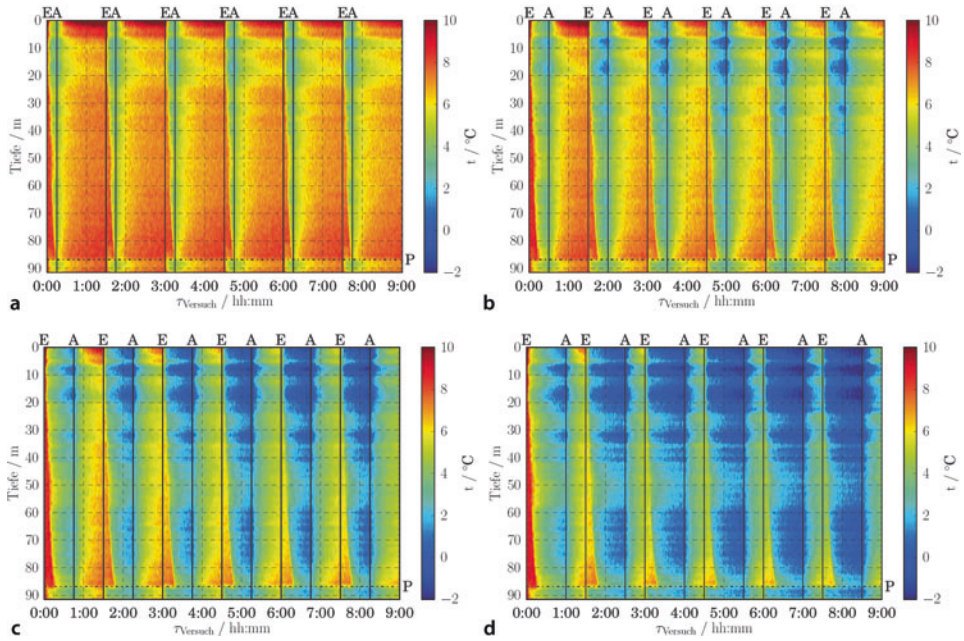


Abb. 13.15 Interpolierter 2D-Temperaturverlauf (faseroptische Temperaturmessung) bei zyklischem Wärmeentzug (6 Takte, TV $T_{Entzug}/T_{Regeneration}$): **a** TV 15/75; **b** TV 30/60; **c** TV 45/45 (mit $t_{min} = -2, 3°C$); **d** TV 60/30 (mit $t_{min} = -3, 1\,°C$); E: Einschalten, A: Ausschalten der Wärmepumpe, P: Pool im Ruhezustand. (Aus Storch 2015)

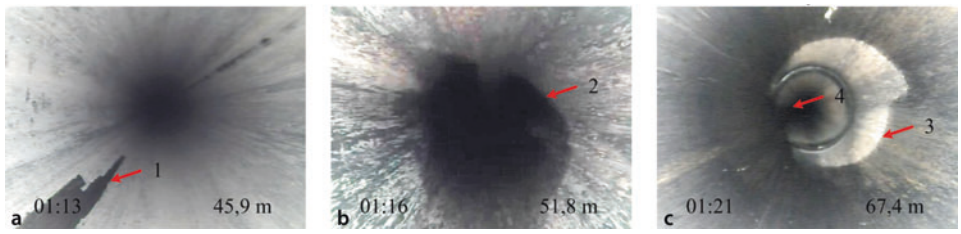


Abb. 13.16 Sich veränderte Benetzung der PWS-Rohrwand während der Regeneration nach einem beendeten Wärmeentzug von 192 h (T_{Reg} in h:min). (Aus Storch 2015)

ausreichten, da das ursprüngliche Temperaturlevel nicht erreicht wird. Allgemeingültig kann gesagt werden, dass die Regenerationszeiten einem Vielfachen der Entzugszeit entsprechen. Für Phasenwechselsonden zeigte sich hier zusätzlich noch ein deutlicher Zusammenhang mit der Füllmenge. D. h. bei geringer Füllmenge stieg die Regenerationszeit stark von dem 2fachen zum 3fachen der Entzugszeit an, da keine zusätzliche Wärmequelle wie der Flüssigkeitspool während der Regeneration zur Verfügung stand.

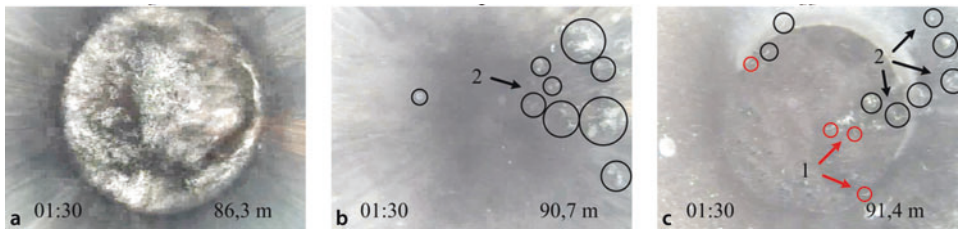


Abb. 13.17 Poolaktivität an der Oberfläche, im Pool und am Poolboden während der Regeneration nach einem beendeten Wärmeentzug von 192 h (T_{Reg} in h:min), Siedekeime in „roten" und aufsteigende Blasen in „schwarzen" Kreisen. (Aus Storch 2015)

Aus allen vier Darstellungen ist außerdem ersichtlich, dass sich der Flüssigkeitspool gegenüber der restlichen PWS mit am langsamsten erwärmt, was mit einer stetigen Auskühlung durch Verdampfungsprozesse zur Wärmebereitstellung erklärt werden kann. Der Flüssigkeitspool weist eine gegenüber dem PWS-Betrieb verminderte Siedeaktivität auf, siehe Abb. 13.17. Als Entstehungsort der für die wellige Oberfläche verantwortlichen Dampfblasen (Abb. 13.17a) wurden einzelne Ablagerungen am Sondenboden als Siedekeime detektiert (Abb. 13.17c, Markierung 1).

Durch die fortwährende Kondensation des Dampfes im oberen Bereich der PWS kommt es zur Bildung eines dünnen langsam in Richtung PWS-Boden abfließenden Rieselfilmes (Abb. 13.16a, Markierung 1), der wärmere trockene Wandflächen benetzt und dabei die Wandflächen teilweise durch Verdampfung wieder auskühlt. Diese Prozesse laufen so lange ab, bis die gesamte Sondenwandfläche unabhängig vom verwendeten Wärmeträger (ausgenommen sehr warme erdoberflächennahe Bereiche) benetzt ist, wodurch beim erneuten Start des Wärmeentzuges die gesamte Wandfläche kurzzeitig zur Wärmebereitstellung beiträgt.

Es ist somit festzuhalten, dass es innerhalb der Phasenwechselsonden eine aktive interne Zirkulation gibt, wobei diese abhängig von der Füllmenge und der resultierenden Flüssigkeitspoolmenge einen wesentlichen Beitrag zur Wärmebereitstellung (Wärmeentzug und Regeneration) liefert.

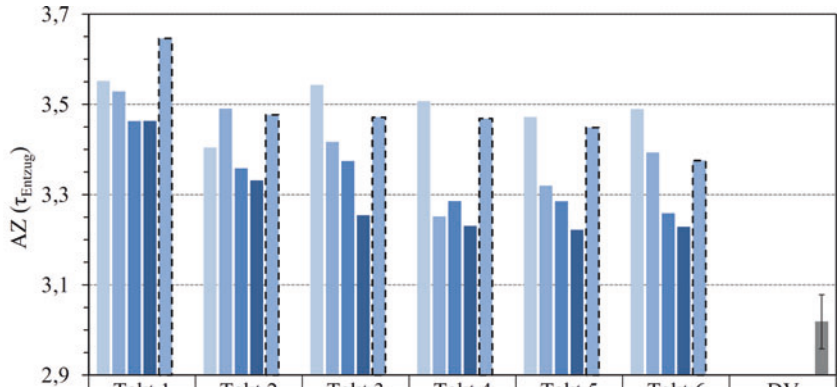
13.4.7 Energetische Betrachtung

Bei Heizungsanlagen liegt ein Hauptaugenmerk auf der Effizienz des Gesamtsystems. Das heißt speziell bei geothermischen Wärmebereitstellungsanlagen wird die Bilanz aus der dem Nutzer zur Verfügung gestellten Wärmemenge (z. B. Heizwärme + Warmwasser) im Verhältnis zur eingesetzten Endenergie (elektrischer Strom) über einen definierten Bilanzzeitraum als Arbeitszahl (AZ) betrachtet. Hierbei resultieren aus der in der Praxis üblichen, periodischen Wärmeanforderung ein zyklischer Wärmeentzug, vgl. Abschn. 13.4.3 und 13.4.6. Die Arbeitszahlen von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen wurden u. a. von Erb et al. (2004) und Miara et al. (2011) in umfangreichen Feldstudien bestimmt. Die Studien

nennen vor allem einzelne Installationsmängel (Hydraulik; 3-Wege-Ventile), bzw. falsche Anlageneinstellungen (zu hohe Heizkurven) als Hauptgründe für niedrige Arbeitszahlen (AZ < 3). Luft-Wärmepumpen schnitten nach Miara et al. (2011) im jährlich gemittelten Monatsdurchschnitt mit ca. 2,9 gegenüber erdreichgekoppelten Wärmepumpen mit 3,8–4,1 deutlich schlechter ab. Erdreich-Sondensysteme wiesen wiederum geringfügig höhere Arbeitszahlen als die Flächenkollektoren auf, was aber sehr standortabhängig ist.

Für Phasenwechselsonden zeigte Storch (2015) in Versuchen mit unterschiedlichen Wärmeentzugs-/Regenerationsverhältnissen (1:5 bis 2:1) grundlegende Effekte auf die Untergrundtemperatur und Regeneration, vgl. Abschn. 13.4.6. Mit der Bestimmung einer taktspezifischen Arbeitszahl sind Einflüsse einer steigenden Entzugszeit, respektive einer sinkenden Regenerationszeit bei gleichbleibender Taktlänge (1,5 h), deutlich erkennbar, siehe Abb. 13.18. Aus den Untersuchungen sind u. a. folgende Schlüsse abzuleiten:

- mit steigender Entzugszeit sinkt die Arbeitszahl je Takt,
- in Abhängigkeit von der Regenerationszeit sinkt mit steigender Takt-/Zyklusanzahl die Arbeitszahl,
- eine Verlängerung eines Gesamtzyklus bzw. der Taktlänge (z. B. auf 2,5 h) wirkt sich positiv auf die Anlageneffizienz aus, da ansonsten mit zu kurzen Entzugszeiten ein Teil der PWS-Länge nicht zur Wärmebereitstellung genutzt wird.
- Gegenüber einem gleichlangen dauerhaften Wärmeentzug ist ein zyklischer Wärmeentzug, aufgrund der zwischenzeitlichen Regeneration, in PWS zu empfehlen, vgl. Abb. 13.19.



	Takt 1	Takt 2	Takt 3	Takt 4	Takt 5	Takt 6	DV
TV 15/75	3,55	3,40	3,54	3,51	3,47	3,49	
TV 30/60	3,53	3,49	3,42	3,25	3,32	3,39	
TV 45/45	3,46	3,36	3,37	3,29	3,29	3,26	
TV 60/30	3,46	3,33	3,25	3,23	3,22	3,23	
TV 30/120	3,65	3,48	3,47	3,47	3,45	3,38	
DV (8,1 kg)							3,02

Abb. 13.18 Energetischer Vergleich anhand der entzugszeitabhängigen Arbeitszahlen (AZ) bei zyklischem Wärmeentzug (TV, T_{Entzug} : $T_{Regeneration}$ = 1 : 5, 1:2, 1:1, 2:1 (T_{Takt} = 1, 5h), 1:4 (T_{Takt} = 2, 5h)) und dauerhaftem Wärmeentzug (DV, $T_{Entzug} \geq 24$ h). (Aus Storch 2015)

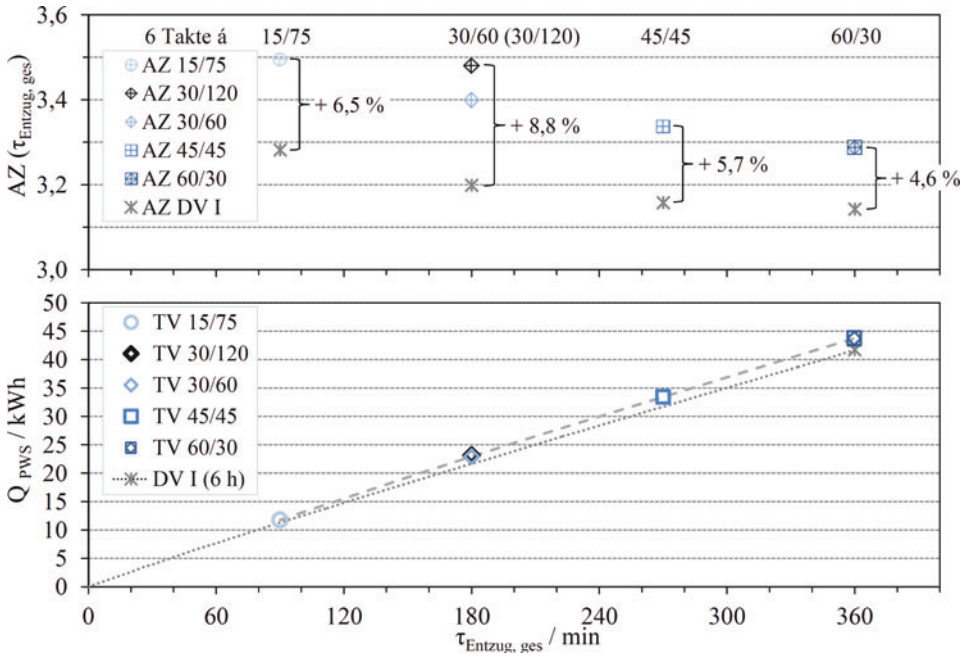


Abb. 13.19 Vergleich der über die gesamte Entzugszeit ($T_{Entzug,ges}$) erzielten Arbeitszahlen (AZ) und die durch die PWS bereitgestellte Wärmemenge (Q_{PWS}) bei zyklischem Wärmeentzug (TV, T_{Entzug} : $T_{Regeneration}$ = 1 : 5,1:2, 1:1, 2:1 (T_{Takt} = 1,5 h), 1:4 (T_{Takt} = 2,5 h)) und dauerhaftem Wärmeentzug (DV, T_{Entzug} = 6 h). (Aus Storch 2015)

Für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen zyklischem und dauerhaftem Wärmeentzug sind in Abb. 13.19 (unteres Diagramm) die aus einer geothermischen PWS entzogene Wärmemenge (Q_{PWS}) über alle Takte (nur die Entzugszeiten) bzw. über den äquivalenten Zeitraum eines Dauerversuches (DV) aufsummiert und gegenübergestellt. Darin ist gegenüber dem zyklischen Wärmentzug eine Tendenz einer abnehmenden entzogenen Wärmemenge pro Zeit im Zuge des instationären Wärmeentzugsprozesses aus dem umgebenden Erdreich für den dauerhaften Wärmeentzug ersichtlich. Die resultierenden Arbeitszahlen in Abb. 13.19 (oberes Diagramm) weisen folglich für die zyklischen Betriebsweisen eine um 4,6–8,8 % höhere Arbeitszahl als der Dauerwärmeentzug zu diesem Zeitpunkt auf. Auch hier ist mit steigender Entzugs- und abnehmender Regenerationszeit (für Taktzeit, Takt = 1,5 h) ein Absinken der Arbeitszahl (AZ) zu verzeichnen. Daraus kann somit für einen zyklischen Wärmeentzug ein wesentlicher Einfluss einer zwischenzeitlichen Regenerationszeit infolge der nachgewiesenen aktiven, internen Zirkulation zum vertikalen Temperaturausgleich geschlussfolgert werden.

Der Anstieg der Arbeitszahl bzw. der Gesamtwärmemenge erscheint im ersten Anblick nicht übermäßig groß zu sein, jedoch ist der Betrieb einer Heizungsanlage mit geothermischen Sonden als Wärmequelle über einen größeren Zeitraum von mind. 25 Jahren

zu berücksichtigen. Es kann daher angenommen werden, dass diese teilweise geringen Steigerungen zu einer wesentlich verbesserten Anlageneffizienz, einer schnelleren Anlagenamortisation, zu einer höheren Untergrundtemperatur und folglich zu einer längeren Nutzungsdauer führen werden.

Aufgrund des in Abschn. 13.4.6 dargestellten zusätzlichen positiven Effekts der internen Zirkulation (eigenständige Regeneration der Sonde) ist, aufbauend auf den Aussagen von Peterlunger et al. (2004), Ochsner (2008) und Grüniger und Wellig (2009), eine deutlich gesteigerte Anlageneffizienz gegenüber Flüssigkeitszirkulationssonden zu erwarten.

Eine zu geringe Befüllung der geothermischen Phasenwechselsonde führt zu einer in Abschn. 13.4.5 beschriebenen verzögerten Filmausbreitung über die PWS-Tiefe und einer daraus resultierenden tieferen anfänglichen Auskühlung der obersten die Sonde umgebenden Gesteinsbereiche. Damit geht eine Temperaturabsenkung des Kältemittelkondensates und -dampfes im Wärmepumpenkreislauf einher. Daraus schlussfolgert Storch (2015), dass der bei jedem Takt stets neu aufgegebene Kondensatfilm mit annähernd gleichbleibender zeitlicher Verzögerung die Geothermiesonde benetzt und folglich die Arbeitszahlen je Takt bei zyklischer Betriebsweise deutlich sinken müssten.

13.4.8 Simulationen zum Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom

Anhand visueller Benetzungsuntersuchungen (vgl. Abschn. 13.3.2) in einer realen Phasenwechselsonde (PWS) konnten unvollständig benetzte Teile der Sondenoberflächen ermittelt werden (Storch 2015; Grab 2015). Besonders in den tiefen und somit wärmeren Erdschichten sank der Benetzungsgrad bis auf $B \leq 30\,\%$. Die Verbesserung der Filmverteilung birgt ein Potential, die bestehenden Vorteile dieser Technik gegenüber herkömmlichen Solesonden noch weiter auszubauen. Um den Einfluss des Benetzungsgrades (B) besser verstehen zu können, wurden Simulationen zur entziehbaren Wärmemenge in Abhängigkeit vom Benetzungsgrad u. a. von Hartmann et al. (2015), Hantsch und Gross (2013) sowie Grab (2015) für die Geometrie- und Stoffparameter einer Forschungs-PWS durchgeführt. Abb. 13.20 zeigt die summierte Wärmemenge einer Stahlrohr-PWS in Abhängigkeit vom Benetzungsgrad und der Wärmeentzugszeit.

Gegenüber 100 % Benetzung ergibt sich nach 15 min Entzugszeit bei 20 % Benetzungsgrad eine mit 67,2 % deutlich geringere Wärmemenge. Der Unterschied in der entzogenen Wärmemenge zwischen 100 % und 80 % Benetzungsgrad ist dagegen nur sehr gering. Anhand der Simulation lässt sich erkennen, dass der Benetzungsgrad möglichst größer 60 % sein sollte, um mit weniger als 10 % Verlust gegenüber Vollbenetzung zu rechnen. Eine Verringerung der Entzugsleistung um 10 % geht jedoch mit einer deutlichen Verringerung der Leistungsfähigkeit einher. Für die untersuchte PWS ergibt sich bei mittlerem Benetzungsgrad von 50 % ein Verlust von ca. 15 %. Bis zu einer Tiefe von 91,5 m verringert sich der Benetzungsgrad auf nur noch ca. 20 %, was in diesem Bereich auf einen Verlust von ca. 33 % schließen lässt. Mit zunehmender Wärmeentzugszeit nimmt der Einfluss des

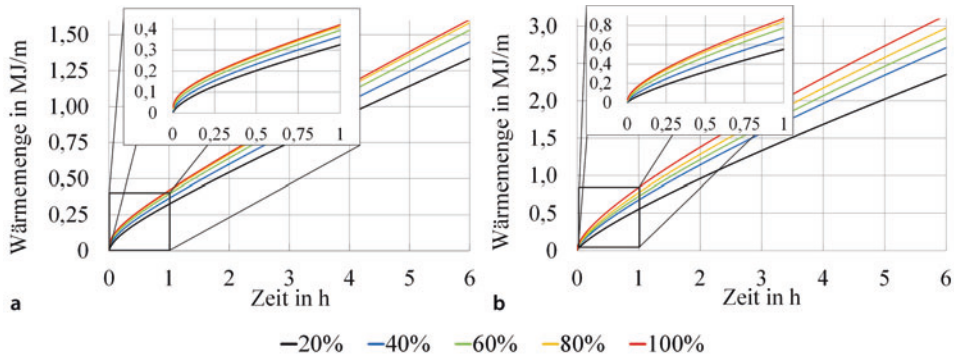


Abb. 13.20 Summierte Wärmemenge in Abhängigkeit vom Benetzungsgrad ($20\,\% \leq B \leq 100\,\%$) und der Wärmeentzugszeit bei konstanter Propanfilmtemperatur von 0 °C ($\lambda_{Rohr} = 30\,W/mK$, $\lambda_{Gestein} = 2,8\,W/mK$, **a** $\lambda_{Zementierung} = 0,79\,W/mK$, **b** $\lambda_{Zementierung} = 2,8\,W/mK$). Die gewählten Stoff- und Geometrieparameter entsprechen den Gegebenheiten an der untersuchten PWS (vgl. Abschn. 13.3.2). (Nach Grab 2015)

Benetzungsgrades ab und der Einfluss der Zementierung und des Sondenmaterials zu. Als Sondenmaterial wurden Stahl- sowie Kunststoffrohre mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten verglichen. Kunststoffsondenrohre (z. B. aus Polyamid) sind preiswerter sowie einfacher in der Installation, weisen jedoch eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit als Metallrohre auf. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Geometrie der Rohre konstant gehalten.

Weitere Simulationen zeigen, dass der Wärmeentzug bei Vollbenetzung bei Rohren mit einer Wärmeleitfähigkeit zwischen 15 W/mK und 70 W/mK annähernd identisch ist. Wird die Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials deutlich auf zum Beispiel 1 W/mK verringert, können im Vergleich dazu innerhalb von 3 h nur noch 85 % Wärme entzogen werden. Noch gravierender wird der Wärmeentzug bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/mK vermindert. Den größten Widerstand für den Wärmetransport stellt jedoch die Zementierung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,79 W/mK (gemessen an der Forschungssonde) dar, welche verglichen mit üblichen Materialien ($\lambda_{fm} \approx 2\,W/mK$) eher gering ist. Daraus ergibt sich auch der geringere Einfluss des Benetzungsgrades auf den Wärmeentzug bei Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Der Wärmetransport in der Rohrwandung erfolgt schneller, als Wärme durch die „dämmende“ Zementierung nachießen kann.

Daraus lässt sich weiterhin erklären, warum die Änderung des Wärmeentzuges bei einem Benetzungsgrad von 60 % verglichen mit 100 % nur sehr gering ist. Abb. 13.20b zeigt des Weiteren die summierte Wärmemenge, welche bei einer Zementierung mit $\lambda_{Zementierung} = 2,8\,W/mK$ entzogen werden könnte. Ein Vergleich des Wärmeentzuges nach 15 min bei z. B. B = 50 % und B = 20 % lässt erkennen, dass der Benetzungsgrad einen größeren Einfluss hat als in Abb. 13.20a mit $\lambda_{Zementierung} = 0,79\,W/mK$. Im Vergleich zu einer Vollbenetzung können dann nur noch 77 % bzw. 53 % der maximalen Wärme entzogen werden (Grab 2015).

Tab. 13.4 Entzogene Wärmemenge (%) bei unterschiedlichen Benetzungsgraden (B) und Rohrmaterialien (St: Stahl, PA: Polyamid) im Vergleich zur maximalen Wärmemenge (St-30, 12 h entspricht 100 %) bei Vollbenetzung (B = 100 %) und einem Dauerwärmeentzug über 12 h. 1 h entspricht einem zyklischen Wärmentzug mit 1 h Entzug und 1 h Regeneration im Wechsel für eine Gesamtdauer von 12 h (6 Zyklen). (Nach Grab 2015)

	St-30		PA-1,0		PA-0,2	
B in %	**12h**	**1h**	**12h**	**1h**	**12h**	**1h**
100	**100**	73,1	86,6	59,7	55,9	34,5
80	97,6	70,7	86,6	55,4	52,3	34,5
60	92,0	65,3	81,8	49,0	47,9	31,8
40	83,7	57,7	74,2	42,1	43,4	28,7
20	73,1	48,2	65,6	34,7	38,7	22,4

Grün > 75%, Gelb > 50 %, Grau > 25 %, Rot < 25 %

An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass oberflächennahe Geothermieanlagen zur Wärmegewinnung typischerweise nicht im Dauerbetrieb arbeiten, sondern in Zyklen aus Wärmeentzug und Regeneration betrieben werden. Tab. 13.4 stellt daher Ergebnisse für 12 h Dauerentzug und einem zyklischen Wärmeentzug (1 h Wärmeentzug, 1 h Regeneration) über 12 h in Abhängigkeit vom Benetzungsgrad und der Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials dar.

Verallgemeinernd lässt sich für geothermische Phasenwechselsonden festhalten, dass mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit sowohl des Sonden- als auch des Zementierungsmaterials allgemein mehr Wärme entzogen werden kann und zusätzlich der Einfluss des Benetzungsgrades auf den Wärmeentzug zunimmt. Bei einer geringen Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials (0,2 W/mK) und der Zementierung (0,79 W/mK) wird der Wärmestrom bei Erhöhung des Benetzungsgrades von 20 % auf 100 % nur um 29 % (nach 1 h Dauerentzug) verbessert.

Im Vergleich dazu kann bei hoher Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials (30 W/mK) und der Zementierung (2,8 W/mK) eine Verbesserung von 51,7 % erreicht werden. Mit zunehmender Entzugsdauer nimmt dieser Einfluss allerdings ab. Je länger das Erdreich ausgekühlt wird, desto geringer ist der Einfluss des Benetzungsgrades und umso größer ist der Einfluss des Zementier- und Sondenmaterials. Dies ist besonders bei zyklischem Wärmeentzug mit Regenerationsphasen zu beachten, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht wurde.

Die Verwendung von Kunststoffrohre anstelle von Metallrohren bewirkt einen deutlich geringeren Wärmestrom aus dem Erdreich und ist somit nicht zu empfehlen. Da üblicherweise Metallrohre zum Einsatz kommen und der Trend zur Verwendung von thermisch verbessertem Zement zunimmt, kann eine weitere Leistungssteigerung von geothermischen Phasenwechselsonden nur durch Erhöhung des Benetzungsgrades erfolgen. Die höhere Leistungsfähigkeit dieser Technologie gegenüber den weitverbreiteten Flüssigkeitszirkulationssonden kann dadurch noch weiter ausgebaut werden (Grab 2015).

13.5 Schlussbemerkung und Ausblick

Geothermische Phasenwechselsonden stellen ein sehr effizientes System zum Wärmeentzug aus dem Erdreich dar, wobei gegenüber Flüssigkeitszirkulationssystemen große Vorteile bestehen. Ähnlich zu allen anderen Wärmeentzugssystemen sind aber auch hier sowohl die thermophysikalischen als auch die materialspezifischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität, Dichte etc.) u. a. des Erdreiches, des Zementes und der Geothermiesonde wichtige zu berücksichtigende Einflussgrößen. In diesem Beitrag wurden darüber hinaus die für Phasenwechselsonden spezifischen Einflussgrößen Füllmenge, maximal entziehbare Wärmemenge und der Einfluss einer Regeneration des Untergrundes ohne Wärmeentzug vorgestellt. Hierbei wurden vor allem die Notwendigkeit und der Einfluss eines Flüssigkeitspools für die ablaufenden Prozesse (Start- und Regenerationsphase, Filmausbreitung) gezeigt. Die Filmausbreitung ist vor allem bei zyklischen Betriebsweisen, wie sie in der praxisnahen Wärmeanforderung von Gebäuden vorkommen, relevant und ist bei der Einstellung der Wärmepumpenanlagen zu berücksichtigen. Weiterhin wurde mithilfe von Untergrundtemperaturverläufen in Kombination mit energetischen Betrachtungen der Einfluss von zyklischen Betriebsweisen hinsichtlich Wärmeentzugs- zu Regenerationszeiten dargestellt.

Ein gegenüber anderen Wärmeentzugssystemen vorteilhaftes Phänomen stellt die selbsttätige interne Zirkulation dar. Diese führt zu einem vertikalen Wärmetransport im Ruhezustand und somit zu einer beschleunigten Temperaturanhebung des ausgekühlten Untergrundes in der Regenerationsphase.

Allgemein ist zur Maximierung der Effizienz von geothermischen Anlagen eine genaue Vorauswahl der Anlagenkomponenten hinsichtlich Verdichterkälteleistung und Leitungsquerschnitten wichtig. Speziell für geothermische Phasenwechselsonden ist ein Einsatz einer drallinduzierenden Filmaufgabevorrichtung (maximale Benetzung) mit möglichst geringer Rohrquerschnittsverengung zu empfehlen, um die Gefahr der Flutpunktüberschreitung (Flüssigkeitsaustrag) zu verhindern. Im Vergleich zu Flüssigkeitszirkulationssonden sollte dabei das Hauptaugenmerk nicht auf einer Verringerung der Bohrmeter, sondern der größeren Effizienz bei gleicher bzw. größerer Wärmeleistung liegen (Storch 2015).

Eine weitere Effizienzsteigerung kann durch die Maximierung des Benetzungsgrades im Sondeninneren erreicht werden. Aufgrund der genannten Einflüsse wie z. B. Benetzungs- und Wechselwirkungsgrenze oder einer Rohrneigung können Flüssigkeitsrinnsale entstehen. Diesem Phänomen kann durch den Einsatz von Flüssigkeitsverteilern und innenstrukturierten Sondenrohren (besonders im unteren Drittel der Sonde) sowie durch geringe Bohrlochneigungen entgegengewirkt werden. Als ein weiteres denkbares Forschungs- und Anwendungsfeld für geothermische Phasenwechselsonden ist zukünftig der Einsatz in größeren Tiefen denkbar (Gerke et al. 2004). Die derzeit im Test bzw. im Betrieb befindlichen tiefen Erdwärmeanlagen (Dublettensystem oder Flüssigkeitszirkulationssonden) nach dem Flüssigkeitszirkulationsprinzip benötigen einen Großteil der eingesetzten Energie für das Umpumpen der Wärmeträgerflüssigkeit, was bei Thermosiphons durch eine selbstständige Zirkulation ohne zusätzliche Energie erfolgt (Grab 2015).

Literatur

Ahmed, J., Rahman, M. S.: Handbook of food process design. Chichester: Wiley-Blackwell. (2012)
Aviles, M. L.: Experiments on falling film evaporation of a water-ethylene glycol mixture on a surface with longitudinal grooves. Dissertation, TU Berlin (2007)
Berk, Z.: Food process engineering and technology. Second edition (Food science and technoloy Int. series), Academic Press, Amsterdam (2013). ISBN 978-0-12-415923-5
Bjorklund, D., Kersey, D., Mandigo, G. J.; Tiwari, C.: Method for recycling deoiled water using counterflow falling-film evaporators; 2010. Patent number: US 13/323,083. Publishing number: US 20120145386 A1. (2010)
Brendel, T.: Solare Meerwasserentsalzungsanlagen mit mehrstufiger Verdunstung – Betriebsversuche, dynamische Simulation und Optimierung. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (2003)
Brennan, J. G.: Food processing handbook. Wiley-VCH, Weinheim (2006)
Cannaviello, M., Casarosa, C., Latrofa, E., Martorano, L., Reale, F.: Gravity heat pipes as geothermal convectors. In: Reay, D. A. (Hrsg.) Advances in heat pipe technology. 4th Int. Heat Pipe Conf. London. 1 Bd. Oxford: Pergamon Press (IHPC), S. 759–766 (1981)
Cheng, K. C., Zarling, J. P.: Applications of Heat Pipes and Thermosyphons in Cold Regions. In: Vasiliev, L. L. (Hrsg.): Heat pipe technology. Proc. of the 7th Int. Heat Pipe Conf., Bd. 2. 7th Int. Heat Pipe Conf. Minsk, May, 21–25. 2 Bände: Begell House (IHPC), S. 1–32 (1990)
Christmann, J. B. P., Krätz, L. J., Bart, H.-J.: Falling film evaporation with polymeric heat transfer surfaces. New Directions in Desalination **308**(0), 56–62 (2013). http://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.027
Cube, H. L. (Hrsg.): Lehrbuch der Kältetechnik, 4. Aufl. C. F. Müller, Heidelberg (1997)
Darwish, M., Alsairafi, A.: Technical comparison between TVC/MEB and MSF. Desalination **170**(3), 223–239 (2004)
DIN EN 378-1, 2012-08-00: DIN EN 378-1: Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien
Dobriansky, Y.: Concepts of self-acting circulation loops for downward heat transfer (reverse thermosiphons). In: Energy Convers. Manage **52**(1), 414–425 (2011). htttp:/doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.073
Eichinger, S., Grab, T, Storch, T., Gross, U.: Benetzungsverhalten von Fallfilmen in geneigten, strukturierten Rohren. In: Dechema (Hrsg.): Jahrestreffen der Fachgruppen Mehrphasenströmungen und Wärme- und Stoffübertragung. Fulda, 24.–25.03. Processnet (2014)
El-Genk, M. S., Saber, H.: Minimum thickness of a flowing down liquid film on a vertical surface. Int. J. Heat Mass Transfer **44**(15), 2809–2825 (2001)
El-Genk, M. S., Saber, H. H.: Flooding limit in closed, two-phase flow thermosyphons. Int. J. Heat Mass Transfer. **40**(9), 2147–2164 (1997)
El-Genk, M. S., Saber, H. H.: Determination of operation envelopes for closed, two-phase thermosyphons. Int. J. Heat and Mass Transfer. **42**(5), 899–903 (1999)
Erb, M., Hubacher, P., Ehrbar, M.: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996–2003. Schlussbericht, April 2004. Unter Mitarbeit von Brugger, G., Rognon, F., Real, M. (Hrsg.) v. Bundesamt für Energie BFE (Schweiz) (2004)
Esch, D.: Thermal analysis, construction, and monitoring methods for frozen ground. American Society of Civil Engineers, Reston (2004)
Faghri, A.: Heat pipe science and technology. Taylor & Francis, Washington (1995)
Gambaryan-Roisman, T.: Thermocapillary convection and interface deformation in a liquid film within a micro-slot with structured walls. Physics of fluids. **3**, 207–215 (2007)

Gerke, W., Mostofizadeh, C., Schröder, L.: ZIP Geothermie für den Neubau des Alfred-Wegener-Institutes in Bremerhaven. Feldtestanlage einer Tiefen Erdwärmesonde mit Direktverdampfung eines Kältemittels zur Wärme- und Stromerzeugung. Studie – Förderkennzeichen 0327191 (2004)

Grab, T.: Verbesserung der Filmverteilung auf Fallfilmverdampferoberflächen am Beispiel geothermischer Phasenwechselsonden. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg. Shaker Verlag (2015). http://doi.org/10.2370/OND000000000175

Grab, T., Storch, T., Braune, S., Gross, U., Wagner, S.: Performance of a geothermal heat pipe using propane. Heat Pipe Science and Technology **2**, Begell House, 1–4, 43–53, ISSN: 2151–7975, (2011). http://doi.org/10.1615/HeatPipeScieTech.v2.i1-4.60

Grab, T., Storch, T., Eichinger, S., Gross, U.: Wetting behaviour of propane drops on solid materials. In: ASTFE – American Society of Thermal and Fluid Engineers (Hrsg.) Proc. of First Thermal and Fluids Engineering Summer Conf. Thermal Fluids Engineering Addressing Grand Challenges. New York (September 2015)

Grab, T., Storch, T., Wagner, S., Gross, U.: Wechselwirkungen zwischen Heiz- und Kühlkreislauf bei einem geothermischen Direktverdampfer-Sondenfeld. Deutsche Kälte- und Klimatagung, DKV, Magdeburg (2010)

Groll, M.: Wärmerohre als Bauelemente in der Energietechnik. In: W. Fratzscher und K. Stephan (Hrsg.) Abfallenergienutzung. Technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte, S. 82–107. Akademie Verlag, Berlin (1995)

Gross, U. (Hrsg.): Kondensation und Verdampfung im geschlossenen Thermosyphon, Bd. 19/46. Habilitationsschrift: VDI-Verlag (VDI-Fortschrittsberichte), Düsseldorf (1991)

Grüniger, A., Wellig, B.: Schlussbericht CO2-Erdwärmesonde, Phase 2. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK; Bundesamt für Energie BFE (2009)

Häfner, F., Wilsnack, T., Grafe, F., IBeWa; Wagner, S., Kleinitz, W. et al.: DGMK Forschungsbericht 654. Erdwärmegewinnung aus teilverfüllten Produktionssonden, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (2007)

Hainbach, C., Krug, N., Pohlmann, W.: Pohlmann, Taschenbuch der Kältetechnik. Grundlagen, Anwendungen, Arbeitstabellen und Vorschriften, 21. Aufl. VDE-Verl, Berlin (2013)

Hamilton, Ralph A.: Omnidirectional heat pipe am 10.07.1979. Veröffentlichungsnr: US 4160444 (1979)

Hantsch, A., Gross, U.: Numerical investigation of partiallywetted geothermal heat pipe performance. Geothermics, **47**, 97–103 (2013)

Hartley, D. E., Murgatroyd, W.: Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surfaces. Int. J. Heat Mass Transfer. **7**, 1003–1015 (1964)

Hartmann, F., Behrend, R., Hantsch, A., Grab, T., Gross, U.: Numerical investigation of the performance of a partially wetted geothermal thermosyphon at various power demand schemes. Geothermics. **55**, 99–107 (2015). http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.01.014

Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J. U.: Aufreißende Filmströmung auf geneigten Oberflächen. Chemie Ingenieur Technik. **76**(8),1065–1068 (2004)

Imura, H., Ishii, K., Ippohshi, S.: An experimental investigation of geysering in two-phase closed thermosyphons. In: Maezawa, S., Miyazaki, Y. Kaminaga, F. (Hrsg.) Heat Pipe Science and Technology. Proc. of the 11th Int. Heat Pipe Conf., Tokyo, Japan. The Japan Association for Heat Pipes (IHPC), 166–171 (1999)

Joo, S. W., Davis, S. H., Bankoff, S. G.: A mechanism for rivulet formation in heated falling films. J. Fluid. Mech. **321**, 279–298 (1996)

Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A.: Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 4. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (2006)

Kerschbaumer, W., Neuberger, S., Peuker, U., Brenner, Gunther: Rechnergestützte Analyse einer mehrstufigen Fallfilmverdampfungsanlage zur Herstellung von Reinstwasser. Chemie-Ing.-Techn. **80**(7), 919–926 (2008)

Khandekar, S.: Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes. Dissertation. Universität Stuttgart (2004)

Knoblich, K., Aschenbrenner, F., Sanner, B. (Hrsg.): Erdgekoppelte Wärmepumpen. Energetische, hydrologische und geologische Untersuchungen zum Entzug von Wärme aus dem Erdreich an der Forschungsanlage Schöffengrund-Schwalbach und anderen Standorten. Lenz-Verlag (Giessener Geologische Schriften, 49), Giessen (1993)

Kruse, H., Fennekoldt, D., Michalzik, D.: Möglichkeiten der Nutzung von CO2-Erdwärmesonden in der mitteltiefen Geothermie. Forschungsprojekt Nienburg. In: Enerchange (Hrsg.) 4. Norddeutsche Geothermietagung. Geothermie – durch Innovation zur Wirtschaftlichkeit, Hannover (2011)

Kruse, H., Gebhardt, D., Rüssmann, H.: FKW – CO2-Erdwärmerohr für Geothermische Wärmepumpen – Betriebsverhalten im Vergleich zur Sole-Sonde. In: Deutsche Kälte-Klima-Tagung, Bd. 35. DKV, Ulm (2008)

Makogon, J. F.: Hydrates of hydrocarbons. Pennwell (PennWell books), Tulsa (1997)

Miara, M., Günther, D., Kramer, Th, Oltersdorf, Th, Wapler, J.: Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchungen von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Kurzfassung. Fraunhofer ISE (2011)

Morison, K. R., Worth, Q. A. G., O'Dea, N. P.: Minimum wetting and distribution rates in falling film evaporates. Food and Bioproducts Processing. **84**, 302–310 (2006)

Ochsner, K.: Carbon dioxide heat pipe in conjunction with a ground source heat pump (GSHP). Appl. Therm. Eng. **28**(16), 2077–2082 (2008)

Peterlunger, A., Ehrbar, M., Rohner, E., Bassetti, S.: Pumpenlose Erdwärmesonde Phase 1: Potentialabklärung, Machbarkeitsstudie energetisch und wirtschaftlich. Bundesamt für Energie (2004)

Prost, J. S., Gonzales, M. T., Urbicain, M. J.: Determination and correlation of heat transfer coefficients in a falling film evaporator. In: J. Food Eng. 320–326 (2006)

Rieberer, R.: Naturally circulating probes and collectors for ground-coupled heat pumps. Int. J. Refrig. **28**(8), 1308–1315 (2005)

Rieberer, R., Mittermayr, K., Halozan, H.: CO2 heat pipe for heat pumps. Preliminary Proceedings Natural working fluids 2002: 5th IIR-Gustav Lorentzen Conference - Fluides actifs naturels 2002, Guangzhou, China, S. 205–212, International Institute of Refrigeration, Paris (2002)

Rieberer, R., Mittermayr, K., Halozan, H.: CO2-Erdsonde als Wärmeträgersystem für Wärmepumpen. In: Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V (DKV) (Hrsg.) Deutsche Kälte- und Klimatagung. Bremen (2004)

Rieberer, R., Mittermayr, K., Halozan, H.: CO2 Thermosyphons as heat source system for heat pumps. 4 years of market experience. In: Global advances in heat pump technology, applications, and markets. Proc. 8th IEA Heat Pump Conf. 2005, May 30 – June 2;. Las Vegas (2005)

Schnabel, G.; Palen, J. W.: Wärmeübergang an senkrechten berieselten Flächen. In: VDI-Wärmeatlas, S. Md 1-8. 10. Aufl. Springer, Berlin (2006)

Schuchmann, H. (Hrsg.): Lebensmittelverfahrenstechnik. Wiley-VCH, Weinheim (2005)

Shiraishi, M., Yoneya, M., Yabe, A.: Visual Study of Operating Limit in the Two-Phase Closed Thermosyphon. In: K. Oshima, Y. Kobayashi, M. Murakami und K. Negishi (Hrsg.): 5th Int. Heat Pipe Conf. (5 IHPC). Research and development of heat pipe technology, Bd. 1. Tokyo, Japan, 2 Bände: Japan Technology and Economics Center, JATEC (IHPC), S. 10–17. (1984)

Simon, F. F., Hsu, Y.-Y: Thermocapillary induced breakdown of a falling liquid film. Nasa Technical Note. National Aeronautics and Space Administration, Washington (1970)

Skovrup, M. J, Jakobsen, A., Rasmussen, B. D, Andersen, S. E.: Datenbank: Coolpack 1.50. Version 1.50: IPU & Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark (2012)
Smith, P. G.: Introduction to food process engineering, 2. Aufl. Springer (Food science text series), New York (2011)
Stober, I, Bucher, K.: Geothermie. Springer Verlag (Springer geology), Berlin (2012)
Storch, T.: Grundlegende Untersuchungen zum Wirkprinzip von geothermischen Phasenwechselsonden. Dissertation. Sierke Verlag, Freiberg, ISBN: 978-3-86844-707-1, (2015). http://doi.org/10.14626/9783868447088
Storch, T., Grab, T.; Wagner, S., Gross, U.: Evaluierung einer Geothermieanlage mit Direktverdampfersonden. In: GtV- Bundesverband Geothermie e.V (Hrsg.). Der Geothermiekongress. Karlsruhe (2010)
Storch, T., Grab, T., Gross, U., Wagner, S.: Investigations of geothermal heat pipes. In: EERA – Scuola Superiore Sant Anna (Hrsg.): 3rd European geothermal PhD-Day. 3. EGPD. Pisa, March, 28–30. European Energy Research Alliance (Book of Abstracts) (2012)
Storch, T., Grab, T., Gross, U.; Wagner, S.: Visual observations inside a geothermal thermosyphon. In: Heat Pipe Science Technologie **4**(3), 217–226 (2013). http://doi.org/10.1615/HeatPipeScieTech.2014011210.
Storch, T., Grab, T.; Wagner, R. M., Gross, U.: Visuelle Untersuchungen der Verdampfungsprozesse in einer geothermischen Phasenwechselsonde. In: Dechema (Hrsg.) Jahrestreffen der Fachgruppen Mehrphasenströmungen und Wärme- und Stoffübertragung. Fulda, 24.–25.03. Processnet (2014)
Storch, T., Grab, T.; Wagner, R. M., Gross, U.: Visuelle und energetische Untersuchungen an einer realen geothermischen Phasenwechselsonde mit Propan. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) (Hrsg.) 14. Int.es Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie. Neumarkt i. d. Oberpfalz, S. 132–139 (2015)
Tien, C. L., Chung, K. S.: Entrainment limits in heat pipes. AIAA J. **17**(6), S. 643–646 (1979)
Tikka, P.: Verfahren und Vorrichtung zur Verbrennung von Schwarzlauge. Angemeldet durch Andritz Oy, Helsinki, FI am 23.03.2001. Anmeldenr: 10114213. Veröffentlichungsnr: DE 1 011 4213 C2 (2001)
Unk, J.: Betriebsfuellhoehe eines geschlossenen Zweiphasen- Thermosyphons. Klima-Kaelte-Heizung **17**(7–8),353–356 (1989)
Valentas, K. J., Rotstein, E., Singh, R. P.: Handbook of food engineering practice CRC Press, Boca Raton (1997)
VDI 4640, Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrunds. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010)
VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas 2006, 10. Aufl. Springer, Berlin (2006)
VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas 2013. 11. Aufl. Springer Vieweg, Berlin (2013)
Wallis, G. B.: One-dimensional two-phase flow. McGraw-Hill, New York (1969)
Wellig, B., Grüniger, A.: Potential von CO2-Erdwärmesonden. 16. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte. Burgdorf (2010)
Wesselak, V.; Schabbach, T.: Regenerative Energietechnik. Springer, Berlin (2009)
Wilson, C. H., Pope, D. H., Cundy, V. A., Nydahl, J. E., Pell, K. M.: A demonstration project for deicing of brindge decks. Transp Res Rec. **664**, 189–197 (1978)
Zaitsev, D. V., Aviles, M. L., Auracher, H., Kabov, O. A.: Rupture of a subcooled liquid film falling down a heated grooved surface. Microgravity Sci. Technol. **19**(3–4), 71–74 (2007)
Zorn, R.; Kölbel, T.; Kruse, H.; Steger, H.: Deep Borehole Heat Exchanger with a CO2 Gravitational Heat Pipe. In: Reddy, K. R., Khire, M. V., Alshawabkeh, A. N. (Hrsg.): Geosustainability and geohazard mitigation. Proc. of Geocongress 2008, S. 899–906. ASCE, New Orleans (2008)

Zorn, R., Orywall, P., Kölbel, T., Heyder, B., Steger, H.: Schnee- und Eisfreihaltung mittels innovativer Wärmerohrtechnik. In: Stefan Fuhl (Hrsg.): Oberflächennahe Geothermie, S. 94–98. WVGW Wirtschafts- u. Verl.-Ges. Gas und Wasser, Bonn (2010)

Zorn, R., Steger, H., Kölbel, T., Kruse, H.: CO2-Erdsonde basierend auf dem Gravitationswärmerohrprinzip. bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau **58**(12), S. 58–63 (2007)

Zorn, R., Steger, H., Eggeling, L., Kölbel, T.: Schnee- und Eisfreihaltung mit CO2-betriebenen Wärmerohren. Geothermische Energie. **73**(2), S. 20–23 (2012)

Ausbau der Bohrung zu geothermischen Quellen

14

Frank Burkhardt

Inhaltsverzeichnis

14.1 Einleitung 452
14.2 Offene Systeme 452
14.2.1 Brunnenanlagen 452
14.3 Geschlossene Systeme 458
14.3.1 Erdwärmesonden Duplex und Koaxial 458
14.3.2 Koaxiale Speichersonden 470
14.3.3 Direktverdampfersonden 473
Literatur 476

Zusammenfassung

Geothermische Quellen können entweder offene Systeme (d. h. Förder- und Schluckbrunnen, die das Grundwasser nutzen) oder geschlossene Systeme (mittels Erdwärmesonden) sein. Beide Bauarten sind komplexe Vorhaben, die man nach Fertigstellung kaum noch sieht und nur noch sehr aufwendig nacharbeiten kann. Deshalb haben die fach- und sachgerechten Planung und Ausführung einschließlich Qualitätsüberwachung eine sehr große Bedeutung. Das Heizsystem des Gebäudes gibt die Leistung der geothermischen Quelle vor, deren Dimensionierung und Ausführung wiederum von der geologischen Ansprache des Untergrundes abhängt. Die verschiedenen Bauarten und einzusetzenden Materialien werden vorgestellt sowie Stärken und Schwächen verschiedener Bauteile und Materialien diskutiert. Manche behördlichen Vorgaben sind leider widersprüchlich (z. B. Abstandshalter und Zentrierstücke, die die Ringraumhinterfüllung mittels Baustoffsuspension behindern) und müssen weiter untersucht werden. Besonderen Wert muss auf die Qualitätssicherung während der Realisierung

Frank Burkhardt (✉)
Burkhardt GmbH, Tulpenstraße 15, 75389 Neuweiler, Deutschland
e-mail: frank@burkhardt-bohrungen.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_14

der Baumaßnahme und eine ordentliche Bauabnahme und Übergabe gelegt werden, da der Bauherr Schäden und Fehlleistungen in den meisten Fällen erst viel später merken wird.

Schlüsselwörter
Offene Systeme · Brunnen · Filter · geschlossene Systeme · Sonden · Erdwärmesonden · Koaxialsonde · Duplexsonde · Direktverdampfersonde · Ringraumhinterfüllung · Sondeneinbau

14.1 Einleitung

Um die abgeteuften Bohrungen nutzbar zu machen, müssen diese zu geothermischen Quellen ausgebaut werden. Hierzu müssen die Bohrungen so ausgebaut werden, dass die gewünschte Energie transportiert werden kann. Dies kann in offenen oder geschlossenen Systemen erfolgen. Bei offenen Systemen wird hierzu Grundwasser aus zu Brunnen ausgebauten Bohrungen gepumpt, thermisch genutzt und wieder eingeleitet. Bei geschlossenen Systemen gibt es keinen direkten Kontakt zwischen dem Erdreich und dem Medium, das die Energie zu Tage fördert.

Beim Ausbau der Quellen handelt es sich um den entscheidenden Arbeitsschritt zur einwandfreien Funktion einer Geothermischen Anlage. Daher müssen hier, vor allem weil es sich um nicht sichtbare Gewerke handelt, höchste Ansprüche an die Qualität der Ausführung und an die eingebauten Materialien gesetzt werden. Hierzu wurde in den letzten Jahren eine große Qualitätsoffensive gestartet, um die Geothermie als eine der sinnvollsten Energiegewinnungen weiter voranzutreiben.

14.2 Offene Systeme

Bei offenen Systemen handelt es sich um Anlagen, die im Boden vorhandenes Grundwasser direkt als Energieüberträger nutzen. Daher besteht bei diesen Bohrungen ein gewisses Fündigkeitsrisiko. So kann ohne eine genaue Vorerkundung oder ohne die Auswertung von Daten aus dem näheren Umfeld einer geplanten Anlage keine Garantie gegeben werden, dass zum einen Wasser in der ausreichenden Menge und zum anderen in geeigneter Qualität vorhanden ist. Dies ist jedoch die Grundvoraussetzung für den effizienten und dauerhaft problemlosen Betrieb einer Geothermischen Brunnenanlage. Das Fündigkeitsrisiko muss schon in der Datenerhebung berücksichtigt werden und es zeigt, dass Wasser-Wasser-Anlagen große Anforderungen an den Planer stellen.

14.2.1 Brunnenanlagen

Bei sogenannten Wasser-Wasser-Anlagen (Abb. 14.1) handelt es sich um Anlagen, die aus Förder- oder auch Saug- und aus Schluckbrunnen bestehen.

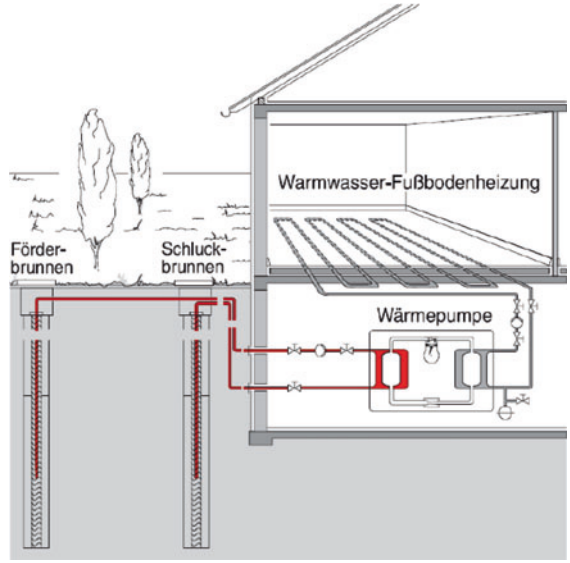


Abb. 14.1 Schema einer Wasser-Wasser-Anlage. (VDI 4640 Blatt 2)

Aus den Förderbrunnen wird Grund- oder auch Filtratwasser gepumpt, welches dann direkt zur Kühlung oder durch die Nutzung von Wärmepumpen zur Beheizung verwendet wird.

Um kostbares Wasser nicht zu verschwenden, wird nur die Energie entzogen und das Wasser danach wieder in denselben Grundwasserleiter eingeleitet. In der Nähe von Flüssen oder Bächen besteht auch die Möglichkeit, das Filtratwasser aus dem Förderbrunnen zu Pumpen und nach der thermischen Nutzung in den Vorfluter einzuleiten. Dies erfordert jedoch die Sicherheit, dass es sich bei dem Wasser auch um Filtratwasser des Vorfluters handelt und nicht Grundwasser aus tieferen Stockwerken entzogen wird.

14.2.1.1 Förder- oder auch Saugbrunnen

Wie der Name schon verrät, handelt es sich hierbei um den Brunnen (Abb. 14.2), aus dem Wasser gefördert wird. Brunnen mit Wasserspiegeln sehr nah unter der Oberfläche können als Saugbrunnen ausgeführt sein. Hintergrund ist, dass Wasser nur über eine gewisse Höhe „gesaugt“ werden kann. In der Theorie liegt dieser Wert bei ca. 10 m. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass durch Reibungsverluste und andere Einflüsse wie den verwendeten Leitungen und Pumpen selten mehr als 7 m erreicht werden können. Da der Wasserstand bei Betrieb der Pumpe also bei Wasserförderung und somit bei abgesenktem Wasserspiegel entscheidend ist, scheidet diese Technik in den meisten Fällen aus.

Die Alternative zu den Saugpumpen stellen Unterwassermotorpumpen dar. Hierbei handelt es sich um elektrisch angetriebene Kreiselpumpen, die unter dem Wasserspiegel eingebaut werden und das Wasser nach oben pumpen. Mit dieser Technik lässt sich Wasser über mehrere Hundert Meter Höhe fördern, was jedoch für eine Geothermische Brunnenanlage nicht erforderlich ist. Vielmehr ist hier das Ziel, mit möglichst wenig Pumpenergie den benötigten Volumenstrom zu fördern.

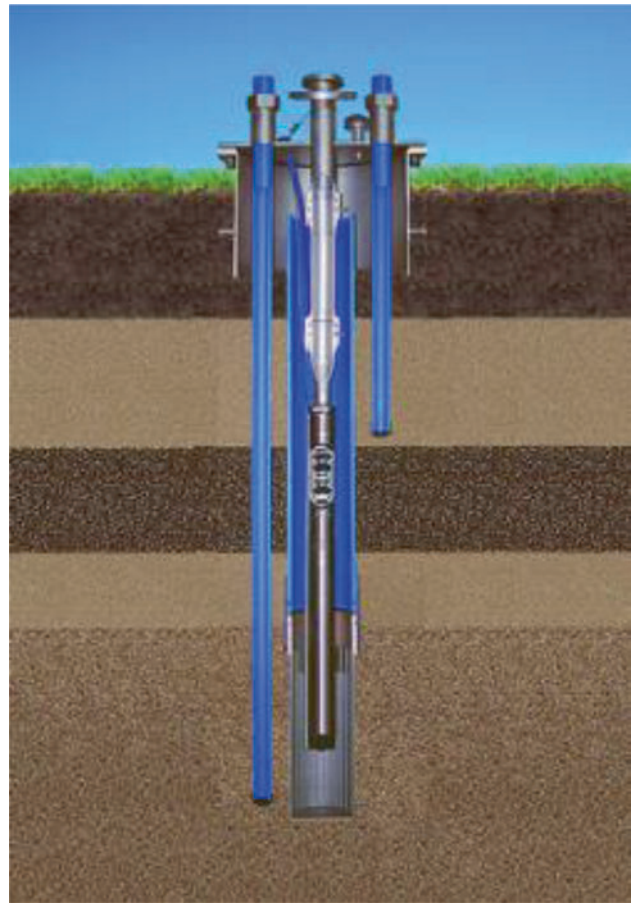


Abb. 14.2 Schnitt durch einen Brunnen. (GWE-Gruppe)

Um diese Pumpen oder auch eine Saugleitung unter dem Wasserspiegel im Boden einbauen zu können, wird ein dauerhaft vorhandener Hohlraum benötigt. Dieser wird durch die Bohrung und den Ausbau des Brunnens hergestellt und offen gehalten. Hierzu wird, nachdem die Bohrung abgeteuft wurde, ein Ausbaustrang eingebaut. Dieser besteht im Bereich des Wasserleiters aus Filterrohren und in der darüber erforderlichen Strecke aus Vollwandrohren. Der Ringraum zwischen Ausbaustrang und Bohrlochwand wird im Bereich der Wasserzutritte mit auf den anstehenden Boden abgestimmtem Filtersand oder Filterkies verfüllt.

14.2.1.2 Schluckbrunnen oder Injektionsbrunnen

Beim Schluckbrunnen handelt es sich um den Brunnen, in dem das thermisch genutzte Wasser wieder in den Grundwasserleiter eingeleitet wird. Diese einfach erscheinende Aufgabe ist jedoch in der Praxis oft mit Problemen verbunden. Es benötigt eine gute Planung und auch eine qualitativ hochwertige Ausführung, um Brunnenanlagen dauerhaft zu betreiben. Die Brunnen werden meist ähnlich dem Förderbrunnen geplant. Da sich jedoch

in diesem Fall kein Absenktrichter, sondern eine Erhöhung des Wasserstandes bei Betrieb einstellt, empfiehlt es sich die Filterstrecke auf dies anzupassen und nach oben zu verlängern. Des Weiteren empfiehlt es sich die Brunnen so auszulegen, dass die Aufstauhöhe des Wasserspiegels bei der Einleitung in den Brunnen ungefähr den zweifachen Betrag der ermittelten Absenkung im Förderbrunnen betragen kann. Sollte dies durch einen hohen Grundwasserspiegel nicht möglich sein, muss durch andere Maßnahmen eine verbesserte hydraulische Leistungsfähigkeit gewährleistet werden. So könnte der Brunnen beispielsweise wesentlich überdimensioniert gebaut werden.

14.2.1.3 Filter- und Vollwandrohre

Als Filterrohre (Abb. 14.3) werden Rohre bezeichnet, die durch ihre spezielle Bauart als Filter fungieren können. Es handelt sich dabei um Rohre, in die Schlitze eingebracht sind, welche es ermöglichen, dass Wasser in die Rohre eintreten, die umgebende Filterschüttung jedoch nicht eindringen kann. Die Größe der Schlitze, also die Schlitzweite, ist daher auf den Korndurchmesser der Filterschüttung abzustimmen. Die eigentliche Filterwirkung muss durch die Schüttung gewährleistet werden. Korngrößen, die das Schüttkorn passieren

Abb. 14.3 Wickeldrahtfilter aus Edelstahl (links) und Filterrohr aus PVC (rechts)

können, müssen auch durch die Filterschlitze der Filterrohre, daher muss hier eine genaue Abstimmung aufeinander erfolgen.

Als Vollwand- beziehungsweise Aufsatzrohre werden die Rohre bezeichnet, die oberhalb der Filterrohre zur Überbrückung der Strecke bis über Gelände oder in den Brunnenschacht benötigt werden. Bei den Aufsatzrohren ist darauf zu achten, dass die Verbindungen möglichst wasserdicht ausgeführt werden sollten. Auch geringste Mengen an Fremdwasser, die durch die Verbindungen eindringen, könnten eine Reaktion in Gang setzen, die zu einer schnellen Brunnenalterung und den Rückgang der Ergiebigkeit führt.

Als Werkstoffe stehen verschiedene Materialien zur Verfügung. Bei kleineren Anlagen kommen in der Regel Rohre aus PVC zum Einsatz. Bei größeren oder auch optimierten Anlagen empfiehlt es sich, Wickeldrahtfilter aus Edelstahl einzubauen. Diese haben den großen Vorteil, dass die „freie Fläche“ für den Wassereintritt wesentlich größer ist und so das Wasser mit weniger Widerstand in den Brunnen eintreten kann. Des Weiteren ermöglichen die keilförmig nach innen weiter öffnenden Schlitze, dass sowohl vor der Inbetriebnahme stattfindende Brunnenentwicklungen als auch eventuell erforderliche Regenerierungen einen wesentlich größeren Erfolg haben. Rohr aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) oder aus beschichtetem Stahl finden in der Regel keine Anwendung in oberflächennahen Geothermischen Brunnenanlagen.

14.2.1.4 Filterschüttungen

Das Ziel von Filterschüttungen besteht darin, Wasser aus den anstehenden Formationen passieren zu lassen, den anstehenden Boden jedoch filterstabil zurückzuhalten bzw. nur einen gewissen Anteil an Feinmaterial, zur Verbesserung der hydraulischen Leistungsfähigkeit, durchzulassen. Um das Filtermaterial festzulegen, reicht es bei kleineren Anlagen meist aus, auf Erfahrungswerte und auf die visuelle Untersuchung der Proben beim Abteufen der Bohrung zurückzugreifen. Bei größeren und leistungsfähigeren Anlagen empfiehlt es sich, den Untergrund vorab zu erkunden und von den gewonnenen Proben eine Siebanalyse auszuführen. Diese stellt dann die Grundlage für eine genaue Festlegung der Filterschüttung. Dadurch können auch schon erste Optimierungen durchgeführt werden, die dann zu einer höheren Leistungsfähigkeit der Brunnenanlage führen. Der Begriff *Filterschüttungen* leitet sich daraus ab, dass das Filtermaterial meist von oben in den Ringraum geschüttet wird. Je nach Tiefe der Bohrung wird das Material zum Teil auch mit Wasser eingespült.

Als Filter stehen natürliche Gesteinskörnungen oder auch industriell hergestellte Materialien zur Verfügung. Die Anforderungen an ein Schüttmaterial sind vielseitig und können wie folgt aufgeführt werden:

- homogene Materialzusammensetzung,
- hohe Reinheit,
- glatte Oberfläche,
- möglichst vollkommene Rundheit,
- homogene Porengeometrie,

- maximaler effektiver Porenraum,
- maximale Durchlässigkeit der Poren,
- hohe mechanische Festigkeit,
- hohe chemische Resistenz,
- definierte Korngröße mit wenig Unter- oder Überkorn.

Diese Anforderungen konnten bis vor einigen Jahren nur Quarzsande und Quarzkiese nach der Norm DIN 4924 erfüllen. Für den Großteil der Einsätze reicht dieses Material auch aus. Da es sich dabei jedoch um ein natürliches, heterogenes Material mit verschiedenen Vorkommen handelt, ist es kein völlig definiertes Produkt, sondern es zeigt immer wieder Eigenschaften, die so nicht gewollt sind.

Das Alternativprodukt sind speziell hergestellte Glaskugeln, die bessere Eigenschaften und eine homogene Qualität aufweisen. Da die Herstellung jedoch aufwendiger und somit teurer ist, lohnt sich der Einsatz nicht bei jedem Brunnen. Bei größeren Anlagen oder auch bei Brunnen in Formationen, die zu Problemen neigen, sollte unbedingt über einen Einsatz von Glaskugeln nachgedacht werden.

14.2.1.5 Brunnenvorschächte

Da von den Brunnenvorschächten kein direkter Nutzen ausgeht, wird sehr oft versucht, an diesen zu sparen. Es sollten jedoch gewisse Mindestanforderungen an diese Bauwerke gestellt werden. Folgende Anforderungen muss ein Abschlussbauwerk erfüllen:

- Abdichtung gegenüber Oberflächenwasser gewährleisten,
- Zugang zum Ein- und Ausbau der Pumpen ermöglichen,
- Zugang zum Regenerieren gewährleisten,
- Aufnahme eventueller Technik zum Betrieb der Anlage,
- frostfreie Leitungsführung,
- unbefugte Zutritte verhindern.

14.2.1.6 Wichtige Punkte bei der Planung

Bei der Planung von Wasser-Wasser-Anlagen ist das folgende Vorgehen zu empfehlen. Zunächst definiert das zu beheizende oder zu kühlende Gebäude oder das Objekt die Heiz- bzw. die Kühllast. Hieraus lässt sich der erforderliche Volumenstrom ableiten, der durch die Brunnenanlage zur Verfügung gestellt werden muss. Mit diesem Volumenstrom und der benötigten Förderhöhe, die sich aus der tatsächlichen Förderhöhe, den Reibungsverlusten der kompletten Anlage mit Wärmetauschern, sowie den Armaturen zusammensetzt, kann eine erste Abschätzung der benötigten Pumpe stattfinden.

Die Größe der Pumpe kann dann zur Dimensionierung des kleinsten Ausbaudurchmessers verwendet werden. Hierbei ist zu beachten, dass auch genügend Platz für zusätzliche Einbauteile wie Steigleitung, Stromkabel, Steuereinrichtungen oder Wasserstandssonden vorhanden ist.

Nachdem ein sinnvoller Ausbaudurchmesser aufgrund dieser Anforderungen festgelegt ist, gilt es zu prüfen, ob dieser Ausbau auch die erforderliche hydraulische Leistungsfähigkeit besitzt. Ist dies der Fall, kann der erforderliche Bohrdurchmesser gewählt werden.

Auch den hohen jährlichen Betriebsstunden einer solchen Anlage ist bei der Planung Rechnung zu tragen. So sind die Brunnenanlagen nicht mit Brunnen zur Beregnung mit nur gelegentlicher Nutzung zu vergleichen. Daher ist hier anzuraten, Unternehmen mit einschlägigen Referenzen auszuwählen und vermeintliche Schnäppchen genau unter die Lupe zu nehmen, um später keine Überraschungen zu erleben.

Es ist auch zu beachten, dass es sich bei Brunnenanlagen nicht um wartungsfreie, sondern vielmehr um überwachungsbedürftige und sensible Anlagen handelt.

Um die Belastungsgrenzen einer Brunnenanlage festzustellen, ist es zwingend erforderlich, die Brunnen auf ihre Leistungsfähigkeit zu testen. Hierzu müssen Pump- und Schluckversuche ausgeführt und diese ausgewertet werden. Mit diesen Daten lassen sich dann auch Grenzwerte festlegen, bei denen es sich empfiehlt, die Brunnen zu regenerieren. Dies darf nicht erst erfolgen, wenn der Brunnen nicht mehr genügend Wasser liefert oder aufnimmt, sondern schon bei einem Rückgang der Ergiebigkeit um ca. 10 %. Nur so kann gewährleistet werden, dass bereits zugesetzte Porenräume und Kanäle wieder geöffnet werden können und der Brunnen wieder nahezu seine Anfangsergiebigkeit erhält.

Aufgrund der oft zeitlich versetzten Ausführung findet leider nicht immer die gewünschte Abstimmung zwischen den Gewerken des Brunnenbaus und des Anlagenbaus statt. Daher sollten bei der Ausführung gewisse Sicherheiten mit gewährleistet werden. So empfiehlt es sich zum Beispiel, dass alle Leitungen und Leerrohren von den Brunnen ins Gebäude so abgedichtet werden, dass auch bei überlaufenden Brunnen kein Wasser zu Schäden im oder am Gebäude führen kann.

14.3 Geschlossene Systeme

Hierbei handelt es sich um Systeme, bei welchen das Medium, das die Energie zutage transportiert, nicht in direktem Kontakt zum umliegenden Gebirge steht, sondern eine Vorrichtung als Wärmetauscher in die Bohrung eingebaut wird. Dies hat den großen Vorteil, dass kein Wasser in den Bohrungen vorhanden sein muss und so kein Fündigkeitsrisiko besteht. Die Planung von dieser Seite gesehen ist also wesentlich einfacher und sicherer. Dennoch gibt es auch hier Punkte, die dringend beachtet werden müssen. So ist nicht aus jedem Boden oder Gestein die gleiche Energiemenge zu entnehmen.

14.3.1 Erdwärmesonden Duplex und Koaxial

Bei Erdwärmesonden (Abb. 14.4) handelt es sich um Wärmetauscher, in der Regel aus Kunststoffrohren, die in die Bohrungen eingebracht werden. In den Erdwärmesonden zirkuliert eine Wärmeträgerflüssigkeit, die für den Transport der Energie verantwortlich ist.

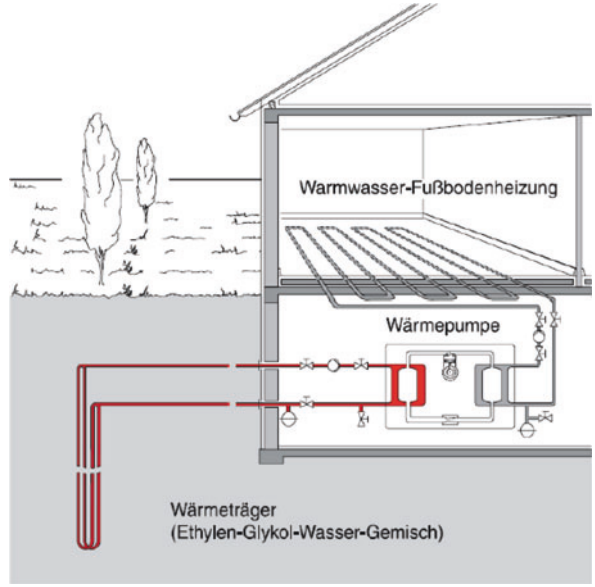


Abb. 14.4 Schema Erdwärmesonde. (VDI 4640 Blatt 2)

Hierzu wird dieses Medium, das in der Regel aus Wasser besteht und mit frost- und korrosionsschützenden Inhibitoren versehen ist, im geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Während dieses Vorgangs wird Energie auf dem umgebenden Gestein aufgenommen und über Tage nutzbar gemacht.

14.3.1.1 Die Erdwärmesonden

Doppel-U-Erdwärmesonde

Bei der Doppel-U-Erdwärmesonde (Abb. 14.5) handelt es sich um die mit Abstand am häufigsten eingebaute Art von Erdwärmesonden in Deutschland. Im Bohrlochtiefsten befindet sich eine U-förmige Umlenkung, der sogenannte Sondenfuß. Dieser hat keine besondere energietechnische Funktion, sondern sorgt dafür, dass die Wärmeträgerflüssigkeit mit möglichst geringem Reibungsverlust und bei möglichst kleinem Außendurchmesser des Sondenfußes in den anderen Schenkel des eingebauten U geleitet wird. Als Doppel-U-Sonde bezeichnet man eine Erdwärmesonde, bei der zwei dieser Rohrpaare in eine Bohrung eingebaut werden.

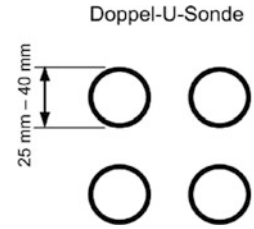


Abb. 14.5 Doppel-U-Sonde. (VDI 4640 Blatt 2)

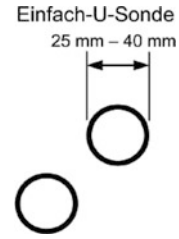


Abb. 14.6 Einfach-U-Sonde. (VDI 4640 Blatt 2)

Einfach-U-Erdwärmesonde

Von Einfach-U-Sonden (Abb. 14.6) spricht man, wenn nicht zwei, sondern nur ein Kreislauf in die Bohrung eingebaut wird. Die Verbreitung dieser Art von Erdwärmesonden ist jedoch bei Weitem nicht so groß wie bei den vorher genannten Doppel-U-Sonden.

Werkstoff

Das Material, aus dem die Erdwärmesonden im Regelfall hergestellt werden, ist PE 100-RC, es handelt sich hierbei um die Weiterentwicklung des seit Jahrzehnten erfolgreich im Rohrleitungsbau eingesetzten Kunststoffs PE 100 HD. Das Material PE 100-RC weist jedoch eine wesentlich verbesserte Spannungsrissbeständigkeit auf, was zu einer erhöhten Sicherheit beim Betrieb von Erdwärmesonden bedeutet. Aufgrund dieser Eigenschaften kann von einer gesicherten Lebensdauer von 100 Jahren ausgegangen werden (Hessel 2008).

Bei Erdwärmesonden, bei denen mit erhöhten Temperaturen des Wärmeträgerfluides zu rechnen ist, empfiehlt es sich, den Werkstoff vor dem Einsatz genauer zu prüfen. Werden als Dauerbetriebstemperatur bei PE 100-RC in der Regel –10° C bis max. + 40° C angegeben, so können mit PE-X Erdwärmesonden Betriebstemperaturen von –20° C bis zu + 95° C erreicht werden – wobei sich diese Temperaturen lediglich auf den Werkstoff der Erdwärmesonde und nicht auf das Gesamtsystem beziehen. Für die dauerhafte und sichere Funktion des Systems Erdwärmesonde und der Ringraumabdichtung empfiehlt es sich, nicht mit Soletemperaturen unter –3°C in die Erdwärmesonden zu fahren. Ansonsten kann die Gefahr, die Hinterfüllung oder das umgebende Gebirge durch Frost zu beschädigen, nicht ausgeschlossen werden.

Koaxialsonde

Koaxialsonden (Abb. 14.7) oder auch Rohr-in-Rohr-Sonden zeichnen sich dadurch aus, dass die Anordnung der Rohre von Vorlauf und Rücklauf nicht nebeneinander, sondern ineinander ist. Die Wärmeträgerflüssigkeit wird dann im Ringspalt zwischen den

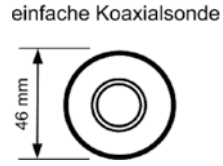


Abb. 14.7 einfache Koaxialsonde

eingebauten Rohren nach unten gepumpt und im zentralen Rohr nach oben gefördert. Einbautiefen von koaxialen Erdwärmesonden in der oberflächennahen Geothermie liegen im Regelfall bei max. 60 m. Es gibt jedoch auch wesentlich tiefere Koaxialsonden, diese sind jedoch aufgrund des größeren Aufwands beim Einbauen sehr selten.

14.3.1.2 Abstandshalter und Zentrierungen

Zentrierungen (Abb. 14.8) werden eingebaut, um zu gewährleisten, dass die Rohre der Erdwärmesonde nicht an der Bohrlochwand anstehen, sondern möglichst mittig in der Bohrung eingebracht sind. Dies soll gewährleisten, dass die Sondenrohre ringsum von der Suspension, die zum Abdichten erforderlich ist, umschlossen werden.

Abstandshalter (Abb. 14.8) hingegen sollen die Sondenrohre untereinander auf Abstand halten und so den thermischen Kurzschluss zwischen Vor- und Rücklauf verhindern und damit die Effizienz steigern.

Untersuchungen des Solites (Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme) haben jedoch gezeigt, dass Zentrierungen und Abstandshalter den gewünschten Effekt nur erreichen, wenn sie in Abständen von ca 1 m eingebaut werden. Dies ist jedoch zum einen wirtschaftlich sehr schwer darstellbar und zum anderen für die spätere Hinterfüllung nicht zielführend. So können Abstandshalter und Zentrierungen das Auftreten von Fehlstellen in der Hinterfüllung begünstigen (Riegger 2013).

Es ist daher vor Einbau genau abzuwägen, ob auf einen Einbau sowohl von Abstandshaltern als auch von Zentrierhilfen nicht verzichtet werden sollte. Muss in den Ringraum beim Hinterfüllen Schüttmaterial wie Kies oder Sand zur Überbrückung von Verlustzonen eingebracht werden, oder sollen nachträglich Injektionsrohre eingebaut werden, führen solche Einbauten zwangsläufig zu Problemen. Die eigentlich sinnvolle Verwendung von beweglichen Verpresslanzen, die in der Bohrung auf- und abgefahren werden können, ist nur ohne solche Einbauten problemlos möglich.

Abb. 14.8 Zentrierung (oben) und Abstandshalter (links), rechts Kombination aus beidem

14.3.1.3 Sondeneinbau

Der Einbau einer Erdwärmesonde erfolgt stets, indem die Sondenrohre von oben in die offenstehende bzw. durch die Hilfsverrohrung gestützte Bohrung eingebracht werden. Der Einbau sollte zur Schonung der Kunststoffrohre immer über eine Haspel erfolgen, auf der die einzubauenden Rohre komplett aufgewickelt sind. Auf ein Auslegen der Rohre muss, sofern irgend möglich, verzichtet werden. Da die Hersteller der Erdwärmesonden diese im Regelfall in Folie eingepackt anliefern, liefert der Zustand dieser Folie schon den ersten Hinweis, ob es beim Transport zu einem Schaden gekommen ist. Daher sollte dieser Schritt als erste Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Des Weiteren sollte die Sonde beim Einbau gegen Verletzungen an scharfen Kanten der Hilfsverrohrung oder der Klemm- und Brechvorrichtung durch geeignete Mittel geschützt werden. Dies wird in der Praxis oft durch Verkehrsleitkegel oder durch spezielle Sondenbremsen (Abb. 14.9) gelöst. Die Sondenbremsen haben den Vorteil, dass durch das Einklemmen dieser, mit den innenliegenden Sondenrohren, in der Abfangvorrichtung der Bohranlage die Erdwärmesonde kontrolliert in die Bohrung abgelassen werden kann.

Eine für Mensch und Material sehr schonende und sichere Möglichkeit, Erdwärmesonden einzubauen, ist die Verwendung einer Einschubhilfe (Abb. 14.10): Mit dieser kann

Abb. 14.9 Sondenbremse. (HDG GmbH)

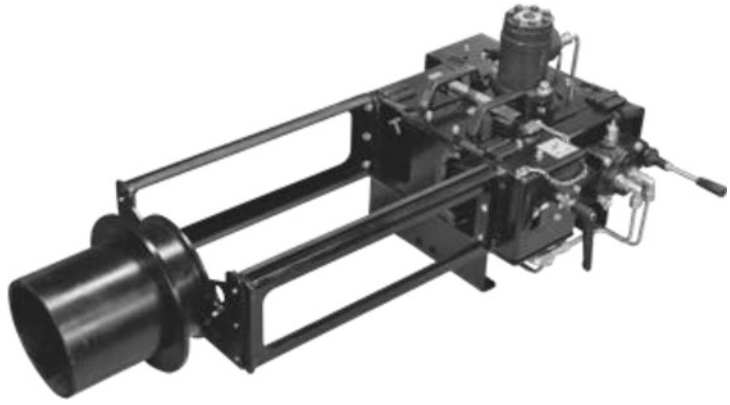


Abb. 14.10 Sondeneinschubhilfe QuickLoop. (Fa. Tracto-Technik)

die Erdwärmesonde über einen hydraulischen Antrieb kontrolliert abgelassen und eingeschoben werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Erdwärmesonde wieder aus der Bohrung zu ziehen. Dies kann zum Beispiel erforderlich werden, wenn die Bohrung durch eine nicht standfeste Geologie einstürzt und die Erdwärmesonde nicht auf die erforderliche Tiefe eingebracht werden kann.

14.3.1.4 Ringraumhinterfüllung

Bei der Hinterfüllung des Ringraums, also dem verbliebenen Hohlraum zwischen Sondenrohren und Bohrlochwand, geht es zum einen darum, den Kontakt zwischen Gestein und Erdwärmesonden herzustellen und zum anderen darum, die Bohrung wieder sicher abzudichten. Der direkte Kontakt ohne Fehlstellen ist wichtig, um den Wärmestrom vom Gebirge zur Erdwärmesonde zu gewährleisten. Als noch wichtiger ist jedoch die Abdichtung und somit die Trennung einzelner Grundwasserstockwerke und die Wiederherstellung einzelner Grundwasserstauer. Es handelt sich hierbei um den wichtigsten Arbeitsschritt der gesamten Anlage und leider auch um den Schritt, an dem am meisten Fehler gemacht werden können. Daher ist es unerlässlich, diesem Arbeitsschritt die größte Aufmerksamkeit zu widmen.

Als Material für die Abdichtung werden, bis auf wenige Ausnahmen, auf Zement basierende Suspensionen verwendet. In der Regel wird hierbei auf Fertigprodukte zurückgegriffen, die auf der Baustelle nur noch mit sauberem Wasser angemischt werden müssen. Von der Verwendung von selbst zusammengemischten Zuschlagstoffen, sogenannte Eigen- oder Baustellenmischungen, ohne genaue Prüfung und Qualitätssicherung, muss abgeraten werden. In einigen Bundesländern sind schon Regelungen in Kraft getreten, die nur noch aufwendig geprüfte und kontrollierte Fertigmischungen zulassen.

Eine Unterscheidung von verschiedenen Baustoffen findet in der Regel durch deren Wärmeleitfähigkeit statt. Je höher die Wärmeleitfähigkeit (W/m·K), desto einfacher kann die Energie vom Gebirge zur Erdwärmesonde strömen. Nicht thermisch verbesserte Suspensionen liegen bei Werten zwischen $\lambda = 0{,}8$ und 1,2 W/m·K, höher leitfähige Suspensionen beginnen in der Regel bei $\lambda \geq 2{,}0$ W/m·K und bilden auch das hauptsächlich eingesetzte Material ab. Einzelne Produkte erreichen jedoch auch schon Werte von $\lambda = 4{,}0$ W/m·K (z. B. HeidelbergCement AG). Hier kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich um Produkte für besondere Anwendungsfälle handelt.

Ein weiter wichtiger Punkt ist, dass das eingesetzte Material richtig angemischt wird und so alle Inhaltsstoffe aufgeschlossen werden. Dies können die leider noch sehr weit verbreiteten Durchlaufmischer aus der Putz- und Mörteltechnik in den seltensten Fällen erfüllen. Daher empfiehlt es sich, hierzu Anlagen zu verwenden, die eine hochtourige Mischtechnik mit sogenanntem Kolloidalmischer besitzen (Abb. 14.11). So kann gewährleistet werden, dass der Baustoff seine geprüften und gewünschten Eigenschaften auch entwickelt.

Grundlage für eine dauerhaft funktionierende Abdichtung ist das Erkennen von Wasserzutritten und deren Potentiale in der Bohrung. Ziel hierbei ist, dass der hydrostatische Überdruck, der durch die Suspension entsteht, immer größer als der im Wasserleiter vorherrschende Druck ist. Hierzu ist zu beachten, dass die Dichte, also das Gewicht, der

Abb. 14.11 Hydraulisch angetriebene Injektionseinheit mit Kolloidalmischer

Suspension für den entstehenden Druck entscheidend ist. Hintergrund ist, dass in den offenen Bohrungen vorhandenen Strömungen schon während der Injektion komplett gestoppt und so dauerhaft unterbunden werden. Der komplette Stillstand von vertikalen Strömungen in der Bohrung nach dem Verfüllen ist die absolut notwendige Voraussetzung, dass die zementgebundene Suspension abbinden kann, ohne weggespült zu werden. Abb. 14.12 zeigt die hydrostatischen Druckverhältnisse in einer Bohrung.

Um den komplexen Verhältnissen beim Bau einer Erdwärmesonde Rechnung zu tragen und die Qualität bei der Ausführung dauerhaft zu erhöhen und zu sichern, wurde in Baden-Württemberg unter der Federführung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft ein Regelwerk geschaffen und verpflichtend per Erlass eingeführt. Diese *Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden* (LQS-EWS) können jedoch nicht nur in Baden-Württemberg, sondern bundesweit angewendet werden. Die dafür entwickelten Arbeitsanweisungen und die darin enthaltenen Fallbeispiele ermöglichen eine Einteilung in verschiedene Klassen und lassen so Verhältnisse mit eventuell zu erwartenden Schwierigkeiten erkennen.

Die Formel in Abb. 14.13 mit Erläuterung in Abb. 14.14 ermöglicht die Berechnung von Potentialunterschieden. Hieraus lässt sich klar erkennen, ob eine Bohrung problemlos abzudichten ist, oder ob besondere Maßnahmen ergriffen werden müssen. Die Einteilung in kritische und nicht kritische Bereiche hat dort so stattgefunden, dass die erforderliche

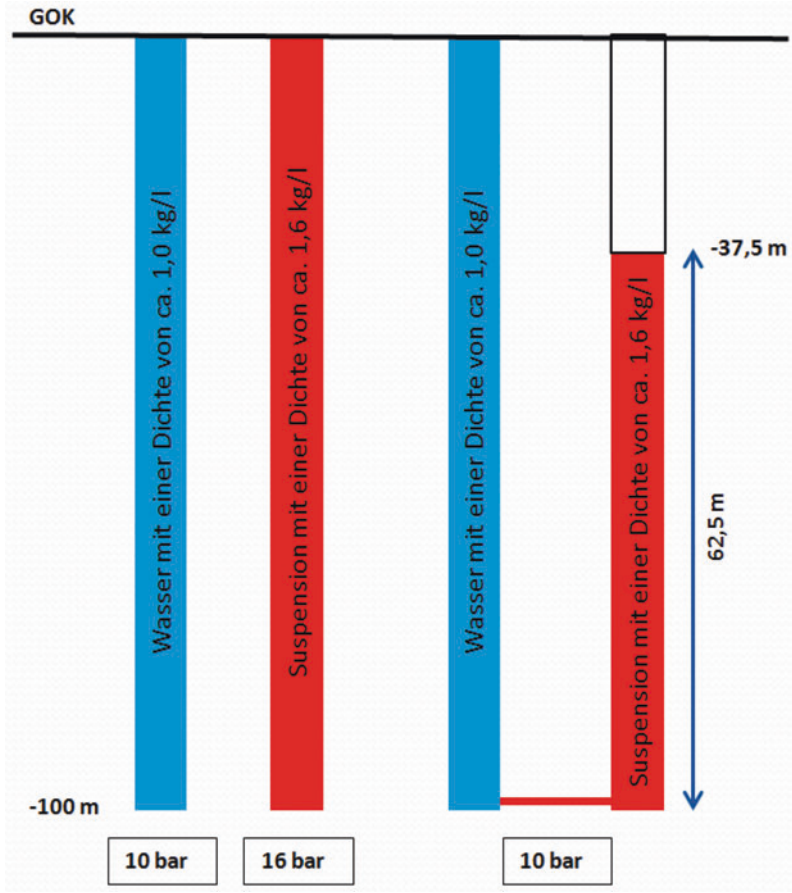


Abb. 14.12 Erklärung Druckverhältnisse in Bohrungen

Dichte der Suspension für die Einteilung entscheidend ist. Da alle Fertigprodukte bei der vom Hersteller angegebenen und geprüften Rezeptur eine Dichte von >1,4 kg/l erreichen, wurden alle Fälle, in denen eine Dichte von 1,3 kg/l ausreicht, als nicht kritisch eingestuft. Der nächste Schritt in der Einteilung sind Verhältnisse, bei denen einen Suspensionsdichte zwischen 1,3 kg/l und 2,0 kg/l erforderlich ist. Da in diesem Bereich Suspensionen schon gesondert nach Dichte ausgewählt werden müssen, erfordert es hier schon eine genauere Betrachtungsweise. Kommen bei den Berechnungen der Potentialunterschiede Werte < 1 heraus, müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden. Es muss geprüft werden, ob die Suspension durch die Zugabe von Schwerspat noch zusätzlich beschwert werden kann oder ob andere technische Hilfsmittel erforderlich sind. So besteht die Möglichkeit, einen speziellen Packer für Erdwärmesonden einzusetzen, mit dem die Fließbewegung von Wasser in der Bohrung unterbunden werden kann. Diese Fälle sind jedoch als absolute Ausnahme zu sehen und treten nur sehr selten auf. Selbst artesische Grundwasserleiter,

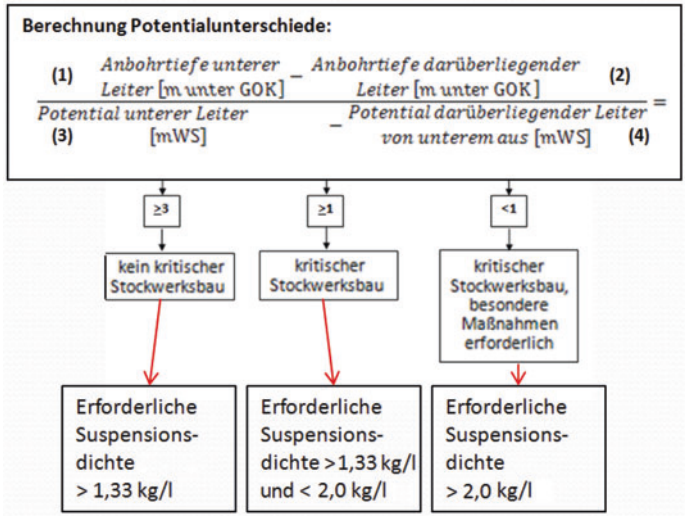


Abb. 14.13 Formel zur Berechnung von Potentialunterschieden, Erläuterung in Abb. 14.14

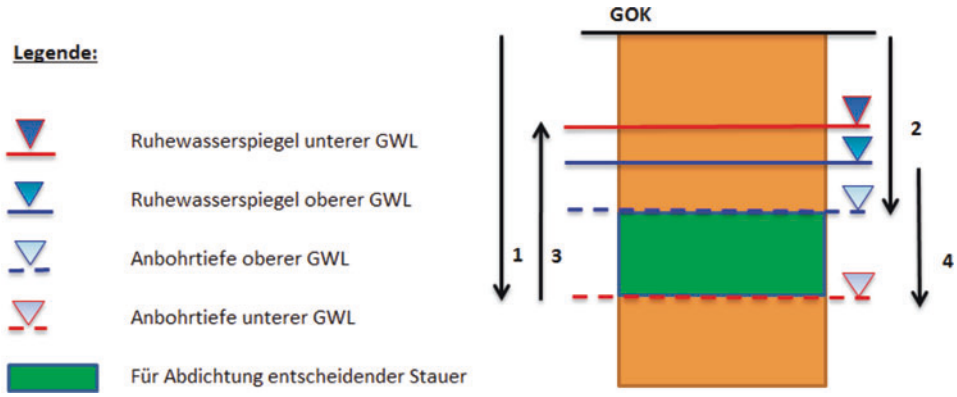


Abb. 14.14 Erläuterung zur Formel zur Berechnung von Potentialunterschieden in Abb. 14.13

welche nach dem Anbohren ohne Energiezuführung über Gelände auslaufen, können durch diese Formel bewertet werden.

Automatische Abdichtungsüberwachung

Für die automatische Abdichtungsüberwachung werden Systeme verwendet, die es ermöglichen, den Vorgang der Hinterfüllung und Abdichtung aufzuzeichnen und nachzuvollziehen. Ziel bei der Entwicklung dieser Systeme war es, während des Verpressvorgangs das eingebrachte Volumen aufzuzeichnen und den tatsächlichen Stand der Suspension in der

Bohrung feststellen zu können. Hierzu ist es erforderlich, Sensoren in die Bohrung einzubauen. So kann ein Nachweis über die gesamte Dauer der Hinterfüllung geführt werden. Neben der Qualitätssicherung soll dies vor allem dazu dienen, dass auch Bohrungen, bei denen die Suspension in bestimmten Horizonten nicht weiter aufsteigt, erkannt werden und durch den Einsatz von Stopfmitteln überbrückt werden können, ohne Gefahr zu laufen, dass vorhandene Grundwasserstauer nicht wieder hergestellt werden. Als Stopfmittel für klüftige Bereiche kann Sand oder Kies verwendet werden. Es ist drauf zu achten, dass es sich um gerundetes Material handelt.

Zur Überwachung des Abdichtungsvorgangs sind derzeit drei verschiedene Systeme auf dem Markt verfügbar (Stand: Frühjahr 2017). Hierbei werden zwei grundsätzlich verschiedene Messsysteme verwendet. Zwei Systeme nutzen das annähernd hydrostatische Verhalten der sich bewegenden Suspensionssäule und das dritte System benötigt eine spezielle Dotierung des Verpressmaterials, dessen Anwesenheit durch eine Messung der magnetischen Suszeptibilität festgestellt werden kann.

Das System CemTrakker arbeitet mit einer Messsonde, die in die Erdwärmesonde selbst oder in ein zusätzliches Rohr eingelassen werden kann und so nicht in direktem Kontakt zur Suspension stehen muss. Die Sonde kann das Vorhandensein des dotieren Materials durch die Rohrwandung hindurch messen. Bei den Dotierungen handelt es sich in meisten Fällen um Magnetit.

Der Einsatz einer dotierten Suspension ist grundsätzlich zu empfehlen. Nicht nur der Vorgang der Hinterfüllung kann so nachgewiesen werden, sondern es besteht die Möglichkeit, diesen Vorgang zu jeder Zeit zu wiederholen. So kann eine zusätzliche Sicherheit für Bauherren, Grundstückseigentümer und verantwortliche Personen generiert werden. Tab. 14.1 zeigt einen Vergleich der Systeme.

14.3.1.5 Druck und Durchflussprüfungen

Sowohl die Druckprüfung als Nachweis der Dichtheit der Erdwärmesonde als auch die Durchflussprüfung zum Nachweis des hydraulischen Widerstandes der Erdwärmesonde bilden die erforderlichen Kriterien zur erfolgreichen Abnahme und Übergabe des Gewerkes *Erdwärmesonde*.

Da es sich bei den Erdwärmesonden aus PE 100-RC um ein relativ weiches Material handelt, dehnt sich diese bei Druckbeaufschlagung aus. Daher handelt es sich bei der Druckprüfung um ein nicht ganz triviales Unterfangen. Daher werden auch die verschiedensten Regelwerke herangezogen und somit die unterschiedlichsten Vorgehensweisen angewendet. Die Schweizer Norm SIA 384/6 nimmt hier eine gewisse Vorreiterrolle ein. In dieser wurden die Gegebenheiten und Randbedingungen einer Erdwärmesonde bestmöglich berücksichtigt. Allerdings kann, selbst bei absolut korrekter und sogar automatisierter Druckprüfung, eine extrem kleine Undichtigkeit so nicht nachgewiesen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Ausführung in Anlehnung an die DIN V 4279-7. Grundsätzlich lässt sich jedoch festhalten, dass Druckprüfungen, die nach dem Kontraktionsverfahren ausgeführt werden, am ehesten zielführend sind. Dies bedeutet, dass die Erdwärmesonde zuerst über eine gewisse Zeit durch eine Druckbeaufschlagung vorbelastet wird. Es wird

Tab. 14.1 Vergleich der Messsysteme zur automatischen Abdichtüberwachung

System:	CemTrakker	Michalik MES 2	Sotronix DBO 3
Messprinzip	Magnetische Suszeptibilität, berührungslos	2 Drucksonden in definiertem Abstand, daher genäherte Dichtemessung	1 Drucksonde
Datenübertragung	Kabel oder Glasfaserstab mit Kupferlitzen	Glasfaserstab mit Kupferlitzen	Stahlkabel oder Glasfaserstab mit Kupferlitzen
Messung erfolgt wo?	In der Erdwärmesonde oder in zusätzlichem Rohr	Im Ringraum zwischen Erdwärmesonde und Bohrlochwand	An der Unterkante der Verpresslanze, also im Ringraum
Nachführung der Messonde erfolgt:	Händisch oder über Schubgerät	Händisch oder über Schubgerät	Hydraulisch über Schlauchhaspel der Verpresslanze
Was sieht der Geräteführer live?	• Tiefe des Sensors • Suszeptibilität um den Sensor • Eingebrachtes Suspensionsvolumen • Pumprate • Sondeninnendruck (evtl.)	• Tiefe der Sensoren • "Suspensionsdichte" im Bereich zwischen den Sensoren • Eingebrachtes Suspensionsvolumen • Pumprate • Sondeninnendruck • Druck über dem oberen Sensor (Wasserstand)	• Tiefe des Sensors • Druck über dem Sensor • Eingebrachtes Suspensionsvolumen • Pumprate
Verpressung erfolgt über	Verpressschlauch, Verpresslanze, (Verpressgestänge bedingt)	Verpressschlauch, Verpresslanze, Verpressgestänge	Verpresslanze
Überbrücken von Verlustzonen mit Stopfmitteln unter Zugabe von Suspension	Nur mit Lanze, Gestänge oder gezogenem Schlauch möglich	Nur mit Lanze, Gestänge oder gezogenem Schlauch möglich	Möglich, da Verpresslanze Voraussetzung

Tab. 14.1 (Fortsetzung)

System:	CemTrakker	Michalik MES 2	Sotronix DBO 3
Nachmessung direkt nach Ende der Verfüllung	Möglich und erwünscht	Wenige Meter möglich	Wenige Meter möglich
Nachmessung nach Aushärten der Suspension	Möglich und erwünscht	Nicht möglich	Nicht möglich
Vorteile	• Sensor kann sicher aus- und eingebaut werden, da innerhalb Erdwärmesonde • Nachmessungen möglich • Wetter hat keinen Einfluss	• "Dichtemessung" (Gewicht) in der Bohrung • Wasserspiegel beim Sondeneinbau wird registriert • Stopfmittel kann gelotet werden • mit allen Materialien möglich • Wasserstand kann problemlos beobachtet werden	• "Dichtemessung" (Gewicht) in der Bohrung bedingt möglich • Wasserspiegel beim Sondeneinbau wird registriert • Stopfmittel kann gelotet werden • Benötigt kein dotiertes Material
Nachteile	• Es wird teureres, dotiertes Verpressmaterial benötigt • Benötigt zum Loten von Stopfmittel zusätzliche Einrichtung • Wandstärke des Messrohrs hat Einfluss auf die Messung • Schwierigkeiten in Hilfsverrohrung	• Sonden müssen in den Ringraum eingebaut werden • keine Nachmessung	• Verpresslanze ist schwieriger handzuhaben • keine Nachmessung
Sonstiges	Gerät hat gleiche Möglichkeiten wie DBO		

also ein Druck aufgebaut und dieser durch Nachregelung über eine gewisse Zeit gehalten. Danach erfolgt eine Ruhephase, während der die Sonde unter Druck verschlossen bleibt. Hierdurch recken sich die langen Moleküle des Kunststoffes. Das Rohr weitet sich also aus und der Innendruck sinkt ab. Bei der nachgelagerten Hauptprüfung wird der Sondeninnendruck schlagartig abgesenkt. Die vorgespannten Moleküle ziehen sich nun wieder zusammen und der Sondeninnendruck steigt an (Kontraktion). Der weitere Verlauf wird nun über eine gewisse Zeit beobachtet und darf nur einem definierten Druckabfall unterliegen, um die Prüfung zu bestehen. Zu Diskussionen führen der erforderliche Prüfdruck und der Zeitpunkt der Druckprüfung. Neueste Überlegungen und Untersuchungen zeigen, dass die Belastung und damit einhergehende Dehnung der Sondenrohre bleibende Schäden an der bereits im Abbindevorgang befindliche Suspension hinterlassen können. Die Gefahr besteht darin, dass durch das Zusammenziehen der Sondenrohre nach der Druckprüfung ein Ringspalt entsteht, der durch die bereits angesteifte Suspension nicht mehr vollständig geschlossen werden kann. Um genauere Aussagen zu treffen, wie lange die Suspensionen diese Verformung schadlos ausgleichen können, wurden die einschlägigen Hersteller der Suspensionen zu Angaben von Zeitspannen zu befragt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die Hersteller empfehlen, die Suspensionen schon direkt nach dem Einbau nicht mehr als über das 1,5fache des späteren Betriebsdruckes der Anlage zu belasten. Dies bringt ausführende Unternehmen in die missliche Lage, dass diese das Gewerk gerne mit der Abnahmeprüfung übergeben wollen, auf der anderen Seite aber der Abdichtung des Ringraumes eine ungleich höhere Bedeutung zugemessen werden muss. Daher wird sich die Fachwelt über ein Verfahren verständigen müssen, das beiden Anforderungen Rechnung trägt. Eine Möglichkeit wäre die Druckprüfung vor oder während der Hinterfüllung auszuführen, dies führt jedoch wieder zu andren Konflikten. Grundsätzlich ist jedoch der Funktion der Abdichtung eine weitaus höhere Wichtigkeit zuzuordnen.

Die Durchflussprüfung hingegen liefert ohne großen Aufwand ein sicheres und unmissverständliches Ergebnis. Hierzu wird jeweils am Ein- und am Ausgang der Erdwärmesonde je ein Manometer zur Druckmessung aufgebaut und durch die Erdwärmesonde Wasser mit gleichbleibender Durchflussrate gepumpt. Die Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausgang im Zusammenhang mit der Durchflussrate kann dann zum bewerten des hydraulischen Widerstands hergenommen werden. Diese Werte können dann mit Durchflussdiagrammen, in denen die Druckverluste nach Länge und Durchmesser der Erdwärmesonde aufgetragen sind, verglichen werden.

14.3.2 Koaxiale Speichersonden

Speichersonden zeichnen sich dadurch aus, dass ein wesentlich größerer Inhalt an Wärmeträgerflüssigkeit als Speicher zur Verfügung steht. Je nach eingesetzter Sonde kann dies bedeuten, das im Vergleich zur Doppel-U-Sonde die 6fache Menge Fluid als Speicher zur Verfügung steht. Daher findet eine zeitlich entkoppelte und gleichmäßigere Belastung des Untergrundes statt.

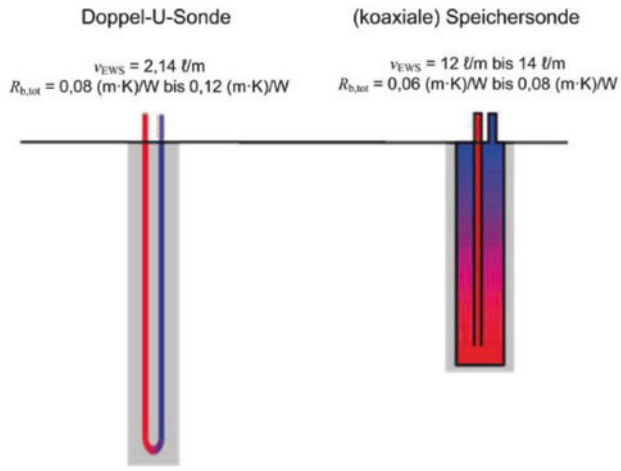


Abb. 14.15 Vergleich Sondentechnik. (Beispiel VDI 4640 Blatt 2)

14.3.2.1 Die Erdwärmesonde

Das Volumen der Speichersonde ist mit ca. 14 l pro Meter Sondenrohr um ca. den Faktor 6–7 größer als das spezifische Volumen von konventionellen DA32 mm Doppel-U-Sonden mit 2,14 l/m (Abb. 14.15).

Im Unterschied zu konventionellen Sondensystemen werden mit sogenannten Speichersonden aufgrund des großen spezifischen Volumens die Leistungsanforderungen der Wärmepumpe nicht direkt auf den Untergrund übertragen. Es erfolgt vielmehr eine gewisse Entkopplung des Wärmepumpenbetriebs vom Untergrund. Durch die Speichersonde wird somit ein weitgehend gleichmäßiger Wärme- bzw. Kälteentzug erreicht, sodass eine geringere Sondenlänge ausreicht, um kurzzeitige Spitzenleistungen aufzunehmen. Des Weiteren weist die Speichersonde einen geringeren Wärmeübergangswiderstand durch eine doppelt so große effektive Wärmetauscherfläche auf. Die einzelnen genannten Punkte erlauben in ihrer Gesamtheit eine optimierte Auslegung von Speichersonden im Vergleich zu konventionellen Sondensystemen.

Eine neue Sondengeneration von Geokoax sind die koaxialen Speichersonden mit integrierten Verwirbelungskörpern und mit einem Außendurchmesser von 140 mm (Abb. 14.16). Diese Speichersonden generieren durch ihre Geometrie und ihre physikalischen Eigenschaften (permanente turbulente Strömung) eine höhere Effizienz als die herkömmlichen Doppel-U-Sonden.

Abb. 14.16 geoKOAX Speichersonde

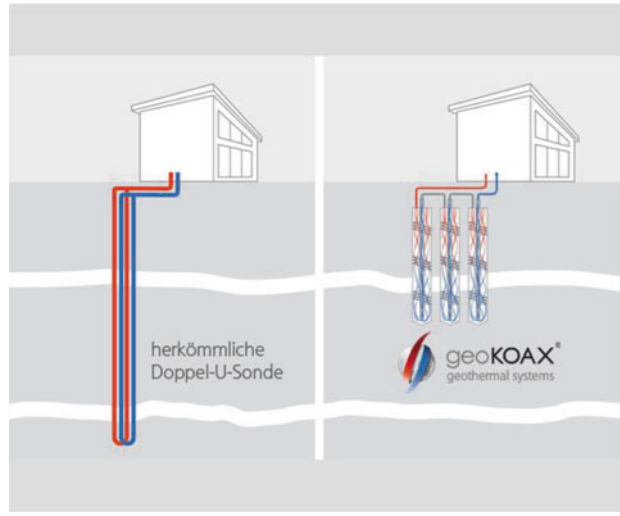


Abb. 14.17 Keine hydraulische Verbindung von Grundwasserstockwerken durch geringere Bohrtiefen

Diese Technologie kann im Idealfall mit weniger Bohrmetern als herkömmliche Doppel-U-Erdsondensysteme regelrecht oberflächennah eingesetzt werden und macht die Nutzung der klimaschonenden Erdwärme nahezu überall möglich. Ihre deutlich höhere Effizienz in bestimmten Geologien ermöglicht es, entweder weniger Bohrtiefe zu beanspruchen oder entsprechend weniger Bohrpunkte. Somit kommt es zu weniger und geringeren Eingriffen in das Erdreich und den Untergrund.

Insbesondere unter erschwerten Bedingungen (kritischer Untergrund, schlechte Leitfähigkeit, Grundwasserträger), in denen die Genehmigungsbehörden Erdwärmeanlagen auf Basis Doppel-U häufig nicht genehmigen können, erweisen sich die koaxialen Speichersonden als sehr zuverlässige „Ausweichsysteme“ (Abb. 14.17).

14.3.2.2 Ringraum, Abstandshalter und Zentrierungen

Grundsätzlich sollte wie bei den Doppel-U-Erdwärmesonden die Bohrung aus thermischen Gründen nicht größer wie nötig hergestellt werden. Da es sich aber um relativ gerade Rohre handelt, die sich zentrisch in der Bohrung ausrichten lassen, empfiehlt es sich hier, Zentrierungen an der Sonde anzubauen und so einen gleichmäßigen Ringraum zu gewährleisten. Der Bohrdurchmesser muss darauf abgestimmt werden, dass in den verbleibenden Ringspalt ein Injektionsrohr zur Hinterfüllung im Kontraktorverfahren sicher eingebaut werden kann.

14.3.2.3 Sondeneinbau

Aufgrund der Größe und der Beschaffenheit der Sondenrohre können die Sonden nicht aufgerollt am Stück angeliefert, sondern müssen auf der Baustelle verschweißt werden. Je nach Platzverhältnissen werden die Rohre dann ausgelegt, verschweißt und auf einmal eingebaut. Alternativ könnten die Rohre sukzessive verbunden und nach und nach in die

Bohrung eingebaut werden. Da nach dem Verschweißen von HDPE die Rohre erst nach einer Abkühlzeit belastet werden können, muss abgewogen werden, was für die entsprechende Baustelle sinnvoll ist. Der Einbau ist dementsprechend aufwendig und nicht ganz einfach.

14.3.2.4 Ringraumhinterfüllung

Werden Geokoax oder auch andere Speichersonden nicht nur im obersten Grundwasserleiter eingebaut und wird daher ein Grundwasserstauer durchteuft, so muss der Ringraum auch hinterfüllt und somit abgedichtet werden. Da es sich bei den Sonden um ein einzelnes Rohr in der Bohrung handelt, muss bei der Planung des Bohrdurchmessers berücksichtigt werden, dass das Injektionsrohr im verbleibenden Ringraum eingebaut werden muss. In jedem Fall muss jedoch im Vorfeld mit der Genehmigungsbehörde abgestimmt werden, wie die Hinterfüllung bzw. Abdichtung zu erfolgen hat.

14.3.2.5 Druck- und Durchflussprüfungen

Druck- und Durchflussprüfungen können analog zu den Prüfungen von Doppel-U-Erdwärmesonden ausgeführt werden. Angaben zur abgelassenen Wassermenge bei der Kontraktionsprüfung und zum hydraulischen Widerstand müssen bei den Herstellern der Sonden abgefragt werden. Es ist zu beachten, dass die Werksdruckprüfung und auch eine werkseitige Schweißung nicht stattfinden können, sondern auf den Baustellen ausgeführt werden müssen. Hier muss die Qualität der Ausführung durch spezielle Einrichtungen sichergestellt werden.

14.3.3 Direktverdampfersonden

Von Direktverdampfersonden oder auch Phasenwechselsonden oder Thermosiphon ist die Rede, wenn das Medium, mit dem die Energie transportiert wird, direkt im Boden verdampft und somit gasförmig zur weiteren Nutzung bereitsteht. Der normalerweise in der Wärmepumpe stattfindende Vorgang wird also direkt in die Erde verlegt. Hierdurch muss das Kältemittel der Wärmepumpe jedoch bis in den Wärmetauscher auf der Erdwärmesonde zirkulieren.

14.3.3.1 Die Technik

Die Bohrungen werden analog zu den Bohrungen für Doppel-U-Erdwärmesonden ausgeführt. Je nach Ausführung der Sonden können die Bohrungen im Durchmesser etwas kleiner gewählt werden. Der große Vorteil der Direktverdampfung besteht darin, dass für den Energietransport keine Pumpen oder sonstigen Teile, die externe Energie verbrauchen, benötigt werden. Als Wärmeträgermedium wird in der Regel CO_2 verwendet. Dies hat den weiteren positiven Effekt, dass keine Stoffe in den Untergrund eingebracht werden, die beim ungewollten Austritt zu nachteiligen Veränderungen im Grundwasserhaushalt führen können. So besteht die Möglichkeit, die Technik auch in Wasserschutzgebieten

zu verwenden, in denen herkömmliche Erdwärmesonden nicht genehmigungsfähig wären. Ein weiterer Effizienzgewinn wird daraus generiert, dass keine internen Wärmeverluste zwischen Vor- und Rücklauf vorhanden sind.

14.3.3.2 Die Erdwärmesonde

Bei den eingebauten Sonden gibt es zwei am Markt verbreitete Systeme. Dies ist zum einen ein System mit drei oder vier Kupferrohren in einer Bohrung (System Heliotherm, Abb. 14.18) und zum anderen ein Edelstahl-Wellrohr (System Brugg, Abb. 14.19). Die Materialauswahl erfolgt hier aus den hohen erforderlichen Drücken in den Sondenrohren von bis zu 70 bar. Da der Wärmetransport, bedingt durch den Aufstieg des erwärmten Gases nur vertikal erfolgen kann, ist es systembedingt notwendig, dass jede Sonde einen zugänglichen Wärmetauscher erhält, der am Sondenkopf aufgebaut ist. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Rohrwerkstoffe begünstigt natürlich den Wärmetransport und führt so auch wieder zu einer höheren Effizienz.

14.3.3.3 Ringraum, Abstandshalter und Zentrierungen

Analog zu allen anderen Techniken, um die Erdwärme zu gewinnen, ist auch bei den Direktverdampfersonden der Bohrdurchmesser und somit der Ringraum auf die gewählte Erdwärmesonde abzustimmen. Zusätzlich zur Erdwärmesonde muss natürlich genug Platz vorhanden sein, um Injektionsrohre und andere Einbauteile aufzunehmen. Auf Abstandshalter zur Trennung der Rohre untereinander kann gänzlich verzichtet werden, da bei den

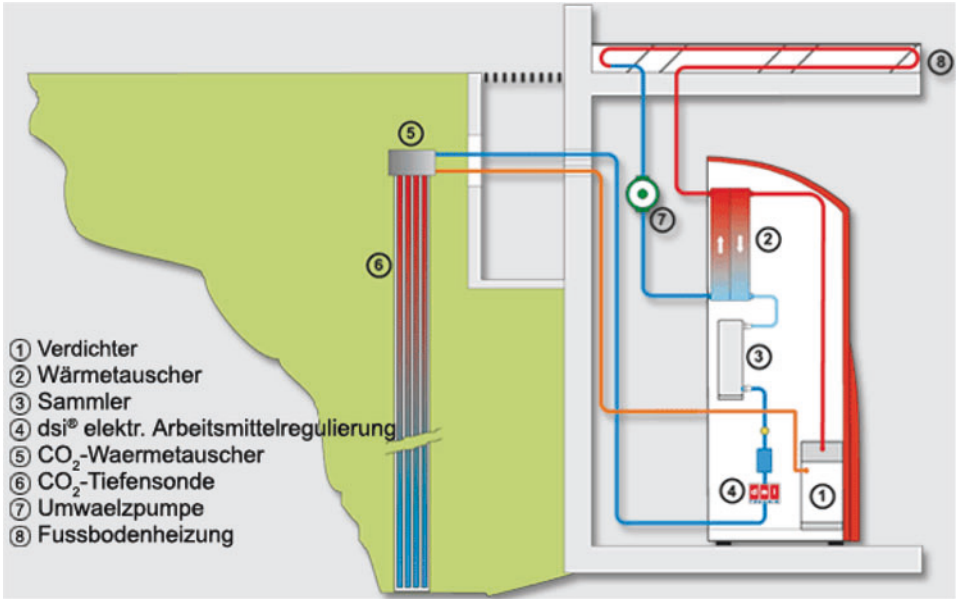


Abb. 14.18 Systemaufbau CO_2-Sonde Heliotherm. (© Heliotherm)

Abb. 14.19 Edelstahl-Wellrohrsonde mit Einbaugewicht und Stahlseil

Kupferrohren kein thermischer Kurzschluss zwischen den Rohren entstehen kann. Beim Edelstahl-Wellrohr ist kein zweites Rohr vorhanden und daher ein Abstandshalter überflüssig. Beim Thema Zentrierungen ist sich die Fachwelt, wie bei den Doppel-U-Sonden, uneinig. Da Zentrierungen negative Auswirkungen auf die Abdichtung haben können und dem Einbau von Schüttgütern negativ entgegenstehen, ist der Einbau nicht unbedingt zu empfehlen.

14.3.3.4 Sondeneinbau

Sowohl die Kupferrohre als auch das Edelstahl-Wellrohr werden auf Rollen angeliefert und können über eine Haspel in die Bohrung eingebaut werden. Zu beachten ist, dass die Rohre zum Einbau nicht mit Wasser gefüllt werden können und daher im wassergefüllten Bohrloch einen Auftrieb erzeugen. Einbaugewichte, die in der Bohrung belassen werden, sind zum sicheren Einbau unerlässlich. Diese müssen so bemessen werden, dass dem gesamten Auftrieb entgegengewirkt werden kann. Da dies vor allem im Falle der Edelstahl-Wellrohre zu großen Gewichten führt, die zu Beginn des Einbaus komplett

gehalten werden müssen, empfiehlt es sich, ein zusätzliches Stahlseil an dem Gewicht zu befestigen und kontrolliert über eine Seilwinde abzulassen.

14.3.3.5 Ringraumhinterfüllung

Die Hinterfüllung des Ringraums ist, trotz der Verwendung von für den Wasserhaushalt unbedenklichem CO_2 als Wärmeträger, mit gleich hohen Qualitätsansprüchen auszuführen wie bei allen anderen Erdwärmesonden. Denn auch hier muss zum einen der Wärmefluss vom Gebirge zur Sonde, noch viel wichtiger jedoch die Abdichtung einzelner Grundwasserstockwerke zueinander gegeben sein. Hierzu wurde das Vorgehen in Abschn. 14.3.1.3 näher betrachtet und kann analog angewendet werden. Bezüglich der automatischen Abdichtungsüberwachung mit dem System CemTrakker ist zu beachten, dass die Messsonde nicht in den Metallrohren eingebaut werden kann, da die Suspension nicht durch die Rohrwand detektiert werden kann.

14.3.3.6 Druck- und Durchflussprüfungen

Die Druckprüfung der einzubauenden Rohre sollte bereits werksseitig bei der Herstellung erfolgen. Eine Beschädigung beim Einbau ist aufgrund der Robustheit der metallischen Rohrwerkstoffe nahezu auszuschließen und daher kann auf weitere Druckprüfungen durch den Bohrunternehmer beim Einbau oder direkt danach verzichtet werden. Druckprüfungen müssen aufgrund der hohen Drücke und der Verwendung von Gasen durch speziell geschultes und ausgebildetes Personal erfolgen und finden dann in der Regel bei der Installation der Wärmetauscher am Sondenkopf statt. Systembedingt entfallen Durchflussprüfungen komplett.

Literatur

Hessel, J.: PE 100- RC – Ein PE 100 mit erweitertem Anwendungspotential. 3R International (47), 189–193. (2008)

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden Baden-Württemberg. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart (2011)

Peterlunger, A: Max Ehrbar Pumpenlose Erdwärmesonde Schlussbericht http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000008165.pdf&name=240113.pdf (2004)

Rohner, E., Geowatt AG: Anpassen der Druckprüfung nach DIN V 4279-7 für Erdwärmesonden aus Polyethylen 2005 http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009024.pdf&name=000000250094.pdf

Riegger, M: Abschlussbericht zu dem Vorschungsvorhaben EWSPLUS http://www.solites.de/download/literatur/2013-09-10%20EWSplus%20Abschlussbericht.pdf (2013)

VDI 4640 Blatt 2 Entwurf Mai 2015

Thermisch aktivierte Bauteile

15

Sylvia Kürten, David Koppmann und Renate Pechnig

Inhaltsverzeichnis

15.1 Einleitung 478
15.2 Typen thermisch aktivierter Bauteile 479
15.2.1 Energiepfähle 479
15.2.2 Energiewände und Bodenplatten 484
15.2.3 Thermische Aktivierung von Tunnelbauwerken 487
15.2.4 Spezialsysteme thermisch aktivierter Bauteile 491
15.3 Besondere Randbedingungen bei thermisch aktivierten Bauteilen 494
15.3.1 Randbedingungen für den Anlagenbetrieb 494
15.3.2 Randbedingungen für die Bemessung 495
15.3.3 Urban Heat Island Effect 498
15.3.4 Einfluss des Grundwassers 499
15.4 Auslegung und Bemessung thermisch aktivierter Bauteile 500
15.4.1 Berechnungsansätze für Energiepfähle 501
15.4.2 Berechnungsansätze für flächige thermisch aktivierte Bauteile 504
Literatur 507

Sylvia Kürten (✉)
Ingenieurbüro Gell & Partner GbR, Hansmannstraße 19, 52080 Aachen, Deutschland
e-mail: s.kuerten@gell-partner.de

David Koppmann
Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland
e-mail: koppmann@geotechnik.rwth-aachen.de

Renate Pechnig
Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Lütticher Straße 32, 52064 Aachen, Deutschland
e-mail: r.pechnig@geophysica.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_15

Zusammenfassung

Die thermische Nutzung des Untergrundes mithilfe von erdberührenden Bauteilen (thermisch aktivierten Bauteilen) stellt eine zukunftsorientierte Möglichkeit der Energiegewinnung im Wärmesektor dar. Durch die Integration von Absorberrohren in ohnehin erforderliche Bauteile können die Installationskosten im Vergleich zu herkömmlichen Systemen der Oberflächennahen Geothermie deutlich reduziert werden. Während der Energiepfahl weltweit bereits eine weite Verbreitung findet, ist die Nutzung von flächigen Bauteilen bisher nur vereinzelt bekannt, obwohl Wände, Bodenplatten oder Tunnel über große erdberührende Flächen und damit ein großes regeneratives Energiepotential verfügen.

Die für Erdwärmesonden bekannten und gängigen Rechenmodelle können nur bedingt auf thermisch aktivierte Bauteile übertragen werden. So weisen Energiepfähle im Vergleich zu Erdwärmesonden ein deutlich größeres Verhältnis von Durchmesser zu Länge auf. Bei flächigen Bauteilen ist darüber hinaus ein nicht rotationssymmetrischer Wärmetransport zwischen Bauteil und Untergrund zu berücksichtigen. Da thermisch aktivierte Bauteile vor allem oberflächennah eingesetzt werden, sind nicht zu Letzt andere Randbedingungen (jahrzeitlich schwankende Temperaturverteilung im Untergrund, unterirdische Wärmequellen, gegenseitige Beeinflussung von benachbarten Bauteilen etc.) zu beachten.

Für eine effiziente und wirtschaftliche Anlagenauslegung sollten thermisch aktivierte Bauteile stets mithilfe von ganzheitlichen Berechnungsansätzen dimensioniert werden. Die Verwendung von Erfahrungswerten ist lediglich in einer ersten Machbarkeitsstudie zu empfehlen. In den letzten Jahren sind daher vermehrt auch Berechnungsansätze und Modelle für thermisch aktivierte Bauteile entwickelt bzw. aufgestellt worden, die durch einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad und eine unterschiedliche Anwenderfreundlichkeit gekennzeichnet sind. Eine Auswahl wird im vorliegenden Kapitel vorgestellt, mit dem Ziel, dem planenden Ingenieur einen Überblick über den Stand der Technik zu verschaffen und das Einsatzgebiet bzw. die Ausweitung von thermisch aktivierten Bauteilen auch zukünftig weiter zu steigern.

Schlüsselwörter

Thermisch aktivierte Bauteile · gekoppelter Heiz- und Kühlbetrieb · Energiepfähle · Energiewände · Bodenplatten · Tunnel

15.1 Einleitung

Als thermisch aktivierte Bauteile werden Bauteile bezeichnet, bei denen Absorberrohre in statisch oder baupraktisch erforderliche Bauteile integriert werden. Sie stellen eine Sonderform geschlossener geothermischer Systeme dar. Im Vergleich zu herkömmlichen Systemen der oberflächennahen Geothermie wie Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren können thermisch aktivierte Bauteile ohne erheblichen Zusatzaufwand realisiert

werden und zeichnen sich daher durch geringe Investitionskosten aus. Je nach Art des aktivierten Bauteils verfügen sie zudem über eine große erdberührende Fläche und dadurch gleichzeitig über ein großes aktivierbares Bodenvolumen.

Der Ursprung thermisch aktivierter Bauteile liegt in der Schweiz, wo zu Beginn der 1980er Jahre Betonbodenplatten thermisch aktiviert wurden. Darauf folgten Pfähle (1984) und Schlitzwände (1996) (Brandl 2006). Die Verwendung von thermisch aktivierten Betonbauteilen hat sich seitdem weltweit bewährt, wobei der Energiepfahl das am weitesten verbreitete System darstellt. Auch für die thermische Aktivierung von flächigen Bauteilen wie Bodenplatten oder Wänden findet sich eine Reihe von Ausführungsbeispielen. Neuere Entwicklungen beschäftigen sich seit Beginn der 2000er Jahre mit der thermischen Aktivierung von Tunnelbauwerken oder Abwasserkanälen. Darüber hinaus existieren Systeme zur Eisfreihaltung von Verkehrsflächen.

Prinzipiell können alle erdberührenden Bauteile zur thermischen Nutzung des Untergrunds genutzt werden. In der Praxis werden daher häufig verschiedene thermisch aktivierte Bauteile gleichzeitig eingesetzt (Tab. 15.1). So können zum Beispiel Gründungspfähle von Gebäuden, Bodenplatten und die für Tiefbauarbeiten notwendigen Verbauwände (Bohrpfahlwand, Spundwand oder Schlitzwand) genutzt werden.

Thermisch aktivierte Bauteile können im gekoppelten Heiz- und Kühlbetrieb eingesetzt werden und können damit auch dem stetig steigenden Kältebedarf von (Büro-)Gebäuden gerecht werden. In den letzten Jahren wurden alleine im Hochhausbau thermisch aktivierte Bauteile in weltweit über 1000 Projekten eingesetzt (Adam und Markiewicz 2009). In Deutschland ist der Maintower in Frankfurt aus dem Jahr 2000 das erste Projekt mit einer großflächigen Anwendung von Energiepfählen (Hude und Sauerwein 2007). Die ersten Anwendungen im Tunnelbau sind aus Österreich bekannt (Brandl 2006). Ein Auszug über bedeutende Projekte mit thermisch aktivierten Bauteilen findet sich in Tab. 15.1.

Die folgenden Abschnitte liefern einen Überblick zum Stand der Technik sowie zu den aktuellen Entwicklungen im Bereich der thermisch aktivierten Bauteile. Darüber hinaus wird ein Einblick in die Anforderungen und Randbedingungen der Berechnung und Auslegung thermisch aktivierter Bauteile gegeben. In diesem Zusammenhang werden ausgewählte Berechnungsansätze bzw. numerische Modellansätze vorgestellt. Die hier vorgestellte Recherche basiert in weiten Teilen auf der Dissertation von Kürten (2014) zur thermischen Nutzung des Untergrundes mit flächigen thermisch aktivierten Bauteilen.

15.2 Typen thermisch aktivierter Bauteile

15.2.1 Energiepfähle

Steht oberflächennah kein tragfähiger Untergrund an, müssen die Bauwerkslasten über Gründungspfähle in tieferliegende tragfähige Schichten eingeleitet werden. Wenn diese Gründungspfähle thermisch aktiviert werden, werden sie Energiepfähle genannt. Als Absorberrohre werden analog zu Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren

Tab. 15.1 Tab. Ausgewählte Ausführungsbeispiele für thermisch aktivierte Bauteile. (Kürten 2014)

Projekt	Jahr	Installiertes System	Leistung
Industriegebäude Lidwil, Altendorf, Schweiz	1993	120 Energiepfähle (D = 0,45 m, L = 17 m)	160 kW (Heizen)
Reha-Zentrum, Bad Schallerbach	1994	143 Energiepfähle (D = 1,2 m, L = 20 m)	270 kW Heizen und Kühlen
Generali Office Tower, Wien	1995	6000 m^2 Schlitzwand	600 kW (Heizen) 400 kW (Kühlen)
Maintower, Frankfurt	2000	112 Energiepfähle (D = 1,5 m, L = 30 m) 101 Energiepfähle/ Bohrpfahlwand (D = 0,9 m, L = 35 m)	500 kW Heizen und Kühlen
Strabag Office Tower, Wien	2002	242 Energiepfähle (D = 0,65 m, L = 15 m) 6000 m^2 Bodenplatte	1680 kW (Heizen) 2026 kW (Kühlen)
Columbus Center, Wien	2002	300 Energiepfähle (D = 1,2 m, L = 7–20 m) 12.400 m^2 Schlitzwand	370 kW (Heizen) 1400 kW (Kühlen)
Lainzer Tunnel, Wien	2002	60 Energiepfähle (D = 1,2 m, L = 17,1 m)	150 kW (Heizen)
Solar Center, Berlin	2003	196 Energiepfähle	107 kW (Heizen) 150 kW (Kühlen)
Dock Midfield, Flughafen, Zürich	2003	306 Energiepfähle (D = 0,9–1,5 m; L = 27 m)	400 kW (Heizen) 330 kW (Kühlen)
U-Bahnlinie U2, Wien	2004	17.292 m^2 aktivierte Fläche (Schlitzwand, Bodenplatte, Pfähle)	450 kW (Heizen) 231 kW (Kühlen)
Businesscenter, Rostock	2004	264 Energiepfähle (B = 0,35 m, L = 19 m)	220 kW Heizen und Kühlen
Palais Quartier, Frankfurt	2010	262 Energiepfähle (D = 1,5 m, L = 30 m) 130 Energiepfähle/ Bohrpfahlwand (D = 1,9 m, L = 27 m)	913 kW Heizen und Kühlen

Kunststoffrohre auf PE-Basis verwendet, wobei in der Regel das robustere, vernetzte PE-Xa mit hoher Dichte (PE-HD) verwendet wird. Der Durchmesser der Rohre liegt im Allgemeinen zwischen 16 mm und 32 mm (Fromentin et al. 1997; Uponor 2012).

Der Energiepfahl stellt das am weitesten verbreitete thermisch aktivierte Bauteil dar. Die Anzahl der ausgeführten Energiepfahlanlagen wächst zudem weltweit stetig an. Die Anzahl der Energiepfähle stieg zum Beispiel in Österreich von ca. 5500 im Jahr 1994 auf

fast 23.000 im Jahr 2004 und in Großbritannien von 150 im Jahr 2005 auf ca. 2600 im Jahr 2010 (Smith 2011; Brandl 2006). Für Deutschland liegen keine aktuellen Statistiken vor, jedoch ist die Verwendung von Energiepfählen aus verschiedenen Projekten bekannt (vgl. Tab. 15.1) (z. B. Katzenbach 2008; Schröder und Hanschke 2003).

In Europa werden vor allem Stahlbetonpfähle als Energiepfähle eingesetzt (z. B. SIA D0190 2005; Brandl 2006); in Asien steht dagegen die Verwendung von Stahlpfählen im Vordergrund (Morino und Oka 1994; Nagano 2005; Katsura 2009; Hassani et al. 2014). Während bei Betonpfählen die Absorberrohre am Bewehrungskorb befestigt werden (siehe Abb. 15.1), ist dies bei Stahlpfählen nicht möglich. Daher werden vor allem Stahlhohlpfähle zur thermischen Aktivierung genutzt. Hierbei kann entweder der gesamte Pfahl als Absorberrohr wirken, in dem der Hohlraum komplett mit einem Wärmeträgermedium gefüllt wird. Alternativ können separate Absorberrohre in den (wassergefüllten) Hohlquerschnitt eingelassen werden (Nagano 2005). Die Verwendung von Stahlpfählen als Energiepfähle bildet in Deutschland (und in Europa) noch die Ausnahme, sodass im Folgenden der Fokus auf Energiepfähle aus Stahlbeton gelegt wird.

In Europa werden vorrangig Betonrammpfähle (Fertigteilpfähle) oder Betonbohrpfähle (Ortbetonpfähle) als Energiepfähle eingesetzt. Stahlbetonrammpfähle weisen in Deutschland üblicherweise quadratische Querschnitte mit einer Kantenlänge zwischen 0,2 m und 0,45 m bei Pfahllängen zwischen 6 m und 25 m auf (EA-Pfähle 2012). Die aktivierbare Pfahllänge ist jedoch von der maximalen Transportlänge abhängig, da eine vertikale Kopplung bei Energiepfählen in der Regel nicht durchgeführt wird (SIA D0190 2005). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Mehraufwand zur Erreichung einer ausreichenden Dichtigkeit während des Rammens überproportional steigt (SIA D0190 2005).

Die Installation der Absorberleitungen bei Ortbetonpfählen ist deutlich schadensanfälliger. Daher werden überwiegend solche Bohrpfähle als Energiepfähle ausgebildet, bei

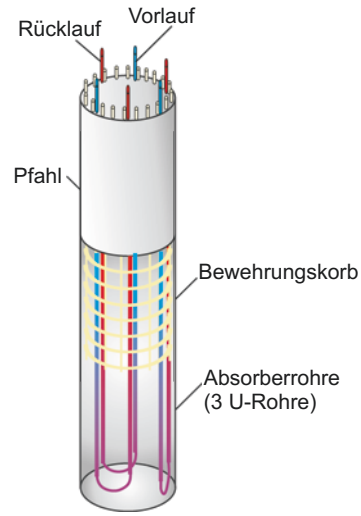


Abb. 15.1 Prinzip eines Energiepfahls (beispielhaft für 3 U-Rohre als Absorberrohre). (Kürten 2014)

denen ein relativ kontrolliertes Einbringen des Bewehrungskorbs inklusive der Leitungen möglich ist. Ortbetonpfähle können jedoch im Vergleich zu Fertigteilpfählen mit deutlich größeren Durchmessern (0,3 m–3,0 m) und Längen von bis zu 60 m hergestellt werden (EA-Pfähle 2012). Bei großen Pfahllängen kann es sein, dass mehrere Bewehrungskörbe miteinander verbunden werden müssen. Dabei ist darauf zu achten, dass möglichst wenige Rohrverbindungen zwischen den Körben herzustellen sind.

Bei der Verlegung der Absorberrohre im Pfahl sind verschiedene Aspekte zu beachten. Prinzipiell sollten die Rohre möglichst nah am Untergrund angebracht werden, ohne dabei die erforderliche Betonüberdeckung des Bewehrungskorbs zu beinträchtigen. Weiterhin sollten die Absorberrohre regelmäßig auf den Pfahlmantel verteilt werden, um eine gleichmäßige thermische Belastung des Pfahls zu erreichen (SIA D0190 2005; Morino und Oka 1994). Prinzipiell können die Absorberrohre im Pfahl U-, mäander- oder spiralförmig verlegt werden. Die Verwendung von mehreren U-Rohren (vgl. Abb. 15.1), die durch einen Verteiler am Pfahlkopf zusammengeführt werden, erhöht infolge der Redundanz die Ausfallsicherheit des Systems und stellt von den drei vorgestellten Varianten die am weitesten verbreitete dar (Kaiser und Beldermann 2013). Die Leitungsführung in W-Form (Rohrmäander) ist im Vergleich zu U-Schlaufen thermisch effizienter. Die konstruktive Ausbildung (Biegeradien etc.) und die Entlüftung des Systems sind jedoch deutlich schwieriger (Gao et al. 2008). Durch eine spiralförmige Verlegung der Leitungen (z. B. Cui et al. 2011; Kaiser und Beldermann 2013) kann die Wärmeübertragungsfläche maximiert werden, sodass die Spitzenleistung des Energiepfahls im Vergleich zu einer Verlegung von drei U-Rohren im Pfahl um ca. 20 % erhöht werden kann (Zarrella et al. 2013). Die Entlüftung der Leitungen ist im Vergleich zu einer W-förmigen Verlegung deutlich einfacher und auf die Installation eines Rohrverteilers am Pfahlkopf kann verzichtet werden. Die Druckverluste sind dagegen im Vergleich zu U-Rohren deutlich höher. Darüber hinaus sind bei der Verlegung die Mindestbiegeradien einzuhalten, was besonders bei kleinen Pfahldurchmessern nicht immer gewährleistet werden kann.

Bei einer Verwendung von mehreren U-Rohren im Pfahl ist die Anzahl der Rohre von energetischen und konstruktiven Aspekten abhängig. Aus konstruktiver Sicht wird die Anzahl vor allem durch den Pfahldurchmesser begrenzt, da der Querschnitt nicht durch zu viele Rohre geschwächt werden darf. Nach Angaben der Firma Uponor (2012) kann die Anzahl der Rohrschleifen in Abhängigkeit des Durchmessers wie folgt gewählt werden:

- $D < 80$ cm: 4 bis 6 U-Rohre
- 90 cm $< D <$ 120 cm: 6 bis 8 U-Rohre
- 120 cm $< D <$ 180 cm: 8 bis 12 U-Rohre

Aus energetischer Sicht bedeutet eine größere Rohranzahl einen kleineren Wärmeübergangswiderstand für das Gesamtsystem (SIA D0190 2005; Loveridge und Powrie 2014a). Die Reduzierung des Widerstands verläuft jedoch nicht linear, sodass ab einer bestimmten Rohranzahl keine nennenswerte Verbesserung des Bohrlochwiderstandes bei der Installation weiterer Rohrschleifen zu erwarten ist. Infolge einer erhöhten Rohranzahl steigen

zudem die gegenseitige Beeinflussung der Rohre (thermischer Kurzschluss) und die Anforderungen an den hydraulischen Betrieb des Systems (Reduzierung der Druckverluste und Gewährleistung einer ausreichenden Entlüftung). SIA D0190 (2005) empfiehlt in diesem Zusammenhang bei Massivpfählen unabhängig vom Pfahldurchmesser eine Verwendung von maximal vier U-Rohren pro Pfahl. In GSHPA (2012) wird ein Mindestabstand von 5 cm zwischen den verschiedenen U-Rohren sowie zwischen Vor- und Rücklauf empfohlen. Die optimale Rohranordnung und Rohranzahl ist somit von vielen verschiedenen Faktoren abhängig, sodass für jedes Projekt eine Einzelfallbetrachtung erfolgen sollte (GSHPA 2012).

Während bei Erdwärmesonden oft einzelne Sonden zum Einsatz kommen, werden Gebäude immer auf mehreren Pfählen gegründet. Die Anordnung und der Abstand der Pfähle ergeben sich dabei ausschließlich nach statischen und nicht nach thermischen Aspekten. Eine gegenseitige thermische Beeinflussung der Pfähle kann jedoch erst vernachlässigt werden, wenn das Verhältnis von Pfahlabstand zu Durchmesser (a_{Pfahl}/D) größer als das von Pfahllänge und Durchmesser (L/D) ist (Loveridge und Powrie 2014b). Bei einem üblichen L/D-Verhältnis von ca. 20 bei Energiepfählen wäre damit ein Pfahlabstand von $20 \cdot D$ erforderlich. Dieser Abstand lässt sich in der Praxis nicht realisieren, weshalb eine gegenseitige Beeinflussung meist nicht zu vermeiden ist. Aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht kann es daher günstiger sein, nicht jeden Pfahl einer Gruppe zu aktivieren (Loveridge und Powrie 2014b). Darüber hinaus kann es sein, dass der Heiz- und/oder Kühlbedarf nicht durch die vorhandenen Pfähle gedeckt werden kann. In vielen Fällen werden Energiepfähle daher in Verbindung mit Zusatzsystemen in ein Gesamtenergiekonzept integriert werden.

Bei der Verschaltung der Pfähle untereinander wird zwischen einer Parallel- und einer Reihenschaltung unterschieden. Bei einer Parallelschaltung werden alle Pfähle mit demselben anteiligen Volumenstrom und derselben Rücklauftemperatur der Wärmepumpe beaufschlagt, weshalb die Entzugsleistung der Pfähle ansatzweise gleich ist. Bei der Reihenschaltung werden die Pfähle nacheinander durchströmt. Das bedeutet, dass die Rücklauftemperatur des ersten Pfahls der Zulauftemperatur des zweiten Pfahls der Reihe entspricht. Der Durchfluss in jedem Pfahl entspricht dabei dem der Wärmepumpe und ist somit größer als bei einer Parallelschaltung. Mit steigender Leitungslänge steigen bei einer Reihenschaltung jedoch die Druckverluste, sodass aus energetischer und hydraulischer Sicht die maximale Pfahlanzahl in einer Reihenschaltung eingeschränkt ist. Bei großen Pfahlgruppen wird aus diesem Grund häufig eine Kombination beider Varianten vorgenommen (z. B. Katsura 2009; Wood 2010).

In den letzten Jahren wurden vermehrt Untersuchungen an Energiepfählen im Feld- oder Labormaßstab durchgeführt (z. B. Wood 2010; Ennigkeit 2002; Hamada et al. 2007b; Laloui et al. 2006; Bourne-Webb et al. 2009; Brettmann et al. 2010; Park et al. 2013). Dabei wurde eine Vielzahl verschiedener Systeme (Beton- und Stahlpfähle, U-Rohre, W-Rohre, spiralförmige Rohre) getestet, dennoch ist die Datenbasis für vergleichbare Situationen immer noch relativ gering. Dementsprechend existieren verschiedene „Erfahrungswerte“ für mögliche Entzugsleistungen von Energiepfählen in der Literatur. Tab. 15.2

Tab. 15.2 Richtwerte und dokumentierte Entzugsleistungen von Energiepfählen

Bauteil		Leistung (Richtwert)	Leistung (dokumentiert)
Energiepfahl	$D < 0{,}6$ m	40–60 W/m (Brandl 2006; Fromentin et al. 1997)	43–78 W/m (vgl. Tab. 15.1)
	$D > 0{,}6$ m	35 W/m^2 (Brandl 2006)	15–63 W/m^2 (vgl. Tab. 15.1)

gibt einen Überblick über ausgewählte Erfahrungswerte und in der Literatur dokumentierte Entzugsleistungen.

Die dokumentierten Energiepfahlanlagen weisen im Vergleich zu den Erfahrungswerten eine deutliche Streuung auf. Die tatsächliche Entzugsleistung ist daher stets von den jeweiligen Randbedingungen abhängig, sodass die angegebenen Erfahrungswerte nur für eine Machbarkeitsstudie verwendet werden sollten. Eine detaillierte Anlagenplanung in der Ausführungsplanung sollte stets auf Grundlage systemangepasster Berechnungen bzw. numerischer Simulationen erfolgen.

15.2.2 Energiewände und Bodenplatten

Flächige Bauteile, deren Vorteil in der großen vorhandenen erdberührenden Fläche liegt, können ebenfalls zur thermischen Nutzung des Untergrunds verwendet werden (siehe Abb. 15.2). Klassischerweise werden Verbauwände aus Beton (Bohrpfahlwände, Schlitzwände) oder Bodenplatten thermisch aktiviert. Während bei den Betonverbauwänden die Absorberrohre analog zu den Energiepfählen auf der Innenseite des Bewehrungskorbs befestigt werden, werden sie bei der thermischen Aktivierung von Bodenplatten grundsätzlich in der Sauberkeitsschicht unterhalb der eigentlichen Bodenplatte verlegt (SIA D0190 2005). Bei überschnittenen oder tangierenden Bohrpfahlwänden wird oft nur jeder zweite Pfahl (bei überschnittenen Bohrpfahlwänden der bewehrte Sekundärpfahl) mit Absorberleitungen ausgestattet, um die gegenseitige Beeinflussung der Pfähle zu reduzieren. Als Absorberrohre werden auch bei flächigen Bauteilen Rohre auf PE- bzw. PE-Xa-Basis verwendet (Fromentin et al. 1997; Uponor 2012).

Prinzipiell können sämtliche flächige Bauteile thermisch aktiviert werden. Am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen und Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau (GiB) der RWTH Aachen University wurden im Kontext der flächigen Bauteile thermisch aktivierte Abdichtungselemente entwickelt und in großmaßstäblichen Laborversuchen erprobt. Seit 2011 bietet die Firma SPS Energy GmbH thermisch aktivierte Spundwände an (siehe Abb. 15.2d). Hierbei werden die Absorberrohre aus Stahl an handelsübliche Spundwandelemente angeschweißt. Da Spundwände oft im Wasserbau zum Beispiel zur Ufersicherung eingesetzt werden, kann damit die Energie aus oberflächennahen Bodenschichten und vor allem aus fließenden Gewässern genutzt werden. Das System wurde bisher in einem ersten Feldversuch erprobt (Puttke 2013) und wird

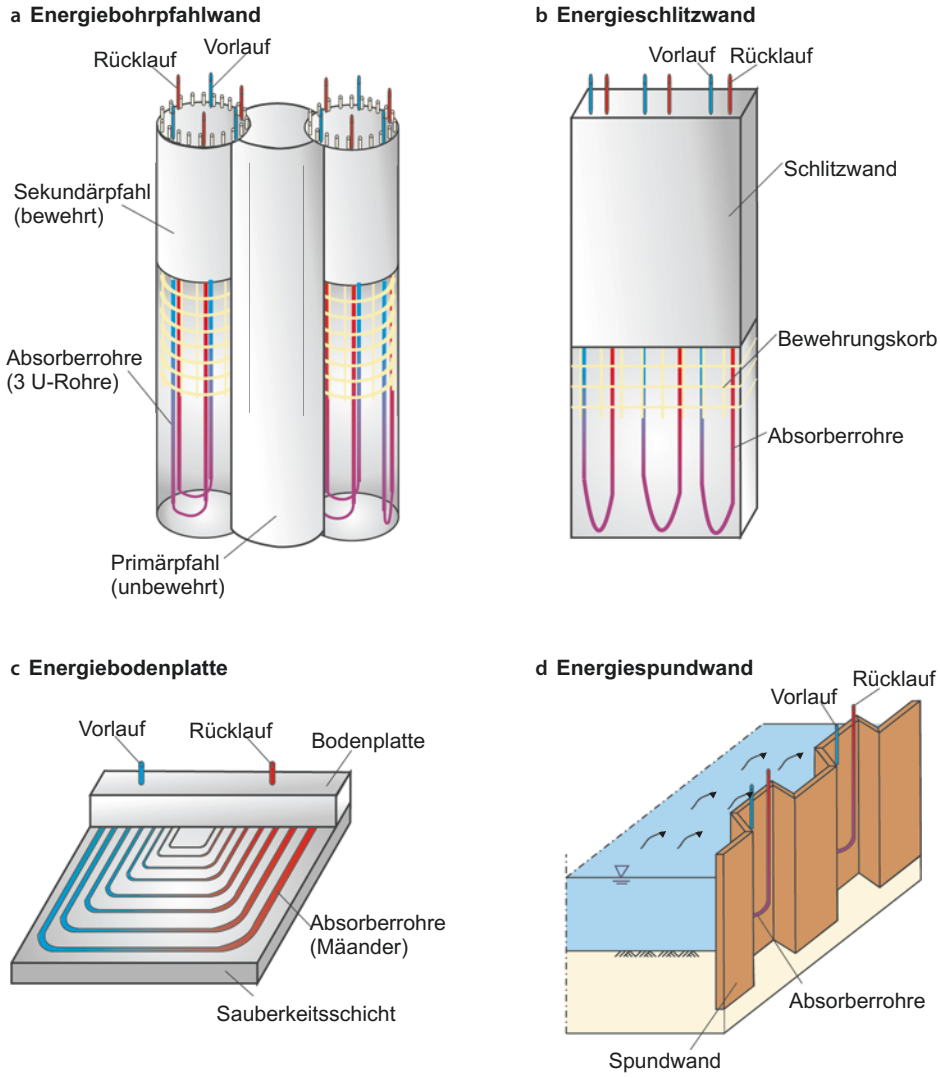


Abb. 15.2 Schematische Darstellung flächiger thermisch aktivierter Bauteile. (Kürten 2014)

derzeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit dem GiB weiter untersucht.

Die Absorberrohre sollten bei flächigen thermisch aktivierten Bauteilen möglichst nah am Erdreich platziert und gleichmäßig über die aktivierte Fläche verteilt werden (Fromentin et al. 1997). Im Gegensatz zu Pfählen sind bei Wänden die Platzverhältnisse großzügiger, sodass verschiedene Arten der Leitungsführung in der Wand möglich sind. Bei der Planung der Leitungsverlegung sind dabei hydraulische Anforderungen

(Druckverluste, Entlüftungseigenschaften) sowie konstruktive Anforderungen (Mindestbiegeradien, Integration der Leitungsverlegung in den Herstellungsprozess) zu beachten.

Die Anordnung der Rohre im Bauteil kann entweder in Reihen- oder Parallelschaltung erfolgen. In Kürten (2014) wurde in einer Parameterstudie ermittelt, dass große Rohrlängen und damit Reihenschaltungen vorteilhaft sind, da durch diese in der Regel die höchste Entzugsleistung erreicht werden kann. Darüber hinaus ist die Rücklauftemperatur bei längeren Rohrsträngen größer als bei kurzen, wodurch die Gesamteffizienz des Systems ansteigt (Kürten 2014). Eine weitere Einflussgröße stellt der Schenkelabstand (entspricht dem Abstand zwischen den Rohrsträngen) der verlegten Rohrleitungen dar. Feldversuche an einer Energieschlitzwand in Schanghai (Xia et al. 2012) zeigen, dass die Verlegung der Rohre in W-Form bei einem möglichst großen Schenkelabstand die höchsten Wärmeströme im Kühlbetrieb ergibt. Numerische Simulationen für eine Schlitzwand und eine Bodenplatte der U-Bahnlinie U2 in Wien zeigen dagegen, dass die spezifische Entzugsleistung des Systems mit steigendem Schenkel- bzw. Rohrabstand sinkt (Hofinger und Kohlböck 2005). Dies deckt sich mit Untersuchungen am GiB, die ebenfalls zeigten, dass die absolute Leistung eines Systems mit steigendem Schenkelabstand sinkt, obwohl die Entzugsleistung pro Meter Rohrlänge ansteigt (Kürten 2014). Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch einen großen Abstand die gegenseitige Beeinflussung der Rohrstränge minimiert wird, aufgrund des steigenden Platzbedarfs jedoch in Summe weniger Rohrschlaufen und damit geringere Rohrlängen in der Wand bzw. in der Bodenplatte verlegt werden können. Ein größerer Rohrabstand und damit eine geringere Rohranzahl führen dagegen zu einer Reduzierung der Kosten. Bei der Leitungsverlegung ist daher stets für jedes Projekt das Optimum zwischen Schenkelabstand, Rohranzahl und Rohrabstand zu ermitteln. Für die oben genannte Energieschlitzwand in Wien liegt der optimale Rohrabstand aus wirtschaftlicher Sicht zwischen $a = 30\,\text{cm}$ und $a = 50\,\text{cm}$ und für die Energiebodenplatte zwischen $a = 40\,\text{cm}$ und $a = 60\,\text{cm}$ (Hofinger und Kohlböck 2005).

Bei vertikalen Wänden ist weiterhin zu beachten, dass der Energieaustausch mit dem Boden nur auf der Außenseite des Bauwerks stattfindet und somit kein rotationssymmetrischer Wärmeübergang wie bei Pfählen vorliegt. Der Wärmeübergang zwischen Absorbersystem und Gebäudeinnenseite ist daher zu minimieren, um die Gefahr des thermischen Kurzschlusses zu reduzieren. Dies kann neben einer erdseitigen Verlegung der Rohre zusätzlich durch eine ausreichende Dämmung an der Innenseite erfolgen (Fromentin et al. 1997).

Neben konstruktiven Parametern zählen Betriebsparameter wie der Volumenstrom in den Absorberrohren zu maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Entzugsleistungen flächiger thermisch aktivierter Bauteile. Durch den Volumenstrom im Rohrsystem wird der Energieeintrag in das System bestimmt. Aus diesem Grund sollte möglichst ein Strömungszustand außerhalb des laminaren Bereichs eingestellt werden, da sich dadurch die Wärmeübertragungseigenschaften überproportional verbessern. In Kürten (2014) sind im Rahmen einer Parameterstudie weitere konstruktive, betriebliche und standortspezifischen Einflussfaktoren auf die Entzugsleistung flächiger thermisch aktivierter Bauteile untersucht worden. Für eine detaillierte Beschreibung der Wirkung einzelner Einflussfaktoren wird daher auf diese Quelle verwiesen.

Tab. 15.3 Richtwerte und dokumentierte Entzugsleistungen von flächigen thermisch aktivierten Bauteilen

Bauteil		Leistung (Richtwert)	Leistung (dokumentiert)
Energiewände (Schlitzwände und Bohrpfahlwände)	Beidseitiger Bodenkontakt	30 W/m^2 (Brandl 2006)	27–100 W/m^2 (Xia et al. 2012)
	Einseitiger Bodenkontakt	20–35 W/m^2 (Adam und Oberhauser 2008)	
Bodenplatte	Einseitiger Luftkontakt	10–30 W/m^2 (Brandl 2006; Adam und Oberhauser 2008)	-
Abdichtungselemente	Laborversuche (Kurzzeitleistungen)	56–80 W/m^2 (Median) (Kürten 2014)	25–300 W/m^2 (Kürten 2014)

Derzeit sind nur wenige Erfahrungswerte für die Leistungsfähigkeit von flächigen thermisch aktivierte Bauteilen dokumentiert. Tab. 15.3 gibt einen Überblick über in der Literatur angegebene Erfahrungswerte sowie in Projekten dokumentierte Entzugsleistungen.

Die geringere spezifische Leistung für Bodenplatten ist auf das kleinere aktivierbare Bodenvolumen im Vergleich zu vertikalen Bauteilen zurückzuführen. Die hier gezeigten Werte dienen lediglich als Richtwerte, die ausschließlich im Rahmen einer Machbarkeitsstudie verwendet werden können. Für eine detaillierte Anlagenplanung ist stets eine projektabhängige Berechnung des Systems erforderlich.

15.2.3 Thermische Aktivierung von Tunnelbauwerken

Neben der klassischen Anwendung im Hoch- bzw. Betonbau können auch Tunnelbauwerke zur thermischen Nutzung des Untergrunds verwendet werden. Die Nutzung von Tunnelbauwerken bietet den großen Vorteil, dass aufgrund der großen erdberührenden Fläche ein großes Bodenvolumen erschlossen bzw. aktiviert werden kann. Zudem sind Tunnel durch ihre tiefe Lage tendenziell durch ein konstantes Temperaturregime im umgebenden Untergrund gekennzeichnet. Darüber hinaus können innere Wärmequellen (z. B. aus dem Verkehr) genutzt werden. Die gewonnene Energie kann zur Deckung des eigenen Heiz-und Kühlbedarfs (Klimatisierung von Betriebsräumen, U-Bahn-Stationen oder Lüftungszentralen) oder zur Eisfreihaltung (Portalbereich, Rettungsstollen etc.) genutzt werden. Ist eine Eigennutzung nicht möglich oder erforderlich, kann die gewonnene Energie auch verkauft werden. Dies bietet sich vor allem im innerstädtischen Tunnelbau an, da dort kurze Wege zu den Abnehmern aufgrund der in der Regel oberflächennahen Lage der Tunnel bei einer dichten Bebauung vorhanden sind (Adam 2010).

Die Wirtschaftlichkeit einer Tunnelthermie®-Anlage ist maßgeblich von der aktivierten Tunnellänge abhängig. Mit steigender aktivierter Länge steigt auch der Leistungsbedarf der Umwälzpumpe. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es daher günstiger, mehrere kleine Abschnitte thermisch zu aktivieren, anstelle der Installation einer großen Anlage. Nach Oberhauser & Adam (2006) liegt die Wirtschaftlichkeitsgrenze bei einer Tunnelabschnittslänge von ca. 500 m. Die mögliche Entzugsleistung eines Energietunnels hängt sowohl von der Umgebungstemperatur (Boden) als auch von der Tunnellufttemperatur ab (Adam 2010; Markiewicz 2004; Schneider 2013; Nicholson et al. 2013). Energiegewinne aus dem Tunnelbetrieb z. B. in innerstädtischen Verkehrs- oder U-Bahntunneln können somit einen direkten Beitrag zum Energieertrag leisten. Die realitätsnahe Beschreibung der Tunnelinnenlufttemperatur ist somit für eine Anlagenauslegung von entscheidender Bedeutung. Für die Absorberrohre bei geothermischen Tunnelanlagen sollten robuste Rohrmaterialien wie z. B PE-Xa verwendet werden.

Die thermische Aktivierung von Tunnelbauwerken kann sowohl bei Tunneln in offener als auch in geschlossener Bauweise erfolgen. Die dabei verwendeten Systeme unterscheiden sich aufgrund der jeweiligen Herstellungsverfahren der Tunnel und werden im Folgenden kurz dargestellt.

15.2.3.1 Tunnel in offener Bauweise

Bei Tunneln in offener Bauweise können die klassischen Energiefundierungen (Pfähle, Bodenplatten, Schlitzwände, Bohrpfahlwände) eingesetzt werden, da diese Elemente ohnehin Bestandteil des Tunnels sind (siehe Abb. 15.3).

Der weltweit erste „Energietunnel“ in offener Bauweise wurde 2001 in Wien errichtet. Beim Bau des Lainzer Tunnels (Baulos LT24 – Hadersdorf/Weidlingau) wurden

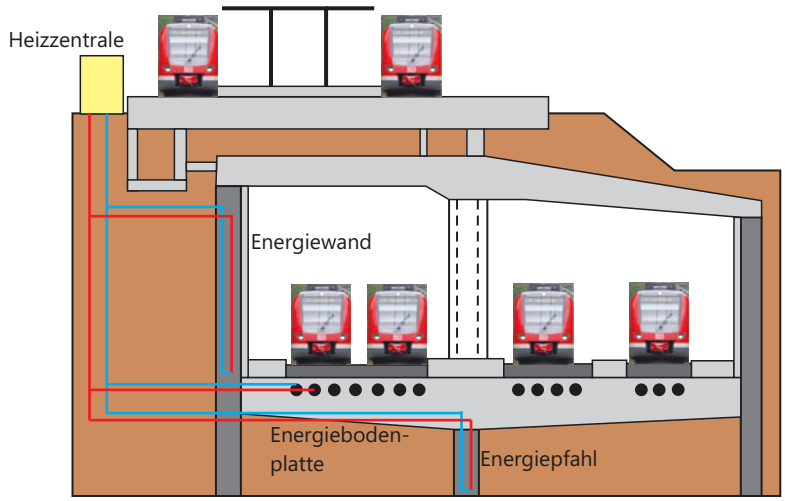


Abb. 15.3 Thermische Aktivierung von Tunneln in offener Bauweise. (Kürten 2014)

60 Pfähle einer Bohrpfahlwand thermisch aktiviert (z. B. Brandl 2006). In Summe wurden 80 Absorberkreise mit einer Gesamtlänge von 9709 m auf einer Tunnellänge von 252 m installiert (Markiewicz 2004). Die Anlage wurde 2004 erfolgreich in Betrieb genommen. Die Leistung liegt bei ca. 150 kW bzw. 214 MWh (Jahres-Wärmearbeit), die zur Beheizung einer Schule verwendet wird (Brandl 2006). In einem zweiten Bauabschnitt (Baulos LT44 – Güterschleife) wurden darüber hinaus Energiebodenplatten und Energieschlitzwände eingesetzt.

Aufgrund der positiven Erfahrungen beim Bau des Lainzer Tunnels wurden auch bei der Verlängerung der U-Bahnlinie U2 in Wien die Stationen Schottenring, Taborstraße, Praterstern und Messe im Jahre 2003 mit einer geothermischen Anlage ausgestattet. In Summe wurden 11.200 m^2 Schlitzwände, 6912 m^2 Bodenplatte und 20 Pfähle thermisch aktiviert (Brandl 2006). Die installierte Heizleistung der vier Stationen beträgt 827 kW, während die installierte Kühlleistung der vier Stationen bei 509 kW liegt. Die gewonnene Heiz- und Kühlenergie wird für die einzelnen Stationen jeweils zur Versorgung der Betriebsräume verwendet (Brandl et al. 2010).

15.2.3.2 Tunnel in geschlossener Bauweise

Bei Tunneln, die in geschlossener Bauweise hergestellt werden, sind Sondersysteme erforderlich. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass ein Tunnel in geschlossener Bauweise abschnittsweise hergestellt wird, sodass die Verwendung von durchgehenden Absorberleitungen schwierig ist. Darüber hinaus ist eine wirtschaftliche Installation nur möglich, wenn die Herstellung der geothermischen Anlage in den Bauablauf integriert werden kann und somit keine Bauverzögerungen entstehen.

Die möglichen geothermischen Systeme unterscheiden sich für bergmännisch hergestellte Tunnel oder maschinell aufgefahrene Tunnel. Während bei bergmännischen Tunneln die Absorberrohre zwischen Außen- und Innenschale angeordnet werden können, müssen sie im maschinellen Tunnelvortrieb direkt in die Auskleidungselemente (Tübbinge) integriert werden (siehe Abb. 15.4).

Zur Erprobung der Erdwärmenutzung im bergmännischen Tunnelbau wurde von der TU Wien in Zusammenarbeit mit der Firma Polyfelt der Prototyp eines Energievlieses entwickelt (Markiewicz 2004). Dabei werden die Absorberrohre (PE-Rohre) elementweise in ein Schutz- und Drainagevlies integriert. Die Elemente weisen eine Breite von 2,5 m auf, was der üblichen Vliesbahnbreite entspricht. Die einzelnen Kreisläufe sind durch eine Sammelleitung verbunden, welche im Ulmenbereich zum Abnehmer (Betriebsraum) geführt wird (Markiewicz 2004). Durch die Elementbauweise können mehrere Kreisläufe parallel betrieben bzw. im Schadensfall separat abgekoppelt werden. Im Idealfall wird das Vlies werkseitig mit Rohren ausgestattet. Dadurch ist kein zusätzlicher Arbeitsschritt im Bauablauf nötig und die Rohre werden beim Betonieren der Innenschale durch das Vlies geschützt (Markiewicz 2004). Der Prototyp des Energievlieses wurde in einer Versuchsanlage im Lainzer Tunnel (Bauabschnitt „LT22-Bierhäuselberg“) im Februar 2004 erstmalig in Betrieb genommen (Markiewicz 2004).

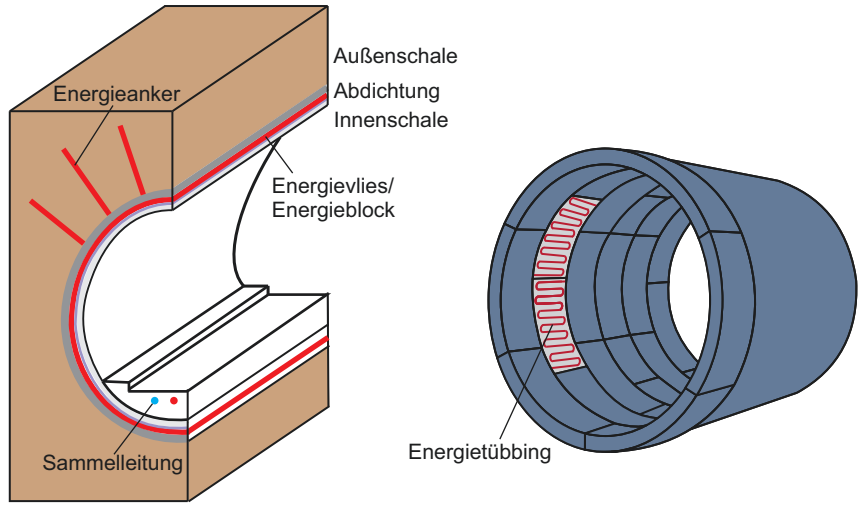


Abb. 15.4 Thermische Aktivierung von Tunneln in geschlossener Bauweise. (Kürten 2014)

Das Prinzip des Energievlieses wurde auch in Asien adaptiert. In Seocheon (Südkorea) wurden beispielsweise Absorberleitungen zwischen Innen- und Außenschale platziert und in einem Feldversuch erprobt. Hierbei wurden 6 Abschnitte (jeweils 10 m lang und 1,5 m hoch) installiert, wobei verschiedene Anordnungen der Absorberleitungen getestet wurden (Lee et al. 2012).

Die erste Anwendung der Absorbertechnologie in der Spritzbetonbauweise in Deutschland erfolgte beim Tunnel Stuttgart-Fasanenhof (Schneider 2013). Auf einer Gesamtlänge von 380 m wurden zwei sogenannte Energieblöcke installiert. Das System ähnelt dem Energievlies, jedoch werden beim Energieblock die Absorberleitungen durch Fixierschienen, welche auf der Trennlage (Geotextil) zwischen Spritzbetonaußenschale und Ortbetoninnenschale angebracht waren, befestigt. Durch die vor-Ort-Montage ist das System flexibler (Schneider und Vermeer 2010), die Montagezeit ist jedoch größer und muss in der Planungsphase berücksichtigt werden. Für den Testbetrieb wurden zwei Energieblöcke (10 m Länge mit einer installierten Rohrlänge von 400 m auf einer Fläche von 180 m^2) installiert (Schneider 2013), die zur Klimatisierung (Heizen und Kühlen) eines Betriebsraums genutzt werden.

Die Leitungsführung bei einem Tunnelthermie®-System ist flexibel, wobei die optimale Leitungsverlegung von der erforderlichen Leistung der Umwälzpumpe, der Entlüftbarkeit, dem Fertigungsaufwand sowie den Kosten abhängig ist. Während für das Energievlies eine Serienschaltung mit einer Verlegerichtung parallel zur langen Vliesseite gewählt wurde (Markiewicz 2004), wurde in Stuttgart die hydraulisch günstigere Parallelschaltung mit quer verlegten Rohren bevorzugt (Schneider 2013). Im Feldversuch in Südkorea wurden bei einer Querverlegung bessere Leistungen als bei einer

Tab. 15.4 Richtwerte und dokumentierte Entzugsleistungen von thermisch aktivierten Tunnelbauwerken

Bauteil		Leistung (Richtwert)	Leistung (dokumentiert)
Energietunnel	Vlies	13–15 W/m^2 (Adam und Oberhauser 2008)	4–66 W/m^2 z. B. (Hofinger und Kohlböck 2005; Lee et al. 2012)
	Energieblock	–	4 W/m^2–33 W/m^2 (Kühlleistung) (Schneider 2013)
	Tübbing	10–20 W/m^2 (Pralle et al. 2010)	–

Längsverlegung erzielt (Lee et al. 2012). Es zeigt sich somit, dass die optimale Rohrverlegung stets projektabhängig auf Basis der vorhandenen Rand- und Rahmenbedingungen erfolgen sollte.

Für maschinell erstellte Tunnel wurde von den Firmen Rehau AG + Co und Ed. Züblin AG (Zentrale Technik) der Energietübbing® entwickelt. Beim Energietübbing werden die Absorberleitungen an der Innenseite der äußeren Bewehrung des Tübbings befestigt, sodass die Betonüberdeckung nicht beeinflusst wird (Frodl et al. 2010). Die Kopplung der Absorberleitungen erfolgt nach dem Einbau der Tübbinge, aber noch vorm Betonieren der Innenschale. Die thermische Anbindung des Tübbings an den Untergrund erfolgt durch den Zement der Ringspaltverpressung, daher ist hier die Verwendung von thermisch verbesserten Zementen sinnvoll (Schneider und Vermeer 2010). Die Effizienz der Energietübbinge® wurde erstmalig im Katzenbergtunnel getestet. Dort wurden 24 Energietübbinge® zu vier Ringen verbunden. Die erste großflächige Anwendung des Energietübbings® erfolgte im Eisenbahntunnel Jenbach (Österreich). Hier wurden über einen Bereich von 54 m 27 Tübbingringe verbaut (Winterling 2012). In jedem Tübbing wurden 25 m Leitungen verlegt, sodass pro Ring ca. 175 m Rohre vorhanden sind (Frodl et al. 2010). Die thermische Anlage soll die Grundlastversorgung des Betriebshofs der Gemeinde Jenbach übernehmen. Die Anlage ging im Winter 2011/2012 erstmalig in Betrieb (Winterling 2012).

Tab. 15.4 zeigt mögliche Entzugsleistungen geothermischer Systeme für Tunnel in geschlossener Bauweise, die für eine Machbarkeitsstudie angesetzt werden können, sowie in der Literatur dokumentierte Entzugsleistungen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die erzielbaren Entzugsleistungen stark projektabhängig sind, da vor allem die Tunnelgeometrie (Tunneldurchmesser) sehr unterschiedlich ausfällt.

15.2.4 Spezialsysteme thermisch aktivierter Bauteile

15.2.4.1 Energieanker

Im Tunnelbau werden oftmals Anker zur Stabilisierung der Tunnelröhre bzw. des Untergrunds eingesetzt. Anker sind vollkommen von Fels bzw. Boden umschlossen und sind somit in der Lage, rundherum Wärme zu entziehen bzw. einzuspeisen (vgl. Abb. 15.2a).

Besonders empfehlenswert ist die thermische Aktivierung von temporären Ankern, die nur in der Bauphase statisch beansprucht werden und danach im Untergrund verbleiben, da in diesem Fall eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit der Anker durch die thermische Nutzung auszuschließen ist (Mimouni et al. 2014).

Der Prototyp eines Energieankers wurde durch die TU Wien in Zusammenarbeit mit der Firma Atlas Copco MAI GmbH entwickelt (Oberhauser et al. 2006). Da bei einem Energieanker die Ankerstange als Rohr ausgeführt werden muss, sind nur Hohlstabanker für eine thermische Aktivierung geeignet. Bei dem Prototyp wurde ein Injektionsbohranker verwendet, wobei eine koaxiale Sonde in das Ankerrohr integriert wurde (Oberhauser et al. 2006). Der Prototyp wurde in einem Testfeld beim Lainzer Tunnel (Baulos LT31 – Klimtgasse) getestet. In dem Testfeld (Böschung) wurden 21 Energieanker mit einer Länge von 9 m fächerförmig eingebracht. Die Abstände zwischen den Ankerreihen wurden zu 2 m und 4 m gewählt, um die gegenseitige Beeinflussung der Anker zu testen (Oberhauser et al. 2006). Ergänzend zu den Feldversuchen wurden numerische Simulationen durchgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem bei oberflächennahen Ankern eine große Beeinflussung durch die Außenlufttemperatur stattfindet, sodass eher lange Anker als Energieanker sinnvoll erscheinen. In tiefen Lagen, wo der Einfluss der Außentemperatur vernachlässigbar ist, kann auch die thermische Aktivierung von kurzen Ankern sinnvoll sein (Oberhauser et al. 2006). Der Einsatz von Energieankern ist daher vor allem in tiefliegenden Tunneln zu empfehlen.

Die mögliche Leistungsfähigkeit von Energieankern wurde von Mimouni et al. (2014) mithilfe von numerischen Simulationen für einen Tunnel in offener Bauweise systematisch untersucht. Die möglichen Entzugsleistungen pro Meter Anker sind deutlich geringer als die vergleichbaren Werte für Erdwärmesonden oder Energiepfähle. Als Planungsgrundlage kann eine mögliche Entzugsleistung eines Energieankers von 8 W/m bis 15 W/m angenommen werden (Adam und Oberhauser 2008). Durch den geringen Ankerabstand und die in der Regel große aktivierbare Tunnellänge kann für Energieanker jedoch eine ähnliche Effizienz wie für Energiepfähle erreicht werden (Mimouni et al. 2014).

15.2.4.2 Systeme zur Eisfreihaltung

Eine weitere Einsatzvariante thermisch aktivierter Bauteile stellen Systeme zur Eisfreihaltung von Infrastrukturanlagen dar. Dabei wird durch im Belag installierte Absorberrohre ganzjährig eine Temperatur des Belags bzw. der Oberfläche von mindestens 0 °C erhalten, wodurch die Entstehung von Eis- oder Schneeschichten verhindert werden kann. Der Einsatz von Streusalz oder eine mechanische Reinigung ist dann nicht mehr erforderlich. Die „Beheizung“ von Verkehrsinfrastrukturanlagen wird vor allem auf Brücken, Gleisen bzw. Weichen oder Flugbetriebsflächen eingesetzt, da dort andere Methoden der Eisfreihaltung nur schwer möglich sind oder zu hohen Kosten führen würden (VBI 2012).

Das erste System zur Eisfreihaltung mit Erdwärmekollektoren als Energiequelle wurde 1969 in Trenton (USA) realisiert (Lund 2000). Seitdem wurden in den USA, Japan, Island, Argentinien, der Schweiz, den Niederlanden und in Deutschland Projekte realisiert (z. B. Würtele et al. 2005; Hanschke et al. 2009; Lund et al. 2011). Derzeit sind weltweit ca. 2

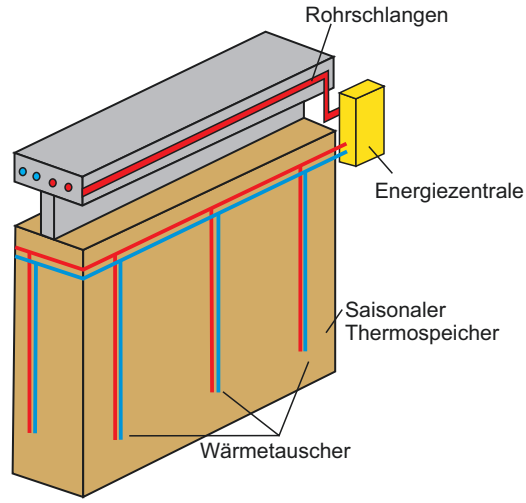


Abb. 15.5 Eisfreihaltung in Verbindung mit Erdwärmesonden. (Kürten 2014)

Mio. m^2 Infrastrukturfläche thermisch aktiviert, wobei der größte Anteil in Island zu finden ist (Lund et al. 2011). Die erste Anlage in Deutschland ist seit 2005 beim Bahnsteig in Barbis (Harz) in Betrieb (Genath 2011). Die erste „geothermische Brücke" in Deutschland wurde 2009/2010 in Berkenthin errichtet (Hanschke et al. 2009). Ein Überblick über verschiedene Systeme und Projekte zur Eisfreihaltung von Verkehrsinfrastrukturanlagen findet sich z. B. in Lund (2000), Würtele et al. (2005) oder Yu et al. (2014).

Prinzipiell können sowohl geschlossene als auch offene geothermische Systeme als Energiequelle zur Eisfreihaltung verwendet werden. Je nach Energiebedarf und der vorhandenen Quelltemperatur kann bei Systemen der Eisfreihaltung ggf. auf die Installation einer Wärmepumpe verzichtet werden (Bolk et al. 2007). Durch einen Kühlbetrieb im Sommer kann die Asphalttemperatur reduziert werden und die anfallende Wärme kann für den Winterbetrieb im Erdreich gespeichert werden.

Während in den frühen Projekten in den USA noch Erdwärmekollektoren eingesetzt wurden (Lund 2000), werden in neueren Projekten voranging Erdwärmesonden oder offene Systeme eingesetzt, da diese über eine höhere Effizienz verfügen und/oder als Speicher eingesetzt werden können. Beispiele hierfür sind das Schweizer System „SERSO" (Sonnenenergierückgewinnung aus Straßenoberflächen) (Würtele et al. 2005), das „Winnerway-System" der Firma Arcadis (Genath 2011) oder das System QuaWi-Dis®(„qualifiziertes Winterdienstsystem"), das von der Firma Hering Bau in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt entwickelt wurde. In Japan wird die Shin-Kiyonaga-Brücke durch ihre Gründungspfähle (Energiepfähle) eisfrei gehalten (Dupray et al. 2014).

Die Verwendung von offenen Systemen in Verbindung mit einer Eisfreihaltung hat ebenfalls ihren Ursprung in den USA und Japan (Lund 2000). Hier wird das warme Grundwasser direkt zur „Beheizung" der Fahrbahn genutzt. Auch Systeme in den Niederlanden (Haringvliet) und in Deutschland (Brücke Berkenthin) werden als offene Systeme betrieben. Während in den Niederlanden ein Aquiferspeicher verwendet wird (Würtele

et al. 2005), wird in Berkenthin auf einen Schluckbrunnen verzichtet und das „verbrauchte Wasser“ in den Elbe-Lübeck-Kanal geleitet (Mackert 2011). Das derzeit wohl größte Eisfreihaltungssystem in Kombination mit einem Aquiferspeicher wird seit 2009 auf dem Stockholmer Flughafen betrieben (Hägg und Andersson 2009).

Die erforderlichen Heizleistungen zur Gewährleistung einer Eisfreiheit liegen je nach klimatischen Bedingungen und äußeren Rahmenbedingungen zwischen 130 W/m^2 und 600 W/m^2 (Wang und Chen 2009; Lund et al. 2011). Die maßgebenden Faktoren sind hierbei die Schneefallmenge, die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit (Chapman 1952; Lund 2000). Aus konstruktiver Sicht kann die Aufheizzeit sowie die eisfreie Zeit vor allem durch den Rohrabstand, die Rohrüberdeckung und die Fluidtemperatur beeinflusst werden (Wang und Chen 2009). Bei Systemen zur Eisfreihaltung werden analog wie bei anderen thermisch aktivierte Bauteilen vor allem Absorberrohre auf PE-Basis mit Durchmessern zwischen 20 mm und 25 mm verwendet. Liegt eine hohe Belastung des Straßenbelags vor (z. B. auf Autobahnen) können auch Stahlrohre verwendet werden, wie beispielsweise bei der A8 in der Schweiz (SERSO-System) erfolgt (Würtele et al. 2005). Die Absorberrohre können entweder spiralförmig oder mäanderförmig (U-Schlaufen) verlegt werden. Der Abstand zwischen den Rohrsträngen liegt üblicherweise zwischen 10 cm und 30 cm (Chiasson 1999). Prinzipiell ist im Gegensatz zu anderen geothermischen Systemen ein möglichst enger Rohrabstand vorteilhaft, um die Oberfläche flächendeckend eisfrei zu halten (Bolk et al. 2007). Vor allem an den Randbereichen, die oftmals durch eine exponierte Lage gekennzeichnet sind, kann es erforderlich sein, den Rohrabstand zu reduzieren.

15.3 Besondere Randbedingungen bei thermisch aktivierten Bauteilen

15.3.1 Randbedingungen für den Anlagenbetrieb

Thermisch aktivierte Bauteile haben primär eine statische Funktion, die durch eine thermische Aktivierung nicht beeinträchtigt werden darf. Die energetische Funktion des Bauteils ist dementsprechend den primären Anforderungen an das Bauteil unterzuordnen. Um die Tragfähigkeit des Bauteils nicht zu gefährden ist zu garantieren, dass der Bauteilquerschnitt durch die Absorberleitungen nicht zu stark geschwächt wird und die Temperatur im Bauteil während des Betriebs nicht zu niedrig ist. In Deutschland wird eine Frostbeanspruchung eines thermisch aktivierten Bauteils (bzw. eines Energiepfahls) komplett ausgeschlossen (VDI 4640-2 2001). Es ist somit zu gewährleisten, dass die Wärmeträgerflüssigkeit am Eintritt in das Bauteil 0 °C nie unterschreitet. Im Betrieb kann dies z. B. durch eine Sicherheitseinrichtung an der Wärmepumpe erreicht werden. In der Schweiz oder in Großbritannien ist theoretisch eine Temperatur im Bauteil unter 0 °C möglich, wenn gewährleistet wird, dass die Kontaktfläche zwischen Boden und Bauteil bzw. Pfahl

keinem Frost ausgesetzt ist, um negative Einflüsse auf die vorhandene Mantelreibung zu vermeiden (SIA D0190 2005; GSHPA 2012). In der Praxis werden thermisch aktivierte Bauteile in der Regel so betrieben, dass die Temperatur im Bauteil bzw. in den Absorberleitungen größer als 0 °C ist. Bei thermisch aktivierten Bauteilen kann daher in der Regel auf die Zugabe von Glykol verzichtet werden, wenn die Korrosionssicherheit auch bei Verwendung von reinem Wasser als Wärmeträgermedium gegeben ist.

15.3.2 Randbedingungen für die Bemessung

15.3.2.1 Oberflächennahe Untergrundtemperatur

Im Vergleich zu Erdwärmesonden weisen thermisch aktivierte Bauteile in der Regel eine deutlich geringere Tiefe auf (ca. 10 m bis 40 m). Über das Jahr ist somit eine veränderliche Untergrundtemperatur bei der Anlagenauslegung zu beachten. Besonders ausgeprägt ist dies bei Energiebodenplatten, da diese ähnlich wie Erdwärmekollektoren je nach Gründungstiefe im Einflussbereich von täglichen Temperaturschwankungen liegen können.

Grundsätzlich kann die Temperatur im Untergrund in drei Zonen eingeteilt werden (vgl. Abb. 15.6).

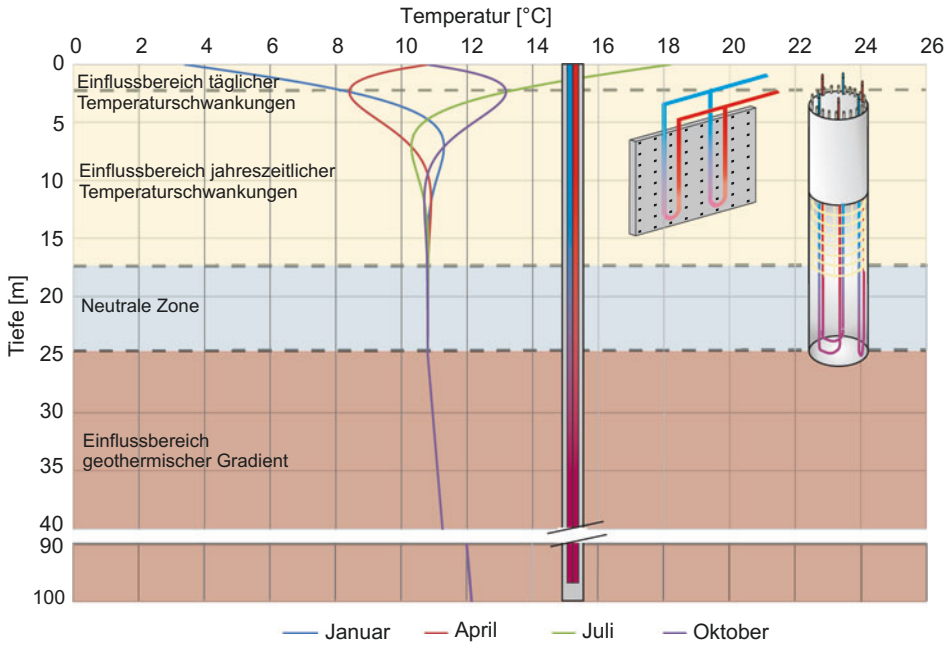


Abb. 15.6 Exemplarische Temperaturverteilung über die Tiefe. (Kürten 2014)

Im oberflächennahen Bereich wird die Untergrundtemperatur im Wesentlichen durch den jahres- bzw. tageszeitlichen Gang der Lufttemperatur beeinflusst. Bei der für eine oberflächennahe thermische Nutzung zur Verfügung stehenden Energie handelt es sich daher hauptsächlich um gespeicherte Sonnenenergie. Ab der sogenannten neutralen Zone ist der Einfluss der Lufttemperatur nicht mehr spürbar. Die Untergrundtemperatur ist in dieser Zone ganzjährig konstant und kann als Gleichgewichtszustand zwischen mittlerer Jahresaußen- und Erdinnentemperatur angesehen werden. Der absolute Wert ist vom Standort abhängig und liegt in Deutschland ungefähr zwischen 8 °C und 12 °C. In innerstädtischen Gebieten können jedoch auch höhere Temperaturen vorliegen. Die neutrale Zone liegt in Deutschland üblicherweise in 15 m bis 25 m Tiefe (VBI 2012). Erst in Tiefen unterhalb der neutralen Zone ist der Einfluss des geothermischen Wärmestroms auf die Untergrundtemperatur spürbar. Der geothermische Wärmestrom verursacht einen in der Regel linearen, jahreszeitlich unabhängigen Temperaturanstieg mit der Tiefe. Der daraus resultierende geothermische Gradient liegt global betrachtet in der Größenordnung von 2–3,5 K pro 100 m (Banks 2012). In Deutschland beträgt der geothermische Gradient im Mittel 3,2 K pro 100 m (Agemar et al. 2011). Durch regionale Besonderheiten kann der geothermische Gradient jedoch auf bis zu 100 K pro Kilometer (z. B. im nördlichen Oberrheingraben) ansteigen (Agemar et al. 2011).

Die Temperaturverteilung im oberflächennahen Untergrund folgt zeitversetzt dem Jahresgang der Lufttemperatur. Dieser kann durch einen um die mittlere Lufttemperatur schwankenden sinusförmigen Verlauf approximiert werden. Die Temperatur im Untergrund kann daher ebenfalls über einen sinusförmigen Verlauf beschrieben werden, wobei im Vergleich zur Lufttemperatur eine Phasenverschiebung und mit steigender Tiefe auch eine Dämpfung der Amplitude auftritt. Eine mathematische Beschreibung dieses Zusammenhangs liefert z. B. (Banks 2012). Eine typische Temperaturverteilung über das Jahr ist für verschiedene Tiefen in Abb. 15.7 dargestellt.

Die Phasenverschiebung der Temperatur führt dazu, dass in 5 m Tiefe das Temperaturmaximum im Oktober und somit zu Beginn der Heizperiode auftritt, während das Temperaturminimum im Frühjahr durchlaufen wird. Somit kann sich die Phasenverschiebung der Temperatur positiv auf den Betrieb von oberflächennahen geothermischen Anlagen auswirken.

Die Eindringtiefe und die Phasenverschiebung des Temperaturzyklus hängen von der Temperaturleitfähigkeit des Bodens und der betrachteten Periode ab. Für Böden mit einer hohen Temperaturleitfähigkeit ist auch eine größere Eindringtiefe des Temperaturzyklus bzw. der neutralen Zone zu erwarten (Kürten 2014).

Zur Ermittlung des Temperaturprofils in den oberflächennahen Bodenschichten ist die Kenntnis der Erdoberflächentemperatur erforderlich, die messtechnisch in der Regel nicht erfasst wird. Messdaten stehen teilweise für die Bodentemperatur in einer Tiefe von $z = 5$ cm oder für die Lufttemperatur zur Verfügung. Mit analytischen Ansätzen kann die Erdoberflächentemperatur aus der vorhandenen Lufttemperatur unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs zwischen Luft und Boden berechnet werden. Mathematische Beschreibungen zu diesem Vorgehen sind z. B. Grigull und Sandner (1990) oder Glück (2007)

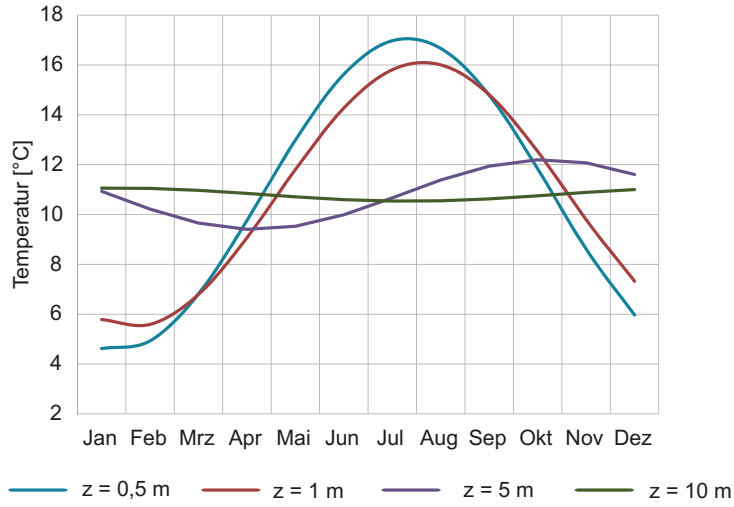


Abb. 15.7 Exemplarischer Jahresgang der Temperaturen für verschiedene Tiefen. (Kürten 2014)

zu entnehmen. Beide Ansätze zeigen im Vergleich zu realen Messwerten deutliche Unter- bzw. Überschätzungen insbesondere in den Sommermonaten (Kürten 2014). Dies ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, wie pauschale Ansätze beim Wärmeübergangskoeffizienten oder eine Vernachlässigung der Globalstrahlung. In Kürten (2014) wird daher eine alternative Bestimmung der Erdoberflächentemperatur auf Basis der Energiebilanz an der Oberfläche vorgestellt. Dieser alternative Ansatz ermöglicht es, die Erdoberflächentemperatur mithilfe von meteorologischen Daten mit einer guten Genauigkeit zu bestimmen.

Für die Berechnung von Erdwärmesonden werden jahreszeitliche Temperaturschwankungen im Untergrund in der Regel vernachlässigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Erdwärmesonden durch ihre große Tiefe größtenteils in der neutralen Zone bzw. im Einflussbereich des geothermischen Wärmestroms liegen (siehe Abb. 15.6). Thermisch aktivierte Bauteile werden überwiegend oberflächennah eingesetzt, sodass sie im Einflussbereich des jahreszeitlichen Temperaturzyklus liegen können (siehe Abb. 15.6). Ob jahreszeitliche Temperaturschwankungen im Untergrund bei der Planung von thermisch aktivierten Bauteilen zu berücksichtigen sind, hängt daher entscheidend von der Bauteiltiefe ab. Mit steigender Bauteiltiefe sinkt der durch die zeitlich variierende Untergrundtemperatur beeinflusste Anteil des Bauteils, wodurch auch der Einfluss auf die Leistung abnimmt. Zusätzlich zur Bauteiltiefe ist die Temperaturleitfähigkeit des Untergrunds von Bedeutung, da bei einer großen Temperaturleitfähigkeit die Eindringtiefe der Temperaturzyklen größer ist als bei Böden mit einer geringen Temperaturleitfähigkeit. Neben diesen beiden Aspekten wirkt sich auch eine Grundwasserströmung auf die Temperaturverteilung im Untergrund aus, da in diesem Fall eine Überlagerung von konvektiven und konduktiven Wärmetransportvorgängen stattfindet (vgl. Abschn. 15.3.4)

15.3.3 Urban Heat Island Effect

Die Lufttemperatur und der Unterschied zwischen Tag- und Nachttemperaturen sind in Städten im Allgemeinen höher als im (unbebauten) Umland. Dieses als *urban heat island effekt* (UHI-Effekt) oder „Wärmeinsel" bezeichnete Phänomen wurde erstmals von Luke Howard im Jahre 1820 für London dokumentiert (Watkins et al. 2002). Die erhöhte Lufttemperatur ist zum einen auf die veränderte Strahlungsbilanz zurückzuführen, da infolge der größeren Oberflächenversiegelung die Reflexion ansteigt. Zum anderen sinkt der Verdunstungswärmestrom mit steigendem Versiegelungsgrad (Allen et al. 2003). Darüber hinaus wird die Lufttemperatur durch eine vermehrte Wärmeabstrahlung von Gebäuden zusätzlich erhöht. Die Ausprägung der Wärmeinsel hängt dabei vor allem von der Siedlungsgröße ab (Oke 1973). Für asiatische Großstädte sind z. B Temperaturdifferenzen zwischen Umland und Innenstadt von bis zu 12 °C (Bangkok) dokumentiert (Zhu et al. 2010). Weitere bekannte Wärmeinseln sind Großstädte wie New York, London, Paris oder Berlin. Ein Überblick über Studien zur Ausbreitung von städtischen Wärmeinseln findet sich beispielsweise in (Arnfield 2003).

Der UHI-Effekt beeinflusst nicht nur die Luft- bzw. Oberflächentemperatur, sondern wirkt sich auch auf die Untergrundtemperatur aus (z. B. Allen et al. 2003; Ferguson und Woodbury 2004; Huang et al. 2009). Der Unterschied zwischen der Bodentemperatur im Umland und dem Innenstadtbereich liegt im Mittel zwischen 2 K und 5 K (Zhu et al. 2010). Für die Innenstadtbereiche von London oder Frankfurt sind sogar Bodentemperaturen von bis zu 20 °C dokumentiert (Nicholson et al. 2013; Menberg et al. 2013a).

Anthropogene Wärmequellen im Untergrund verstärken den UHI-Effekt. Dabei geben sowohl Gebäude als auch unterirdische Bauwerke (Kanäle, Straßen- und U-Bahntunnel, Fernwärmenetze) Wärme an den Untergrund ab (z. B. Menberg et al. 2013a). Je nach Speicherpotential des Untergrunds führt dies zu einer dauerhaften Erwärmung des Untergrunds. Den größten Einfluss auf die Untergrundtemperatur haben bei den anthropogenen Wärmequellen die Gebäude (Menberg et al. 2013b). Dabei spielt sowohl die Dichte der Bebauung, das Alter der Gebäude sowie die Nutzung eine entscheidende Rolle (Allen et al. 2003; Ferguson und Woodbury 2004). Der Wärmeeintrag in den Untergrund durch ältere Gebäude mit einem schlechten Dämmstandard ist demzufolge größer als durch neuere (gut isolierte) Gebäude. Der Einfluss einer Grundwasserströmung auf die Ausprägung einer Wärmeinsel ist dagegen vernachlässigbar (Ferguson und Woodbury 2004).

Aus konstruktiver Sicht steigen infolge des UHI-Effekts vor allem bei Tunnelbauwerken die thermischen Belastungen der Tunnelschale (Nicholson et al. 2013; Botelle et al. 2010). In London werden daher aktive Maßnahmen zur Kühlung des Untergrunds bzw. der Tunnel getroffen (Botelle et al. 2010). Die thermische Aktivierung von Tunnelbauwerken wird in diesem Zusammenhang z. B. als Maßnahme gegen die Verstärkung des UHI-Effekts angesehen (Nicholson et al. 2013).

Der UHI-Effekt wirkt sich insbesondere auf die Auslegung thermisch aktivierter Bauteile aus. Während in innerstädtischen Bereichen durch die erhöhte Bodentemperatur das Heizpotential aufgrund der größeren wirksamen Temperaturdifferenz zwischen

Untergrund und Absorbersystem ansteigt, sinkt das Kühlpotential aus demselben Grund. Untersuchungen von (Watkins et al. 2002) und (Santamouris 2014) zeigen darüber hinaus, dass der Wärmebedarf von Gebäuden innerhalb einer Wärmeinsel kleiner ist als von vergleichbaren Gebäuden im Umland. Der Kühlbedarf steigt dagegen an. In Summe wirkt sich der UHI-Effekt somit günstig auf die Leistungsfähigkeit der geothermischen Anlage im Heizbetrieb aus, während die Effektivität im Kühlbetrieb sinkt.

Die vorhandenen Studien zur Ermittlung der Bodentemperatur in städtischen bzw. bebauten Gebieten beziehen sich in der Regel auf die Auswertung von Temperaturmessungen für einen Standort (z. B. Allen et al. 2003; Huang et al. 2009; Perrier et al. 2005). Allgemeine Zusammenhänge oder Berechnungsansätze existieren dagegen kaum. Für die numerische Simulation von geothermischen Anlagen kann der UHI-Effekt jedoch über die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur berücksichtigt werden. Anthropogene Wärmequellen, wie z. B. Tunnelbauwerke oder große unterirdische Bauwerke, können in einem numerischen Modell darüber hinaus als separate Wärmequellen berücksichtigt werden.

15.3.4 Einfluss des Grundwassers

Ist im Untergrund eine Grundwasserströmung vorhanden, hat diese Auswirkungen auf das Temperaturfeld und das Energiepotential des Untergrunds. Infolgedessen beeinflusst eine Grundwasserströmung auch das Leistungspotential thermisch aktivierter Bauteile. Der Einfluss der Grundwasserströmung resultiert hauptsächlich aus einem zusätzlichen konvektiven Wärmetransport, der den konduktiven Wärmetransport im Untergrund überlagert.

Untersuchungen von (Kürten 2014) zeigen, dass eine vorhandene Grundwasserströmung das Temperaturfeld infolge der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen verändert. Durch die Strömung wird die Amplitude der Temperaturschwingung im Untergrund gedämpft und es stellt sich bereits in oberflächennahen Schichten eine konstante Temperatur ein. Bei Böden mit einer geringeren Temperaturleitfähigkeit wird die Amplitudendämpfung durch die Grundwasserströmung noch weiter verstärkt. Neben der Verkleinerung der Amplitude wird durch eine Grundwasserströmung zusätzlich die Phasenverschiebung reduziert. Der Flurabstand des Grundwassers ist in Deutschland starken regionalen Schwankungen unterworfen. In der Praxis ist eine Dämpfung der Temperaturamplitude durch eine Grundwasserströmung daher nur zu berücksichtigen, wenn der Grundwasserspiegel oberhalb der neutralen Zone liegt. Für die Bemessung thermisch aktivierter Bauteile, die in den oberflächennahen Schichten von einer Grundwasserströmung beeinflusst werden, kann der Einfluss des jahreszeitlichen Temperaturverlaufs dann in der Regel vernachlässigt werden. In Gebieten mit einem größeren Flurabstand ist im Einzelfall zu überprüfen, inwieweit der Ansatz einer mittleren Bodentemperatur gerechtfertigt ist.

Durch den zusätzlichen konvektiven Wärmetransport wird das Energiepotential des Untergrundes erhöht, da die Grundwasserströmung für eine dauerhafte Bereitstellung warmer Wassermassen sorgt. Die Leistungsfähigkeit eines geothermischen Systems kann

dadurch erheblich gesteigert werden. Untersuchungen von Cui et al. (2011) oder Dupray et al. (2014) z. B. zeigen, dass bei Energiepfählen ein großer Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Anlage und auf die Temperaturantwort des Untergrundes besteht, wenn eine Grundwasserströmung vorhanden ist. Maßgebend für den Energieertrag des Grundwassers ist die Strömungsgeschwindigkeit am thermisch aktivierten Bauteil. Diese kann durch hydraulische Berechnungen ermittelt werden. Bei flächigen Bauteilen ist darüber hinaus die Strömungsrichtung in Bezug auf das Bauteil entscheidend. Da ein ins Erdreich einbindendes Bauteil ein undurchlässiges Hindernis darstellt, bewirkt es eine Änderung der Strömungsrichtung. An einem vertikal angeströmten Bauteil kommt es infolge dieser Umlenkung zu einer Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit an der Bauteiloberfläche. Bei vertikaler Anströmung ist daher ein deutlich geringerer Einfluss der Grundwasserströmung zu erwarten. An der zur Strömung parallelen Seite verbleibt dagegen eine ausreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit, weshalb bei flächigen Bauteilen möglichst eine strömungsparallele Seite thermisch aktiviert werden sollte. Sofern möglich, sollte bei der Planung von flächigen thermisch aktivierten Bauteilen demnach eine gesonderte Betrachtung der Richtung einer vorhandenen Grundwasserströmung erfolgen (Kürten 2014; Koppmann et al. 2014).

15.4 Auslegung und Bemessung thermisch aktivierter Bauteile

Die mögliche thermische Aktivierung von Bauteilen ist frühzeitig in der Planungsphase zu berücksichtigen, da z B. die Anlagentechnik des Gebäudes (Heiz- und Kühlsystem) an die geothermischen Randbedingungen angepasst werden muss. Aufgrund der erzielbaren Temperaturen sollte analog zu herkömmlichen Systemen der oberflächennahen Geothermie stets ein Niedertemperatursystem gewählt werden. Je nach Systemrandbedingungen ist es möglich, dass nicht der komplette Wärme- bzw. Kältebedarf des Gebäudes durch das thermisch aktivierte Bauteil gedeckt werden kann, sondern ein zweites unabhängiges Heizsystem erforderlich ist (VDI 4640-2 2001).

Die Anbindung der Leitungen an die Wärmepumpe ist aus konstruktiven Gründen ebenfalls frühzeitig zu planen. Da ein Ausfall von 2 % der Leitungen während des Betoniervorgangs bei thermisch aktivierten Betonbauteilen als systemtypisch anzusehen ist (Adam und Markiewicz 2003), muss dies bei der Auslegung berücksichtigt werden. Zur Schaffung von Redundanzen ist es daher vorteilhaft, mehrere unabhängige Rohrschlaufen ins Bauteil zu integrieren.

Bei der Planung von thermisch aktivierten Bauteilen ist neben der thermischen Leistungsfähigkeit auch die hydraulische Leistungsfähigkeit des Systems zu überprüfen. Hierbei sind vor allem die vorhandenen Druckverluste von Bedeutung, da die erforderliche Leistung der Pumpen für das Absorbersystem (inklusive Sammelleitungen und Verteiler) nur wenige Prozent der thermischen Leistung betragen sollte, um einen wirtschaftlichen Betrieb und somit eine hohe Arbeitszahl für die Anlage zu erreichen (Hofinger

et al. 2010). Aus hydraulischen oder wirtschaftlichen Aspekten kann dabei je nach Leitungslänge eine Serienschaltung von Leitungsgruppen sinnvoll sein (SIA D0190 2005). In der Ausführungsphase sind die für die Installation der thermisch aktivierten Bauteile erforderlichen Verlege- und Befestigungsarbeiten sinnvoll in den Bauablauf zu integrieren, um Bauverzögerungen zu vermeiden.

Die Berechnung bzw. Dimensionierung von thermisch aktivierten Bauteilen stellt eine komplexe Herausforderung dar, da sowohl die geometrischen Bedingungen aus dem Bauteil (Bauteilabmessungen, Rohrführung, Rohranzahl etc.) als auch die Untergrundverhältnisse (Bodenart, Temperatur, Grundwasser) sowie deren Interaktion zu berücksichtigen sind. Obwohl thermisch aktivierte Bauteile in Deutschland an Bedeutung gewinnen, gibt es derzeit keine eindeutigen Vorgaben hinsichtlich ihrer Auslegung und thermischen Dimensionierung. In VDI 4640-2 (VDI 4640-2 2001) wird empfohlen, in erster Näherung Rechenmethoden analog zu denen für Erdwärmesonden zu verwenden und in einer frühen Planungsphase bzw. im Rahmen einer Vordimensionierung mit Erfahrungswerten zur Entzugsleistung zu arbeiten. Dies ist als kritisch anzusehen, sofern das Verhältnis von Pfahllänge zu Pfahldurchmesser deutlich von dem bei einer Erdwärmesonde abweicht bzw. eine erhöhte Anzahl von Absorberrohren im Pfahl verlegt wurde. Die endgültige Auslegung in der Ausführungsplanung sollte daher stets über Rechenmodelle und geeignete Software erfolgen.

Für Energiepfähle existieren unterschiedliche Berechnungsansätze und in der Schweiz (SIA D0190 2005) und in Großbritannien (GSHPA 2012) sind normative Zusammenhänge vorhanden. Ein erster Berechnungsansatz für flächige thermisch aktivierte Bauteile, welcher es ermöglicht, sowohl die Randbedingungen des Bauteils als auch die Untergrundverhältnisse in der Planung zu berücksichtigen, wurde kürzlich entwickelt (Kürten 2014). Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über vorhandene Ansätze gegeben. Für eine detaillierte Beschreibung der Ansätze sei an dieser Stelle auf die jeweilige Literatur verwiesen.

15.4.1 Berechnungsansätze für Energiepfähle

15.4.1.1 Analytische Ansätze

Die einfachsten Ansätze für Energiepfähle basieren auf den Ansätzen für Erdwärmesonden und damit auf der Linien- (ILS) bzw. Zylinderquellentheorie (ICS) (z. B. Katsura 2009; Bozis et al. 2011). Aufgrund des häufig kleineren L/D-Verhältnisses von Pfählen (L/D = 5–55) im Vergleich zu Erdwärmesonden ($L/D < 600$) ist die Gültigkeit des Linien- oder Zylinderquellenansatzes jedoch nur eingeschränkt gegeben. Darüber hinaus werden die erhöhte Anzahl von Absorberrohren im Pfahl und deren gegenseitige Beeinflussung in der klassischen Linien- oder Zylinderquellentheorie nicht berücksichtigt. Durch das vorhandene (große) Betonvolumen sind außerdem zusätzliche Wärmetransportvorgänge bzw. Wärmespeichereffekte (Kapazitätseffekte) im Pfahl zu berücksichtigen. Für das Erreichen eines stationären Zustands im Pfahl ist im Vergleich zu Erdwärmesonden beispielsweise

eine größere Zeitspanne erforderlich (GSHPA 2012; Loveridge und Powrie 2013). Untersuchungen von Man et al. (2010) und Loveridge und Powrie (2013) zeigen, dass die reale Temperaturausbreitung im Umfeld eines Energiepfahls zwischen dem Ansatz der Linienquelle und dem der Zylinderquelle liegt. Während die ILS die Temperaturantwort im Boden überschätzt, führt die ICS zu einer Unterschätzung der Temperaturausbreitung.

Für die Berechnung von Energiepfählen wurde von Man et al. (2010) der Ansatz der *solid cylindrical heat source* publiziert. Dieser bildet im Gegensatz zur klassischen Zylinderquellentheorie den Energiepfahl nicht als Hohlquerschnitt, sondern als Vollquerschnitt ab. Der Ansatz wurde sowohl für eine infinite als auch eine finite Pfahllänge aufgestellt. Für Pfähle mit kleinem *L*/*D*-Verhältnis, sowie für die Betrachtung von langen Zeiträumen sollte analog zu Erdwärmesonden der Ansatz der finiten Wärmequelle gewählt werden (Man et al. 2011). Der Ansatz wurde von Cui et al. (2011) (*ring-coil heat source*) und Man et al. (2011) (*spiral heat source*) für eine spiralförmige Rohranordnung weiterentwickelt. Darin werden die Absorberrohre als gleichmäßig über die Pfahllänge verteilte Ringe ohne vertikale Verbindung (Cui et al. 2011) bzw. als eine Aneinanderreihung von Punktquellen abgebildet Man et al. (2011). Im Ansatz von Man et al. (2011) wird zusätzlich der Einfluss der Rohrströmung über thermische Widerstände berücksichtigt. Die mathematische Lösung erfolgt bei allen drei Ansätzen über die Greensche Funktion (Überlagerungsfunktion). Ein Nachteil der Ansätze ist, dass für den Pfahl dasselbe Material wie für das umgebene Medium (Boden) angesetzt wird. Die thermischen Eigenschaften von Beton und Boden können je nach vorliegenden Bedingungen jedoch deutlich abweichende Werte aufweisen. Zhang et al. (2013b) bzw. Zhang et al. (2014) erweitern den Ansatz von Cui et al. (2011) um die Kopplung mit der Moving-Heat-Source-Theorie zur Berücksichtigung einer Grundwasserströmung und zeigen, dass auch bei Energiepfählen ein großer Einfluss auf die Leitungsfähigkeit der Anlage besteht, wenn eine Grundwasserströmung vorhanden ist.

Li und Lai (2012) und Loveridge und Powrie (2013) entwickelten aufbauend auf dem Ansatz von Eskilson (1987) g-Funktionen für Energiepfähle. Dabei werden die Temperaturantwort des Bodens, des Betons sowie der Einfluss aus der Rohrströmung (thermische Widerstände) separat betrachtet und anschließend überlagert. Während der Ansatz von Li und Lai (2012) auf rein analytischen Methoden basiert und nur für kurze Betrachtungszeiträume gilt, entwickelten Loveridge und Powrie (2013) auf Grundlage numerischer Simulationen g-Funktionen für verschiedene Randbedingungen in Form von oberen und unteren Grenzwerten. Der Ansatz ist im Vergleich zum Ansatz Li und Lai (2013) einfacher in der Handhabung und eignet sich für eine Implementierung in Berechnungsprogramme Loveridge und Powrie (2013).

Energiepfähle werden in der Regel in Pfahlgruppen ausgeführt, sodass eine gegenseitige thermische Beeinflussung der Pfähle zu berücksichtigen ist. Im Allgemeinen kann dies mithilfe des Superpositionsprinzips erfolgen (Eskilson 1987; Katsura 2009). Loveridge und Powrie (2014b) publizierten darüber hinaus g-Funktionen für Energiepfahlgruppen. Entsprechend dem Vorgehen bei Erdwärmesonden können Energiepfahlgruppen auch über das *duct storage model* abgebildet werden. Pahud (1999) implementierten diesen

Ansatz in die Software PILESIM, welches für die Berechnung von kreisförmigen, großen, regelmäßigen Energiepfahlgruppen gute Ergebnisse liefert (Loveridge und Powrie 2014b).

15.4.1.2 Thermische Widerstände für Energiepfähle

Der Wärmetransport im Pfahl kann entsprechend dem bekannten Vorgehen bei Erdwärmesonden über die Formulierung von thermischen Widerständen erfolgen. Der Gesamtwiderstand setzt sich analog wie bei Erdwärmesonden aus der Summe der Rohrwiderstände und des Betonwiderstands zusammen. Der Betonwiderstand ist dabei vom Pfahldurchmesser, von der Rohranzahl, vom Rohrdurchmesser und von der Betonüberdeckung abhängig. In Loveridge und Powrie (2014a) wurde eine Formulierung für den Betonwiderstand in Abhängigkeit eines Formfaktors, der mithilfe von numerischen Simulationen für verschiedene Pfahlkonfigurationen bestimmt wurde, entwickelt.

In Zarrella et al. (2013) wurde ein Modell für den thermischen Pfahlwiderstand in Analogie zu den Erdwärmesonden durch eine Verschaltung von Widerständen entwickelt. Die inneren Widerstände $R_{s,i}$ werden dabei mithilfe von Finite-Elemente-Simulationen bestimmt und zu einem Ersatzwiderstand für einen äquivalenten Ersatzpfahl (bestückt mit einem U-Rohr) zusammengefasst. Ein Vergleich der Ergebnisse aus dem Widerstandsmodell mit Messwerten zeigt eine gute Übereinstimmung Zarrella et al. (2013), sodass sich dieser Ansatz ebenfalls für eine Implementierung in Berechnungsmodelle eignet.

Thermische Widerstände von Energiepfählen liegen mit $R_{\mathrm{Pfahl}} < 0{,}2\,\mathrm{mK/W}$ in derselben Größenordnung wie bei Erdwärmesonden. Werte unterhalb von $R_{\mathrm{Pfahl}} = 0{,}1\,\mathrm{mK/W}$ werden dabei lediglich bei Verwendung von mehr als zwei U-Rohren im Pfahl erreicht (SIA D0190 2005; Loveridge und Powrie 2014a).

Eine systematische Untersuchung zur Bestimmung der Einflussfaktoren auf den Pfahlwiderstand wurde in Loveridge und Powrie (2014a) durchgeführt. Erwartungsgemäß sinkt der Betonwiderstand mit steigender Rohranzahl und sinkender Betonüberdeckung der Rohre. Weiterhin ist der Pfahlwiderstand nahezu unabhängig vom Pfahldurchmesser, wenn

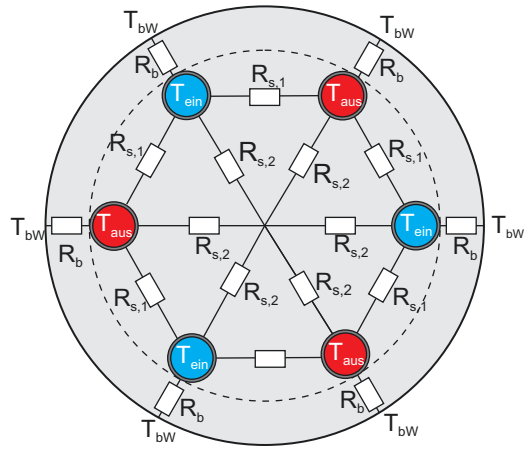


Abb. 15.8 Thermische Widerstände eines Energiepfahls mit 3 U-Rohren. (Kürten 2014)

die gleiche Anzahl an Rohren im Pfahl platziert wird. Weiterhin zeigen die Autoren, dass sich ein stationärer Zustand je nach Pfahldurchmesser erst nach ein bis fünf Tagen einstellt. Dies ist besonders bei einem Thermal-Response-Test an einem Energiepfahl zu beachten. Somit sollte bei der Betrachtung von kurzen Belastungsintervallen mit einem instationären Wärmeübergangswiderstand gerechnet werden. Der Pfahlwiderstand ist unabhängig von der Anordnung der Pfähle und kann somit für eine Pfahlgruppe und einen Einzelpfahl gleichermaßen bestimmt werden (Loveridge und Powrie 2014a).

15.4.1.3 Numerische Ansätze für Energiepfähle

Energiepfähle können alternativ mit numerischen Modellen berechnet werden. Ebenso wie bei Erdwärmesonden wird der Energiepfahl oder die Energiepfahlanlage dabei oftmals als (konstante) Temperaturrandbedingung erfasst (z. B. Laloui et al. 2006; Infante Sedano et al. 2012; Suryatriyastuti et al. 2014).

Derzeit sind nur wenige „reine“ numerische Modelle oder Ansätze zur Berechnung von Energiepfählen dokumentiert. Von Pahud (1999) wurde das Programm PILESIM auf Basis des Duct-Storage-Ansatzes entwickelt. Dieses kann für regelmäßig angeordnete (runde) Pfahlgruppen verwendet werden. Ungleichmäßige Pfahlraster können in ein äquivalentes gleichmäßiges Raster überführt werden, wenn der mittlere Pfahlabstand und die Grundfläche der Pfahlgruppe in beiden Modellen gleich sind. Der Fehler in der Temperaturberechnung liegt dann unterhalb von 1 °C (Teza et al. 2012).

Lee & Lam (2013) stellen eine Finite-Differenzen-Lösung vor. Der Untergrund und der Beton werden auf Basis der zweidimensionalen Wärmeleitung in eine Finite-Differenzen-Lösung überführt. Das Rohrsystem wird über die Widerstände der Rohrströmung abgebildet. Die Kopplung der beiden Teilsysteme erfolgt über eine iterative Berechnung des vorhandenen Wärmestroms, sodass dieser Ansatz eine Variante des Modell-im-Modell-Ansatzes darstellt. Weitere Finite-Differenzen-Lösungen wurden in Rouissi et al. (2012) oder in Ghasemi-Fare und Basu (2013) vorgestellt, die jedoch ebenfalls durch Vereinfachungen gekennzeichnet sind. So wird in Rouissi et al. (2012) beispielsweise nur ein einzelnes U-Rohr im Pfahl betrachtet. Der Einfluss einer Grundwasserströmung auf die Leistungsfähigkeit von Energiepfählen wurde unter anderem in Dupray et al. (2014) untersucht. Hier wird der Energiepfahl ebenfalls als Wärmequelle (Randbedingung) abgebildet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Grundwasserströmung ein deutlicher Einfluss auf die Temperaturantwort des Untergrunds ausgeübt wird.

15.4.2 Berechnungsansätze für flächige thermisch aktivierte Bauteile

Für flächige Bauteile wie Energiewände oder Energietunnel ist analog zu anderen geothermischen Systemen zwischen dem Wärmetransport im Boden sowie dem Wärmetransport in der Wand zu unterscheiden, welche bildlich als eine Reihenschaltung von Widerständen aufgefasst werden können.

Liegt eine ausreichende Innendämmung der Wand vor, kann das System vereinfacht als halbunendlicher Körper abgebildet werden, sodass im Wesentlichen ein eindimensionaler Wärmetransport erfolgt. Der effektive thermische Gesamtwiderstand für die Wand R_{Wand} kann in diesem einfachen Fall analog zu Erdwärmesonden aus den Ergebnissen von Thermal-Response-Tests abgeleitet werden (Koenigsdorff 2009). Treten jedoch in beide Richtungen der Wand nennenswerte Wärmeströme auf wie beispielsweise bei Energieschlitzwänden, ist die Definition eines einzelnen Gesamtwiderstands nicht mehr möglich. In diesem Fall sind die entsprechenden thermischen Widerstände bauteilspezifisch zu bestimmen.

Die Abbildung einer Grundwasserströmung im Widerstandsmodell ist analog zu den linienförmigen Bauteilen über eine *moving heat source* möglich. In Muzychka und Yovanovich (2001) wurden für rechteckige Wärmequellen Wärmeübergangswiderstände entwickelt. Der vorhandene Widerstand ist dabei sowohl von der Strömungsgeschwindigkeit als auch von der Form der Wärmequelle (Verhältnis von Länge und Breite) und der Strömungsrichtung abhängig. Werden vertikale Wärmeströme vernachlässigt, können diese Ansätze auch für eine Abschätzung des Einflusses einer Grundwasserströmung auf die Leistung einer Energiewand verwendet werden (Kürten et al. 2013c).

In Sun et al. (2013) wurde ein analytischer Ansatz zur Bemessung einer Energieschlitzwand publiziert, bei dem die Absorberrohre als einzelne Punktquellen betrachtet werden. Die Lösung der Differenzialgleichung erfolgt dabei mithilfe der Greenschen Funktion (Überlagerungsfunktion). Die Validierung des Ansatzes erfolgte durch numerische Simulationen und durch Feldversuche. Der Ansatz liefert zwar relative gute Übereinstimmungen für Zeitpunkte größer als 10 Stunden, ist jedoch äußerst komplex und schwer handhabbar. Darüber hinaus werden die Einflüsse aus dem Rohrsystem (Rohrströmung) nicht betrachtet (Sun et al. 2013). Da die Schlitzwand als homogenes Bauteil (Einschichtsystem) modelliert wird, können mehrschichtige Systeme mit diesem Ansatz nicht abgebildet werden.

Ein vereinfachter analytischer Ansatz zur Berechnung des Temperaturfelds im Umfeld eines thermisch aktivierten Tunnels auf Basis der zweidimensionalen Wärmeleitung wurde in Zhang et al. (2013a) veröffentlicht. Die Absorberleitungen werden hierbei als einzelne Linienquelle abgebildet, die nach dem Superpositionsprinzip überlagert werden. Der Einfluss der Rohrströmung wurde über thermische Widerstände abgebildet, während der Einfluss der Tunnelluft und der Felstemperatur über die Vorgabe von zeitlichen Temperaturrandbedingungen berücksichtigt wird. Der Ansatz wurde durch den Vergleich mit Ergebnissen aus Thermal-Response-Tests, welche im Lichang-Tunnel (Innere Mongolei, China) durchgeführt wurden, für Zeitpunkte größer als 10 Stunden verifiziert und eignet sich somit für Langzeitbetrachtungen. Einflüsse aus einer Grundwasserströmung können nicht abgebildet werden, da der Ansatz lediglich auf der Wärmeleitung basiert.

Durch die zum Teil großen Bauteilflächen und komplexen Geometrien wird das Problem komplexer Modelle und großer Rechenzeiten bei Energiewänden oder Tunneln verstärkt (Adam und Markiewicz 2010). Daher wird oft nur ein Detailprozess (z. B. einzelne Absorberrohre) abgebildet. Für die Abbildung komplexer Geometrien werden

die Absorberrohre bzw. das thermoaktive Bauteil in der Regel als Temperaturrandbedingung vorgegeben (Adam und Markiewicz 2010; Mayer und Franzius 2010), oder der umgebende Untergrund wird vereinfacht als homogener Körper abgebildet Hofinger und Kohlböck (2005). In Oberhauser und Adam (2005) wurde eine vereinfachte, gekoppelte Berechnung publiziert, die prinzipiell auf den Modell-in-Modell-Ansatz zurückzuführen ist. Das Absorberrohr wird dabei durch ein Finite-Elemente-Modell in der COMSOL-Umgebung abgebildet, wodurch eine explizite Berechnung der Rohrströmung möglich wird. Durch die Ermittlung der über die Oberfläche entzogenen Wärme konnte somit eine optimale Anlagenkonfiguration ermittelt werden Oberhauser und Adam (2005). Ein analoges Vorgehen wurde auch in Hofinger und Kohlböck (2005) für die Ermittlung der optimalen Rohranordnung für eine Energieschlitzwand und eine Energiebodenplatte beim Lainzer Tunnel in Wien gewählt. In Oberhauser und Adam (2005) wird das COMSOL-Subsystem auch in ein Anlagenmodell in der Simulink-Umgebung (MATLAB) eingebunden. Somit können verschiedene (jahreszeitliche) Betriebszustände oder Außentemperaturen abgebildet werden, für die FEMLAB dann aktuelle Wärmeentzugswerte für jeden Zeitpunkt berechnet Oberhauser und Adam (2005). Nachteilig an diesem Vorgehen ist, dass der Untergrund als „Festkörper" abgebildet wird. Eine explizierte Simulation des Bodens (z. B. Grundwasserströmung) kann mit diesem Ansatz nicht erfolgen.

In Schneider (2013) wurden zur Berechnung der Energieblöcke im Tunnel Stuttgart-Fasanenhof Finite-Elemente-Simulationen mit der Software FEFLOW durchgeführt. Einflüsse aus einer Grundwasserströmung wurden dabei ebenfalls vernachlässigt. Die Abbildung des Absorbersystems erfolgt über ein Ersatzsystem (*discrete feature elements* – DFE), welches sowohl konzeptionell als auch räumlich nur eine grobe Näherung der realen Verhältnisse wiedergeben kann sodass zum Teil große Abweichungen zwischen dem numerischen Modell und den Messwerten bestehen (Schneider 2013). Der Einfluss der Tunnelluft wurde über Temperaturrandbedingungen abgebildet.

In Kürten (2014) wurde ein Berechnungsmodell zur Beschreibung des Wärmeübergangs bei mehrschichtigen flächigen thermisch aktivierten Bauteilen auf Basis des Modell-im-Modell-Ansatzes für die Bemessung thermisch aktivierter Abdichtungselemente entwickelt. Dazu wurde für die Beschreibung des Wärmetransports ein Widerstandsmodell entwickelt, das alle Einflüsse aus dem Bauteil sowie alle vorhandenen Wärmeströme abbilden kann. Ein sogenannter Bauteilwiderstand stellt den Kern des Berechnungsansatzes dar, dessen Ermittlung durch einen an das Mehrschichtsystem angepassten und somit weiterentwickelten Ansatz nach Koschenz und Lehmann (2000) erfolgt. Analog zum Bauteilwiderstand werden auch die Einflüsse aus dem Rohrsystem über thermische Widerstände abgebildet. Der Berechnungsansatz basiert auf Ausführungen nach Glück (1982), der erstmals Gleichungen für den Temperaturverlauf in einem mehrschichtigen Bauteil mit eingelegten Rohrregistern aufstellte. Für flächige thermisch aktivierte Bauteile kann das System über eine Dreiecksschaltung (siehe Abb. 15.9a) abgebildet werden Koschenz und Lehmann (2000), die wiederum in eine äquivalente Sternschaltung (siehe Abb. 15.9b) übertragen werden kann und sich somit besser für eine mathematische bzw. numerische Umsetzung eignet.

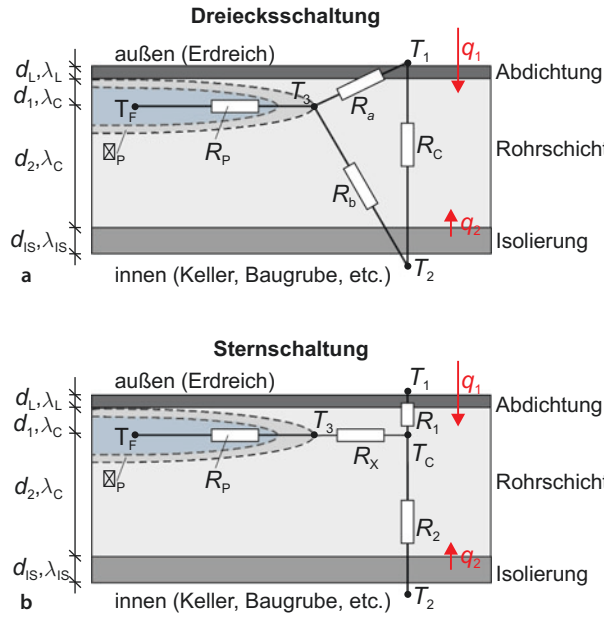


Abb. 15.9 Widerstandsanalogie des Berechnungsansatzes für flächige thermisch aktivierte Bauteile. (Kürten 2014)

Durch die Approximation des Systems als halbunendlicher Körper kann das Bauteilmodell analytisch über einen Bodenwiderstand an ein Untergrundmodell gekoppelt werden. Dabei wird analog zum Vorgehen bei Erdwärmesonden die Tatsache ausgenutzt, dass sich die Verhältnisse vorrangig in horizontaler Richtung ändern, während sie in vertikaler Richtung nahezu konstant bleiben. Somit können die Einflüsse aus dem Untergrund, wie beispielsweise die Temperaturausbreitung im Boden und eine vorhandene Grundwasserströmung, abgebildet werden. Der Ansatz wurde bereits in das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT-Suite implementiert (Rath et al. 2006). Das Berechnungsmodell und dessen numerische Umsetzung wurden durch Simulationen mit dem Programm COMSOL verifiziert. Zusätzlich wurde der Ansatz anhand von Laborversuche verifiziert und kalibriert. Obwohl der Ansatz ursprünglich für thermisch aktivierte Abdichtungselemente entwickelt wurde, kann er durch die Abbildung als Mehrschichtsystem auch für Bauteile ohne Abdichtung oder Isolierung angewendet werden. Die zugrunde liegenden Gleichungen behalten für diese Bauteile ihre Gültigkeit, sofern die thermischen Eigenschaften analog zur Rohrschicht definiert werden.

Literatur

Adam, D.: Innovative Systeme der Erdwärmenutzung – regenerative Energie aus dem Untergrund. Expertenforum Beton 2010 „Energiespeicher Beton“. St. Pölten, S. 14–22 (2010)

Adam, D., Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 3: Ausführungsbeispiele und Neuentwicklungen. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift. **148**(1), 2–12 (2003)

Adam, D., Oberhauser, A.: Kosten und Nutzen der Geothermie für die Verkehrsinfrastruktur. EI-Eisenbahningenieur. **59** (3), 6–12 (2008)

Adam, D., Markiewicz, R.: Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. Géotechnique. **59**(3), 229–236 (2009)

Adam, D., Markiewicz, R.: Nutzung der Geothermie mittels Erdwärmeabsorber und Grundwasserbrunnen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. **62**(5–6), 77–85 (2010)

Agemar, T., Schellschmidt, R., Schulz, R.: 3D-Modell der Untergrundtemperatur von Deutschland. Der Geothermiekongress 2011. Bundesverband Geothermie, Bochum (2011)

Allen, A., Milenic, D., Sikora, P.: Shallow gravel aquifers and the urban „heat island" effect: a source of low enthalpy geothermal energy. Geothermics. **32**(4–6), 569–578 (2003)

Arnfield, A. J.: Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. Int. J. Climatol. **23**(1), 1–26 (2003)

Banks D: An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling, 2. Aufl. John Wiley & Sons, Ltd, Hoboken (2012)

Bolk, P., Katzenbach, R., Waberseck, T., Steinbach, C.: Entwicklung des neuen, qualifizierte Winterdienstsystems QuaWiDis für Personenverkehrsflächen durch die Nutzung regenerativer Energien. Abschlussbericht FZ 19W3027 (2007)

Botelle, M., Payne, K., Redhead, B.: Squeezing the heat out of London's tube. Proceedings of the ICE – Civil Engineering. **163**(3), 144–122 (2010)

Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., Payne, P.: Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. Géotechnique. **59**(3), 237–248 (2009)

Bozis, D., Papakostas, K., Kyriakis, N. (2011) On the evaluation of design parameters effects on the heat transfer efficiency of energy piles. Energy Build. **43**(4), 1020–1029

Brandl, H.: Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique. **56**(2), 81–122 (2006)

Brandl, H., Adam, D., Markiewicz, R., Unterberger, W., Hofinger, H.: Massivabsorbertechnologie zur Erdwärmenutzung bei der Wiener U-Bahnlinie U2. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift. **155** (7–9/10–12), 1–7 (2010)

Brettmann, T. P. E., Amis, T., Kapps, M.: Thermal conductivity analysis of geothermal energy piles. Proceedings of the Geotechnical Challenges in Urban Regeneration Conference 2010. London (2010)

Chapman, W. P.: Design of snow melting systems. Heating and Ventilating. **49**(4), 96–102, (1952)

Chiasson, A.: Advances in modeling of ground-source heat pump systems. Master Thesis, Oklahoma State University, (1999)

Cui, P., Li, X., Man, Y., Fang, Z.: Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils. Appl. Energy. **88**(11)4113–4119 (2011)

Dupray, F., Li, C., Laloui, L: Heat-exchanger piles for the de-icing of bridges. Acta Geotechnica. **9**(3), 413–423 (2014)

EA-Pfähle: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle". Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.) Ernst & Sohn, Berlin (2012)

Ennigkeit A: Energiepfahlanlagen mit Saisonalen Thermospeicher. Dissertation. Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt 60 (2002)

Eskilson, P.: Thermal analysis of heat extraction boreholes. Doctoral Thesis. Lund Institute of Technology, Department of Mathematical Physics, Lund University (1987)

Ferguson, G., Woodbury, A. D.: Subsurface heat flow in an urban environment. ýJ. Geophys. Res.**109** (B2) (2004)
Frodl, S., Franzius, J. N., Bartl, T.: Planung und Bau der Tunnel-Geothermieanlage in Jenbach. Geomechanics and Tunneling. **3**(5), 658–668 (2010)
Fromentin, A., Pahud, D., Jaquier, C., Morath, M: Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs – Empfehlungen für Energiepfahlsysteme. Forschungsbericht, No. 120.104. Lausanne, Schweiz (1997)
Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., Yang, J.: Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application. Appl. Energy. **85**(10) 901–910 (2008)
Genath, B: So ist sie, die Deutsche Bahn AG – Geothermische Bahnsteigheizung Bad Lauterberg passt gut ins Klischee. Heizungsjournal. **3**(2011): 135–139 (2011)
Ghasemi-Fare, O., Basu, P.: A practical heat transfer model for geothermal piles. Energy Build. **66**: 470–479, (2013)
Glück, B.: Strahlungsheizung – Theorie und Praxis. C. F. Müller, Karlsruhe (1982)
Glück, B.: Simulationsmodell „Erdwärmekollektoren" zur wärmetechnischen Beurteilung von Wärmequellen, Wärmesenken und Wärme-/Kältespeichern. Forschungsbericht. http://berndglueck.de/erdwaermekollektor.php (2007). Zugegriffen: 11. Juli 2014
Grigull, U., Sandner, H.: Wämeleitung, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (1990)
GSHPA: Thermal Pile – Design, Installation & Materials Standards. Issue 1.0. Ground Source Heat Pump Association. Knowlhill, Milton Keynes, UK (2012)
Hägg, M., Andersson, O.: BTES for snow melting – experimental results from Arlanda Airport. Effstock 2009. 11th Conference on Thermal Energy (2009)
Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., Ochifuji, K.: Field performance of an energy pile system for space heating. Energy and Buildings. **39**(5): 517–524 (2007b)
Hanschke, T., Kühl, J. U., Freund, R., Mackert, K. L.: Die Geothermische Brücke Berkenthin. Bautechnik. **86**(11), 729–732 (2009)
Hassani, E., Uotinen, V. M., Kujala, K.: Numerical modelling of thermal regimes in steel energy pile foundations: A case study. Energ Buildings. **69**, 165–174 (2014)
Hofinger, H., Adam, D., Markiewicz, R., Unterberger, W.: Geothermieanlagen bei Großprojekten – Planung und Umsetzung. Geomechanics and Tunnelling. **3**(5), 634–646 (2010)
Hofinger, H., Kohlböck, D.: Wirtschaftliche Optimierung von Tunnelthermie®-Absorberanlagen – Grundlagenuntersuchung und Planungsleitfaden. Abschlussbericht (Projekt Nr. 12x05080) für die Magistratsabteilung **27**. Wien (2005)
Huang, S., Taniguchi, M., Yamano, M., Wang, C.: Detecting urbanization effects on surface and subsurface thermal environment – A case study of Osaka. Science of the Total Environment. **407**(9), 3142–3152 (2009)
Infante Sedano, J. A., Evgin, E., Fu, Z.: Analysis of multiphysics problems related to energy piles. The COMSOL Conference 2012. Boston (2012)
Kaiser, H., Beldermann, N.: Energiepfähle: eine fundamentale Energiequelle. Bbr. **3**(2013), 31–35 (2013)
Katsura, T., Nagano, K., Narita, S., Takeda, S., Nakamura, Y., Okamato, A. : Calculation algorithm of the temperatures for pipe arrangement of multiple ground heat exchangers. Appl. Therm. Eng. **29**(5–6), 906–919 (2009)
Katzenbach, R., Vogler, M., Waberseck, T.: Große Energiepfahlanlagen in urbanen Ballungsgebieten. Bauingenieur **83**(7–8), 343–348 (2008)
Koenigsdorff, R.: TRT an geothermischen Flächensystemen – erste Betrachtungen und Ergebnisse. Symposium „10 Jahre Thermal Response Test in Deutschland". Göttingen (2009)
Koppmann, D., Kürten, S., Mottaghy, D., Ziegler, M.: Auslegung und Berechnung von Thermoaktiven Bauteilen bei einer vorhandenen Grundwasserströmung. BBR Jahresmagazin. **12**(2014), 64–69 (2014)

Koschenz, M., Lehmann, B.: Thermoaktive Bauteile tabs. EMPA Energiesysteme/Haustechnik. Dübendorf, Schweiz (2000)

Kürten, S.: Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen University (2014)

Kürten, S., Ziegler, M., Ehrenberg, H., Mottaghy, D.: Beschreibung des Einflusses einer Grundwasserströmung auf den Wärmeertrag von flächigen thermo-aktiven Bauteilen. Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein (Hrsg.) 9. Österreichische Geotechniktagung 2013. Wien (2013c)

Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L.: Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. **30**(8), 763–781 (2006)

Lee, C., Park, S., Won, J., Jeoung, J., Sohn, B., Choi, H. : Evaluation of thermal performance of energy textile installed in Tunnel. Renew. Energy. **42**, 11–22 (2012)

Lee, C. K., Lam, H. N.: A simplified model of energy pile for ground-source heat pump systems. Energy. **55**, 838–845 (2013)

Li, M., Lai, A. C. K.: New temperature response functions (g-functions) for pile and borehole ground heat exchangers based on composite-medium line-source theory. Energy. **39**(1), 255–263 (2012)

Li, M., Lai, A. C. K.: Analytical model for short-time responses of ground heat exchangers with U-shaped tubes: Model development and validation. Applied Energy. **104**, 510–516 (2013)

Loveridge, F., Powrie, W.: 2D thermal resistance of pile heat exchangers. Geothermics. **50,** 122–135 (2014a)

Loveridge, F., Powrie, W.: Temperature response functions (g-functions) for single pile heat exchangers. Energy. **57**, 554–564 (2013)

Loveridge, F., Powrie, W.: G-Functions for multiple interacting pile heat exchangers. Energy. **64**, 747–757 (2014b)

Lund, J. W, Freeston, D. H, Boyd, T. L: Direct utilization of geothermal energy 2010 – worldwide review. Geothermics. **40**(3), 159–180 (2011)

Lund, J. W.: Pavement Snow Melting. GHC Bulletin. **21**(2), 12–19 (2000)

Mackert, K. U.: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn. Expertengespräch Stahlbrückenbau. 17.09.2011. Bergisch Gladbach (2011)

Man, Y., Yang, H., Diao, N., Liu, J., Fang, Z.: A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers. Int. J. Heat Mass Transfer. **53**(13–14), 2593–2601 (2010)

Man, Y., Yang, H., Diao, N., Cui, P., Lu, L., Fang, Z.: Development of spiral heat source model for novel pile ground heat exchangers. HVAC&R Research. **17**(6), 1075–1088 (2011)

Markiewicz, R.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Wien (2004)

Mayer, P. M., Franzius, J. N.: Thermische Berechnungen im Tunnelbau. Geotechnik. **33**(2), 145–151 (2010)

McCartney, J. S.: Engineering performance of energy foundations. Pan-AM CGS Geotechnical Conference 2011. Toronto, Canada (2011)

Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., Blum, P.: Subsurface urban heat islands in German cities. ýSci. Total Environ. **442**, 123–133 (2013a)

Menberg, K., Blum, P., Schaffitel, A., Bayer, P.: Long-term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island. Environ. Sci. Technol. **47**(17), 9747–9755 (2013b)

Mimouni, T., Dupray, F., Laloui, L.: Estimating the geothermal potential of heat-exchanger anchors on a cut-and-cover tunnel. Geothermics. **51**, 380–387 (2014)

Morino, K., Oka, K.: Study on heat exchanged in soil by circulating water in steel pile. Energy and Buildings. **21**(1), 65–78 (1994)

Muzychka, Y. S., Yovanovich, M. M.: Thermal resistance models for non-circular moving heat sources on a half space. J. Heat Transfer. **123**(4), 624–632 (2001)
Nagano, K., Katsura, T., Takeda, S., Saeki, E., Nakamura, Y., Okamato, A., Narita, S.: Thermal characteristics of steel foundation piles as ground heat exchangers. 8th IEA Heat Pump Conference. Las Vegas (2005)
Nicholson, D. P., Chen, Q., Pillai, A., Chendorain, M.: Developments in Thermal Pile and Thermal Tunnel Linings for City Scale GSHP Systems. Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California (2013)
Oberhauser, A., Adam, D.: Erdwärmenutzung im Eisenbahntunnelbau – Simulation und Wirtschaftlichkeitsberechnung. COMSOL Conference 2005. Frankfurt (2005)
Oberhauser, A., Adam, D.: Optimierungspotenziale der Erdwärmenutzung an Verkehrsinfrastrukturprojekten. Beton und Zement. **2**, 14–19 (2006)
Oberhauser, A., Adam, D., Hosp, M., Kopf, F.: Der Energieanker – Synergien bei der Nutzung eines statisch konstruktiven Bauteils. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift. **151** (4–6): 97–102 (2006)
Oke, T. R.: City size and the urban heat island. Atmos. Environ. **7**(8), 769–779 (1973)
Pahud, D.: PILESIM – LASEN – Simulation tool for heating/cooling systems with heat exchanger piles or borehole heat exchangers. User Manual. Lausanne, Schweiz (1999)
Park, H., Lee, S. R., Yoon, S., Choi, J. C.: Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation. Appl. Energy. **103**, 12–24 (2013)
Perrier, F., Le Mouël, J. L., Poirier, J. P., Shnirman, M. G.: Long-term climate change and surface versus underground temperature measurements in Paris. Int. J. Climatol. **25**(12), 1619–1631 (2005)
Pralle, N., Franzius, J. N., Gottschalk, D.: StadtBezirk – Mobilität und Energieversorgung – Neue Synergiepotenziale am Beispiel geothermisch nutzbarer urbaner Tunnel. VDI Bautechnik, Jahresausgabe 2009/2010. 98–103 (2010)
Puttke, B.: Coastal waters as profitable renewable energy source. Coastal & Marine. **22**(1), 16 (2013)
Rath, V., Wolf, A., Bücker, M.: Joint three-dimensional inversion of coupled groundwater flow and heat transfer based on automatic differentiation: Sensitivity calculation, verification and synthetic examples. Geophys. J. Int.**167**(1), 453–466 (2006)
Rouissi, K., Krarti, M., McCartney, J. S.: Analysis of thermo-active foundations with U-tube heat exchangers. J Sol Energ-t Asme. **134**(2), 021008 (2012)
Santamouris, M.: On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. Energy Build. **82**, 100–113 (2014)
Schneider, M.: Zur energetischen Nutzung von Tunnelbauwerken – Messungen und numerische Berechnungen am Beispiel Stuttgart Fasanenhoftunnel. Dissertation. Mitteilung Nr. 68 des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart (2013)
Schneider, M., Vermeer, P. A.: Tunnelgeothermische Teststrecke Stuttgart-Fasanenhof. 7. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Ostfildern: 605–612 (2010)
Schröder, B., Hanschke, T.: Energiepfähle – umweltfreundliches Heizen und Kühlen mit geothermisch aktivierten Stahlbetonfertigpfählen. Bautechnik. **80**(12), 925–927 (2003)
SIA D0190: Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen – Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb. Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein. SIA-Dokumentationsreihe, Zürich (2005)
Smith P: Energy Piles – Renewable Energy from Foundations. http://de.scribd.com/doc/190486172/Energy-Piles-NIGG-2 (2011). Zugegriffen: 14. Juli 2014
Sun, M., Xia, C., Zhang, G.: Heat transfer model and design method for geothermal heat exchange tubes in diaphragm walls. Energy Build. **61,** 250–259 (2013)
Suryatriyastuti, M. E., Mroueh, H., Burlon, S.: A load transfer approach for studying the cyclic behaviour of thermo-active piles. Comput. Geotech. **55**, 378–391 (2014)

Teza, G., Galgaro, A., De Carli, M.: Long-term performance of an irregular shaped borehole heat exchanger system: Analysis of real pattern and regular grid approximation. Geothermics. **43**: 45–56 (2012)

Uponor : Geothermie – Technische Informationen 03/2012. Informationsmaterial der Firma Uponor GmbH (2012)

VBI : Oberflächennahe Geothermie. VBI-Schriftenreihe, Band 18. Verband Beratender Ingenieure. Berlin (2012)

VDI 4640-2: Thermische Nutzung des Untergrunds. Teil 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Beuth Verlag, Berlin (2001)

von der Hude, N., Sauerwein, M.: Energiepfähle in der praktischen Anwendung. In: Vorträge zum 14. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 15. März 2007. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt. **76**, 95–109 (2007)

Wang, H., Chen, Z.: Study of critical free-area ratio during the snow-melting process on pavement using low-temperature heating fluids. Energy Conversion and Management. **50**(1), 157–165 (2009)

Watkins, R., Palmer, J., Kolokotroni, M., Littlefair, P.: The balance of the annual heating and cooling demand within the London urban heat island. Building Services Engineering Research and Technology. **23**(4), 207–213 (2002)

Winterling, R.: ENERGIETÜBBING – Infrastruktur wird zur Energiequelle. Geothermische Energie. **73**(2), 24–27 (2012)

Wood, C. J., Liu, H., Riffat, S. B.: An investigation of the heat pump performance and ground temperature of a piled foundation heat exchanger system for a residential building. Energy. **35**(12), 4932–4940 (2010)

Würtele, M., Sprinke, P., Eugste, r.W.: Geothermie sorgt für Verkehrssicherheit. Studie im Auftrag des Ministeriums für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen. Abschlussbericht (2005)

Xia, C., Sun, M., Zhang, G., Xiao, S., Zou, Y.: Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls. Energy and Buildings. **52**, 50–55 (2012)

Yu, W., Yi, X., Guo, M., Chen, L.: State of the art and practice of pavement anti-icing and de-icing techniques. Sciences in Cold and Arid Regions. **6**(1): 14–21 (2014)

Zarrella A, De Carli M, Galgaro A: Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube. Appl. Therm. Eng. **61**(2): 301–310 (2013)

Zhang, G., Xia, C., Sun, M., Zou, Y., Xiao, S.: A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers. Cold Regions Science and Technology. **88**, 59–66 (2013a)

Zhang, W., Yang, H., Lu, L., Cui, P., Fang, Z.: The research on ring-coil heat transfer models of pile foundation ground heat exchangers in the case of groundwater seepage. Energy and Buildings. **71**, 115–128 (2014)

Zhang, W., Yang, H., Lu, L., Fang, Z.: The analysis on solid cylindrical heat source model of foundation pile ground heat exchangers with groundwater flow. Energy. **55**, 417–425 (2013b)

Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K. D., Bayer, P.: The geothermal potential of urban heat islands. Environmental Research Letters 5. 044002 (2010)

Nutzung oberflächennaher Erdwärme aus einem erdgedeckten Flüssiggastank mit einer Wärmepumpe, angetrieben durch ein Blockheizkraftwerk

16

Thomas Heinze

Inhaltsverzeichnis

16.1 Einleitung 514
16.2 Aufbau des Demonstrators 515
16.2.1 Komponentenauswahl 515
16.2.2 Inbetriebnahme und Einfahren der Wärmepumpe mit Wasser 516
16.2.3 Erster Testlauf mit Regenwasserzisterne als Erdwärmesonde 516
16.2.4 Zweiter Testlauf mit Luft-Wärmetauscher 517
16.2.5 Sicherheitstechnik 517
16.2.6 Kondensatrückführung in den Gastank 518
16.3 Erste Versuchsläufe mit Flüssiggas aus dem Erdtank 518
16.3.1 Optimierung der Gasentnahme am Erdtank 518
16.4 Ausblick 522

Zusammenfassung

Ein erdgedeckter Flüssiggastank von mittlerer Größe (2,1 t) hat ca. 33 m2 Kontaktfläche zum Erdreich. In Kombination mit einem Blockheizkraftwerk, welches von dem Erdtank versorgt wird, wird der Tank gleichzeitig als Direktverdampfer für eine Wärmepumpe verwendet. Zur Erprobung des Verfahrens wurde eine Prototypenanlage mit einer Wärmepumpe aufgebaut, die Propan als Kältemittel nutzt, wobei der Tank als Erdwärmesonde zur oberflächennahen Erdwärmegewinnung dient. Der Versuchsbetrieb an einer real existierenden Anlage zeigt erste vielversprechende Ergebnisse des Verfahrens. Durch die dargestellten Messungen konnte der Nachweis der grundsätzlichen Funktion des Systems erbracht werden. Der Erdtank hat trotz seiner relativ geringen

Thomas Heinze (✉)
Lehrgebiet Kraft- und Arbeitsmaschinen, an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Goebenstr. 40, 66117 Saarbrücken, Deutschland
e-mail: Thomas.Heinze@htwsaar.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_16

Tiefe von nur ca. 2 m an der tiefsten Stelle genügend Oberfläche, um dauerhaft als Erdwärmesonde fungieren zu können.

Schlüsselwörter

Erdgedeckter Flüssiggastank · Direktverdampfer · Erdwärmepumpe · Erdwärmesonde · Erdwärmekollektor · Propan, Brenngas · ölfreier Verdichter · Blockheizkraftwerk · BHKW · BHKW-Strom Eigennutzung · BHKW-Strom Selbstnutzung · Rentabilität Einspeisevergütung · Wärmeleitfähigkeit Erdreich · oberflächennahe Geothermie

16.1 Einleitung

Vor dem Hintergrund einer rationelleren Nutzung unserer begrenzten fossilen Energieressourcen entstand die Idee, einen erdgedeckten Flüssiggastank (LPG-Tank) parallel zu seiner eigentlichen Nutzung als Gaspeicher zusätzlich als Direktverdampfer zur Nutzung oberflächennaher Geothermie für eine Erdwärmepumpe zu verwenden. Im Rahmen dieses Beitrags wird der Aufbau eines ersten Demonstrators beschrieben (Abb. 16.1). Ebenso werden erste Erfahrungen mit dessen Betrieb dargestellt.

Ziel war es, die Anlage direkt in den Betrieb eines Blockheizkraftwerks (BHKW) in einem Ein- bzw. Mehrfamilienhaus zu integrieren, um die Stromeigennutzung zu erhöhen bzw. den unrentablen Stromüberschuss zu minimieren und so einen möglichst effizienten

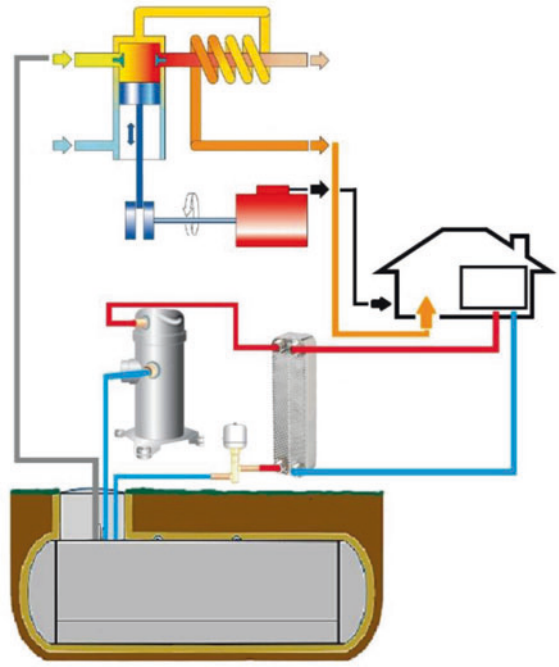


Abb. 16.1 Schema der Demonstratoranlage mit Flüssiggastank, Wärmepumpe und BHKW

und für den Hauseigentümer lukrativen Betrieb eines Kraft-Wärme-Kopplungssystems zu gewährleisten. Das genannte Ziel sollte durch eine neuartige und innovative Kombination der Systeme Blockheizkraftwerk und Wärmepumpe erreicht werden. Dabei sollten die Gesamtkosten deutlich unter der Summe der Einzelkosten von BHKW und Wärmepumpe liegen.

Die genannte Kombination hat eine hohe Systemeffizienz und fördert damit den Wandel von herkömmlichen Heizungssystemen zu Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Dadurch wird wertvoller Kraftstoff nicht einfach nur verbrannt, sondern zumindest teilweise in höherwertige Energie, den elektrischen Strom, umgewandelt. Mithilfe der gekoppelten Wärmepumpe soll dieser Strom in ein Vielfaches an Wärme (entsprechend COP) verwandelt und zum Heizen eines Hauses verwendet werden. Somit soll der bisher erforderliche Kraftstoffeinsatz beim Heizen eines Ein- bzw. Mehrfamilienhauses um bis zu 50 % reduziert werden.

Der deutlich reduzierte Brennstoffverbrauch führt zu einer gesteigerten Systemrentabilität im Vergleich zu einem reinen BHKW. Dadurch steigt die Akzeptanz der Kraft-Wärme-Koppelung im privaten Bereich. Durch den finanziellen Vorteil des Endkunden und die gleichzeitige Senkung der CO_2-Emissionen entsteht eine Win-win-Situation für den Nutzer und die Umwelt.

16.2 Aufbau des Demonstrators

Für den Demonstrator (erster Prototyp) wurde eine Wärmepumpe als Sonderanfertigung aus einzelnen Komponenten aufgebaut. Da das Versuchssystem möglichst viele Freiheitsgrade zur optimalen Einstellung und Anpassung an den Flüssiggastank haben sollte, wurde keine Serienwärmepumpe oder Serienklimaanlage verwendet. Das System wurde auf Propan (R290) ausgelegt, wobei als Hauptauslegungskriterium für die Größe der Anlage der maximale Gasentnahmestrom bzw. die maximale Verdampfungsleistung des erdgedeckten Flüssiggastanks verwendet wurde. Hierzu wurden vom Tankhersteller spezifizierte Werte abhängig von der Größe und Aufbauart des jeweiligen LPG-Tanks verwendet.

Weiterhin musste ein erwarteter Ölverlust des Kompressors bzw. der Eintrag von Kompressorenöl in den Tank unbedingt vermieden werden. Hierzu wurde ein zusätzlicher Trennwärmetauscher verwendet, der mit seiner Gradigkeit leider zu nicht vermeidbaren COP-Verlusten führt, wie später noch genauer beschrieben wird.

16.2.1 Komponentenauswahl

Für den Aufbau des Demonstrators, siehe Abb. 16.2, wurden die folgenden Komponenten aus dem Klimaanlagenbau ausgewählt:

- Als Kompressor kam ein Bitzer 2FC-3.2P Hubkolbenverdichter zum Einsatz. Dieser ist speziell für den Einsatz von R290 (Propan) vorbereitet.

Abb. 16.2 Die Wärmepumpe mit ihren Hauptkomponenten

- Es wurden Koaxialwärmetauscher (WKE44, WKC 20 und WKE 10) der Firma Wieland verwendet.
- Der Überhitzungsregler EC-3 X-32 samt Sensoren, das Expansionsventil EX-4, das Schauglas und der Trockner stammen von Emerson Climate.
- Das Gehäuse mit Peripherie wurde an der HTW gebaut und die Montage der kältetechnischen Komponenten wurde durch die Firma Klima Becker ausgeführt.

16.2.2 Inbetriebnahme und Einfahren der Wärmepumpe mit Wasser

Zur Inbetriebnahme und zum Einfahren der Wärmepumpe wurde das System, insbesondere aus Sicherheitsgründen, noch nicht an den Gastank angeschlossen. Für die ersten Schritte der Inbetriebnahme wurden konventionelle bekannte Ansätze gewählt. Dies bietet gleichzeitig den Vorteil, dass das neue System direkt mit dem Stand der Technik verglichen werden kann.

16.2.3 Erster Testlauf mit Regenwasserzisterne als Erdwärmesonde

Nachdem Schaltschrank und Messtechnik montiert waren, folgten die ersten Testläufe der Wärmpumpe, vorerst an einem Wasserkreislauf, der mit einer betonierten, erdgedeckten

Regenwasserzisterne mit einem Speichervolumen von 12 m^3 Inhalt gekoppelt war. Dabei wurden die wichtigsten Voreinstellungen (insbesondere Wahl der Regelparameter) vorgenommen und die Wärmepumpe auf ordnungsgemäße Grundfunktionen getestet. An der Zisterne wurden COP-Werte von 3,5–4 erreicht. Ferner zeigten sich auch die Grenzen eines wasserbasierten Systems, da nach einigen Tagen Laufzeit die Zisternentemperatur so weit gefallen war, dass es im Trennwärmetauscher der Wärmepumpe zu Vereisungen kam.

16.2.4 Zweiter Testlauf mit Luft-Wärmetauscher

Zu Vergleichszwecken mit einer konventionellen Luft-Wärmepumpe wurde die Versuchswärmepumpe auch mit einem Luft-Wärmetauscher betrieben, Abb. 16.3. Dabei waren die erzielten Leistungen deutlich geringer (COP 2,5). Das Problem der Vereisung stellte sich bei dieser Betriebsart als deutlich kritischer dar. Schon nach einer Laufzeit kleiner einer Stunde vereisten die Luft-Wärmetauscher von außen durch gefrierendes Kondensat aus der Umgebungsluft. Eine Fortsetzung des Betriebs war erst wieder nach einer ca. 30 min Enteisung der Wärmetauscher möglich.

16.2.5 Sicherheitstechnik

Parallel wurde zu den ersten Versuchen an der Verbindung zwischen dem vorgesehenen Gastank und der Wärmepumpe gearbeitet. Dabei stand Sicherheit immer an oberster Stelle. Die Nutzung eines Gastanks als Direktverdampfer erfordert besondere Sicherheitsmaßnahmen, da ein leichtbrennbares Gas als Kältemittel verwendet wird. Aus diesem Grund wird die Anlage sowohl aktiv wie auch passiv überwacht. Die aktive Überwachung besteht

Abb. 16.3 Improvisierter Luft-Wärmetauscher

aus einem eigens entwickelten mikrocontrollerbasierten Steuergerät, welches Magnetventile in Abhängigkeit von verschiedenen Eingangssignalen (Druckverlusten, Überdruck, Gasalarm, Verdichterstatus usw.) schaltet. Die passive Sicherheit besteht aus diversen Schlauchbruchsicherungen sowie Rückschlagventilen der Firma GOK.

16.2.6 Kondensatrückführung in den Gastank

Eine besondere Herausforderung stellte die Rückführung des kondensierten Gases in den Gastank dar. Hier musste neben einer geeigneten Flüssiggaspumpe auch eine Möglichkeit zur Füllstandsüberwachung der Kondensatpumpe bzw. Kondensaterkennung gefunden werden. Weiterhin ist das thermodynamische Verhalten des Kondensats auf der Siedelinie von entscheidender Bedeutung.

Letztendlich wurde ein hermetisch geschlossenes System mit integrierter für LPG modifizierter Kraftstoffpumpe aus dem Automobilbereich aufgebaut, siehe Abb. 16.4. Hierzu wurde ein spezieller druckfester Prüfbehälter verwendet. Dieser besteht aus einem Glaszylinder, der zwischen einer Boden- und einer Deckelplatte aus Edelstahl verschraubt wird. Dadurch ergibt sich der große Vorteil, dass man die Vorgänge im Inneren des hermetisch geschlossenen Pumpensystems wie z. B. die Füllstände, das Verhalten des Gases auf Siedelinie etc. verfolgen kann. Die Pumpe wird über eine Lichtschranke mit nachgeschaltetem RC-Zeitglied gesteuert und pumpt so die entstandene Flüssigphase in einem vorgegebenen Rhythmus in den Flüssiggastank zurück. Des Weiteren sind an dem Prüfbehälter analoge Anzeigen für Druck und Temperatur angebracht, die u. a. eine gute Kontrolle des Systems und dessen elektronischen Sensoren zulassen.

Nach erfolgreicher Dichtigkeitsprüfung konnte erstmals die Funktion der Sicherheitsvorkehrungen in der Praxis überprüft werden. Alles funktionierte auf Anhieb weitgehend wie gewünscht. Ausnahme war eine Art „Entlüftungsproblem“, begründet durch das Verhalten des Kondensats auf der Siedelinie. Die ersten Versuche zeigten, dass die Flüssigphase nur widerwillig in den Glaszylinder läuft. Eine Gasausgleichsleitung (vergleichbar mit einer Art Entlüftungsleitung) in der oberen Abschlussplatte des Zylinders schaffte hier schnell Abhilfe.

16.3 Erste Versuchsläufe mit Flüssiggas aus dem Erdtank

Bereits die ersten Tests am Gastank verliefen überaus erfolgreich. Alle Systeme funktionierten einwandfrei und ohne Störungen oder Ausfälle.

16.3.1 Optimierung der Gasentnahme am Erdtank

Zur Minimierung des Kompressionsaufwands bzw. zur Maximierung des COP ist es zwingend erforderlich, das Gas (verdampftes LPG) direkt aus dem Hochdruckbereich

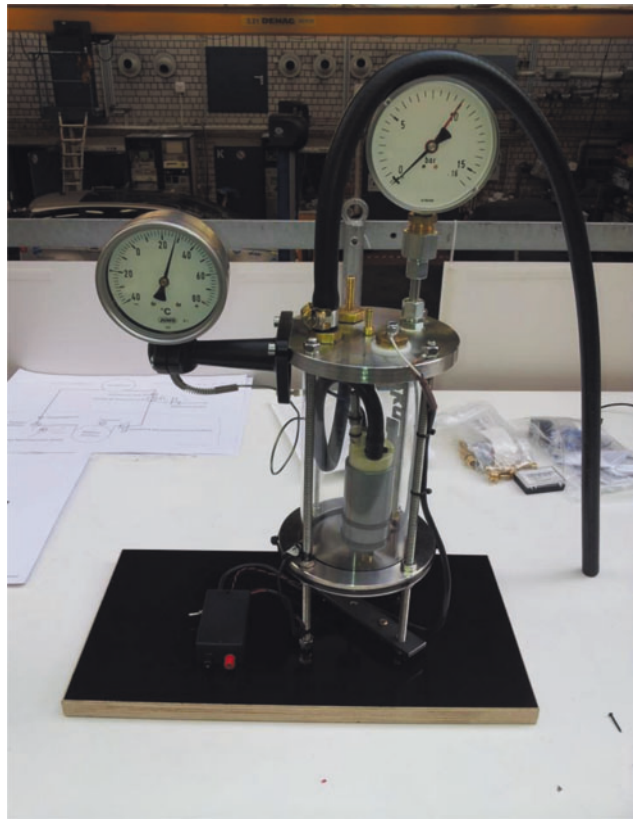


Abb. 16.4 Prüfzylinder mit LPG-Pumpe

der Gasphase, also noch vor dem angebauten Druckminderer zu entnehmen. Um den Kostenaufwand für den Entnahmeanschluss am Tank möglichst gering zu halten, sollte ursprünglich die Gasentnahme aus dem Notversorgungsanschluss am Druckminderer erfolgen, da dieser noch vor der ersten Druckminderungsstufe am Entnahmemodul angebaut ist. Jedoch wurde schnell klar, dass bei der Entnahme der benötigen hohen Gasphasen-Massenströme (>30 kg/h) hohe Druckverluste an der Entnahmestelle entstehen. Der kleine Notversorgungsanschluss am Gastank, durch den das Gas entnommen wurde, ist für eine Flüssigphasenbefüllung oder nur vergleichsweise geringe Gasphasen-Volumenströme ausgelegt. Hier konnte die Firma GOK mit einem speziellen T-Stück mit größerem Querschnitt zwischen Gasentnahmemodul und Druckminderer aushelfen. Die Druckverluste konnten dadurch von über 2 bar auf etwa 1 bar reduziert werden. Weitere Maßnahmen zur Verringerung des Druckabfalls sind in Arbeit.

Nachdem die Anlage stabil und bei sinnvollen Betriebspunkten gefahren werden konnte, stand die Frage der Wärmeregeneration des Gastanks nach Entnahme von Erdwärme ganz oben auf der Prioritätenliste. Der Hintergrund dafür ist, dass das vorgeschlagene innovative Verfahren nur dann ein gutes Zukunftspotential hat, wenn der Gastank sich

im Erdreich schnell genug regeneriert, d. h. wieder erwärmt. Hierzu wurde der Tank mit der Wärmepumpe runtergekühlt und nach dem Ausschalten der Wärmpumpe eine Aufheizkurve zur Bestimmung der relevanten Zeitkonstanten bestimmt. Durch das Abschalten der Wärmpumpe entfällt der Druckverlust bei der Gasentnahme. Damit kann aus dem Tankdruck direkt auf die Tanktemperatur geschlossen werden. Zum Abkühlen des Tanks wurde die Wärmepumpe drei Stunden am Stück betrieben. Da die Wärmepumpe bewusst überdimensioniert ist, ließ sich durchschnittlich eine Wärmeleistung von etwa 3 kW aus dem Tank entnehmen (diese Werte stammen noch aus Messreihen mit einem Druckabfall >2 bar). Das ist die doppelte Energiemenge, die laut Tankspezifikation dauerhaft entnommen werden kann! Die Folge ist, dass der Tank sich im Laufe des Betriebs abkühlt. Der Gastank konnte auf diese Art und Weise von 6,2 bar absolut (= 10 °C) auf etwa 5,2 bar absolut (= 3,7 °C) abgekühlt werden. Die im Anschluss gemessene Aufheizkurve zeigt Abb. 16.5. Bei allen beschriebenen Tests war der Tank nur zu 45 % (950 kg) gefüllt.

Aus der Aufheizkurve kann unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Gases und des Gastanks die in den Tank eingetragene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ermittelt werden (Abb. 16.6). Der Begriff „Geowärme“ wird im Folgenden vereinfachend für die Menge der vom Tank bezogenen oberflächennahen Erdwärme verwendet.

Aus den vorangegangenen Diagrammen können erste Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Gastanks gezogen werden. In einem weiteren Versuch wurde eine Messreihe zur Ermittlung einer Abkühlkurve erstellt. Dazu wurde der Tankdruck in regelmäßigen Abständen während eines Versuches erfasst. Der Verlauf der Abkühlung ist in Abb. 16.7 gezeigt.

Wenn man die gemessenen Temperaturverläufe in Wärmeströme umrechnet, werden die jeweiligen Anteile an der Gesamtleistung ersichtlich (Abb. 16.8): Die rote Kurve zeigt, wie mit sinkender Tanktemperatur – also steigendem Temperaturunterschied zum Erdreich – der Erdwärmestrom zunimmt. Gleichzeitig fällt der Entnahmestrom durch

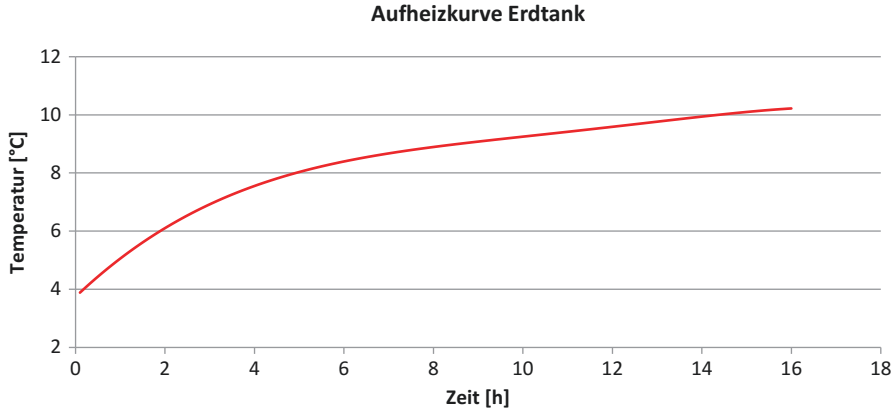


Abb. 16.5 Aufheizkurve

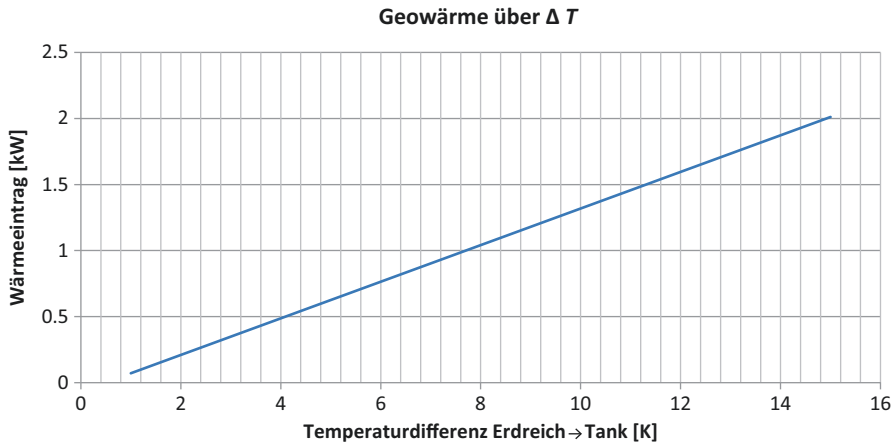


Abb. 16.6 Diagramm Wärmeeintrag

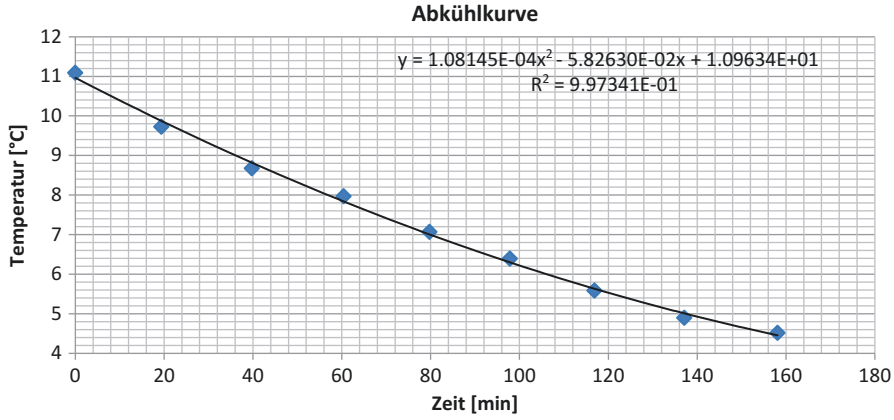


Abb. 16.7 Abkühlkurve

Abkühlung des Tanks (blaue Kurve), d. h. der Tank läuft in Richtung eines neuen Gleichgewichts, bei dem der Tank nicht weiter abgekühlt wird. Damit ist die dem Tank durch die Verdampfung entnommene Wärme mit der in den Tank nachströmenden oberflächennahen Erdwärme im Gleichgewicht. Die grüne Kurve zeigt die Summe der Verdampfungsleistung durch Abkühlung des Tankinhalts und durch Verdampfung durch oberflächennahe Erdwärme. Die gesamte Heizleistung der Wärmpumpe (oberste Kurve, violett) liegt über der grünen Kurve, da hier zusätzlich der Energiestrom aus der Antriebsleistung des Kompressors mit hineinfließt. Eine weitere Analyse der Messdaten führt bereits bei dem Demonstrator auf eine COP von ca. 3. Dies ist ein mittelgutes Ergebnis, was im Wesentlichen an den hohen Drosselverlusten bei der Gasentnahme und am noch notwendigen

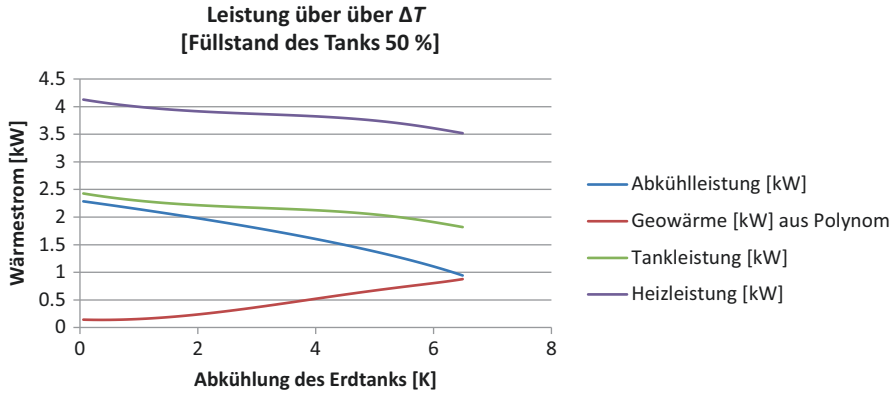


Abb. 16.8 Leistung abhängig von Tankunterkühlung

Trennwärmetauscher liegt, da ein ölfreier Kompressor noch nicht zur Verfügung stand. Das Ziel von COP >3 im eingeschwungenen Zustand konnte noch nicht erreicht werden, wobei jedoch zu beachten ist das die gemessene Leistungsziffer a) ohne aufwendige Erdbohrung und b) mit einem geräuschlosen (keine Lüftergeräusche vom Verdampfer) und nicht vereisenden Verfahren erreicht wurde.

16.4 Ausblick

Das Konzept zur oberflächennahen Erdwärmegewinnung aus einem erdgedeckten Flüssiggastank zeigt erste vielversprechende Ergebnisse an einer real existierenden Anlage. Damit konnte die grundsätzliche Funktionsweise des Verfahrens nachgewiesen werden. Der Erdtank hat trotz seiner relativ geringen Tiefe von nur ca. 2 m an der tiefsten Stelle genügend Oberfläche, um dauerhaft als Erdwärmesonde zu fungieren.

In den nächsten Schritten muss die Anlage weiter optimiert werden. Dazu muss insbesondere der Druckverlust an der Gasentnahme so weit wie möglich reduziert werden. Drosselverluste bei der Entnahme führen zu einer Verringerung der Verdampfungstemperatur (ca. 5 K pro bar). Mit der Beseitigung des derzeitig vorhandenen Druckverlustes von knapp einem bar kann die Verdampfungstemperatur um 5 K angehoben werden. Dies wird die Heizleistung um etwa 1 kW erhöhen, ohne dass eine signifikante Rückwirkung auf die Antriebsleistung eintritt. Somit scheinen COP Werte > 3 auch ohne ölfreien Kompressor in Zukunft realisierbar. Der erzielbare Wirkungsgrad wird in Zukunft weiter steigen, sobald ein ölfreier Kompressor zur Verfügung steht.

Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken

17

Thomas Grab, Thomas Storch und Ulrich Groß

Inhaltsverzeichnis

17.1 Einleitung und geschichtliche Entwicklung 524
17.2 Aufbau und Funktionsweise einer Grubenwasseranlage 525
17.2.1 Nutzungsarten 526
17.2.2 Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten 530
17.3 Planung, Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage 532
17.3.1 Planung 533
17.3.2 Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage 539
17.3.3 Bergrecht 540
17.3.4 Wasserchemie 542
17.3.5 Öffentlichkeitswirksame Darstellung 547
17.4 Übersicht zur weltweiten geothermischen Grubenwassernutzung 548
17.4.1 Entwicklung und aktueller Stand von Grubenwasseranlagen 548
17.4.2 Ausgewählte Beispiele 561
17.5 Fazit 575
Literatur 576

Zusammenfassung

Für die Erdwärmegewinnung aus Grubenwasser im oberflächennahen Bereich stellen nicht verschlossene und geflutete Bergwerke (z. B. Erz- und Kohlebergwerke) auch nach ihrer ursprünglichen Nutzung z. T. sehr geeignete Standorte für eine alternative und regenerative Energieversorgung dar. Geflutete Grubengebäude weisen aufgrund der großen künstlich geschaffenen wärmeübertragenden Flächen mit hohen

Thomas Grab (✉) · Thomas Storch · Ulrich Groß
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Lehrstuhl Technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 7, 09599 Freiberg, Deutschland
e-mail: thomas.grab@ttd.tu-freiberg.de; thomas.storch@ttd.tu-freiberg.de; gross@iwtt.tu-freiberg.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_17

Wasserdurchlässigkeiten zwischen Kavernen, Schächten und Stollensystemen sehr große Wärmepotentiale auf. Dieses kann durch unterschiedlichste Nutzungsarten z. B. zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden sowie Klimatisierung mit Grubenluft angewendet werden. Die ersten technischen Anwendungen von Grubenwasser im Bergwerk wurden zur Wasserhaltung und ab dem 19. Jahrhundert zur Elektroenergiegewinnung in sogenannten Kavernenkraftwerken realisiert. Getrieben durch steigende Energiepreise begann die thermische Nachnutzung der Wässer aus gefluteten Bergwerken gegen Ende der 1980er Jahre mit dem Einsatz von Wärmepumpen zur Anhebung des Temperaturniveaus.

Da jedes Bergwerk in Geologie, Aufbau und Infrastruktur einzigartig ist, gibt es viele wichtige Kriterien, welche für eine erfolgreiche Realisierung einer Grubenwasseranlage betrachtet werden müssen. In diesem Beitrag werden daher neben den möglichen Nutzungsarten auch deren Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten vorgestellt. Hierzu werden wichtige Punkte von der Planung mithilfe von Potentialstudien bis hin zur Umsetzung aufgelistet und beschrieben. Dabei werden auch das aktuelle Bergrecht und der prinzipielle Einfluss der Wasserchemie diskutiert.

Eine äußerst umfangreiche Übersicht zur weltweiten Situation der geothermischen Grubenwassernutzung zeigt die internationale Bedeutung dieser Energiequelle. Darin finden sich detaillierte Angaben zu über 70 betriebenen, geplanten oder vereinzelt wieder stillgelegten Anlagen. Erweiternd werden am Beispiel von zwei betriebenen Grubenwasseranlagen im Erzgebirge (Deutschland) wichtige Ergebnisse und Betriebserfahrungen aus dem realen Anlagenbetrieb präsentiert.

Schlüsselwörter

Geothermische Grubenwassernutzung · Grubenwasseranlagen · geflutete Bergwerke · Nachnutzung Bergwerke · regenerative Energiequelle · Wärmepumpen · Heizung · Kühlung · Grubenluft · Bergrecht · Wasserchemie · Arbeitszahl

17.1 Einleitung und geschichtliche Entwicklung

Die Nutzung von zutage tretenden Thermalwässern (hydrothermale Quelle) als eine Form gespeicherter geothermischer Energie reicht bis weit ins Altertum (Römisches Reich, Mexico etc.) zurück und ist dabei größtenteils auf geothermische Anomalien (z. B. vulkanische Aktivität) mit entsprechenden natürlichen Wasserdurchlässigkeiten (Störungszonen) zurückzuführen (Ernst und Hieblinger 1979; Oelsner 1982).

Die in diesem Kapitel behandelte geothermische Nutzung von Grubenwasser (auch Stollenwasser und Schachtwasser genannt) beruht auf einer künstlichen Schaffung von wärmeübertragenden Flächen und hoher Wasserdurchlässigkeit in Form von Kavernen, Schächten und Stollensystemen durch den Bergbau.

Geschichtlich ist der Bergbau eng mit der Gewinnung von Metallerzen durch obertägigen Abbau verknüpft und wird z. B. für die Harz-Region in Deutschland mit ca. 1000 v.

Chr. angegeben (Ramos und Falcone 2013). Ab dem 10. bis 12. Jh. entstehen vorrangig bei Silber- und Kupferlagerstätten sowohl im mitteldeutschen Raum (Harz, Mansfelder Land, Erzgebirge) als auch in anderen Gebieten des europäischen Kontinentes (Schweden, Slowakei etc.) weitreichende Bergbaureviere (Bernhard 1992; Ramos und Falcone 2013; Symmangk 2008).

Die Erschließung von tiefen Lagerstätten durch offene tiefe Tagebaue und unterirdischen Bergbau ist historisch eng mit neuen Entwicklungen zu ausgeklügelten Wasserhaltungstechnologien und -systemen (Wasserhebung, Wasserableitung etc.) verknüpft. Dabei wird das ständig in das Bergwerk zufließende Grubenwasser (Summe aus Oberflächen-/Niederschlagswasser, Sicker- und Grund-/Bergwasser) über ein umfangreiches Wasserhaltungssystem aus tiefen Bereichen nach oben befördert und anschließend über Wasserlösungsstollen zu Mundlöchern abgeführt (Bernhard 1992;, Dillenardt und Kranz 2010; Huber 1990; Roschlau und Heintze 1975).

Teilweise wurde die notwendige Wasserhaltung ab dem 19 Jh. gleichzeitig zur Elektroenergiegewinnung z. B. als Kavernenkraftwerk (ältestes Revierelektrizitätswerk: „Drei-Brüder-Schacht“ im Freiberger Revier) genutzt (Galinsky et al. 2001).

Mit der Stilllegung der Bergwerke wurde meist auch die energieintensive umfangreiche Wasserhaltung durch Pumpen eingestellt, wodurch es zur Flutung der Bergwerke bis auf das Niveau der noch aktiven Lösstollen kam. Das große geflutete Volumen mit näherungsweise konstanter Temperaturschichtung stellt hierbei u. a. aufgrund der riesigen wärmeübertragenden Flächen (Gestein/Wasser) ein enormes geothermisches Reservoir und Potential dar. Erste thermische Nutzungen des Grubenwassers wurden nach Stilllegung der Bergwerke und mit steigenden Energiepreisen ab Ende der 1980er Jahre (z. B. 1989 in Springhill/Kanada), größtenteils in Kombination mit Wärmepumpen zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden und Industrieprozessen, umgesetzt. Die derzeit bestehenden Geothermieanlagen mit entsprechender Grubenwassernutzung sind mit Ausnahmen vorwiegend auf Kanada, Deutschland, USA und Großbritannien beschränkt (Jessop et al. 1995; Loredo et al. 2016; Ramos und Falcone 2013).

In diesem Kapitel wird, ausgehend vom prinzipiellen Aufbau einer Grubenwasseranlage, eine umfangreiche Zusammenstellung von weltweit geplanten, betrieben und stillgelegten geothermischen Grubenwasseranlagen gegeben. Weiterführend werden ausgewählte Geothermieanlagen mit Grubenwassernutzung, die allgemeinen Schritte einer Grubenwasseranlagenplanung, die wichtigsten Parameter wie Wasserchemismus beispielhaft vorgestellt. Zudem werden die Vor- und Nachteile, die Herausforderungen, Planungsschritte und mögliche Hemmnisse für eine Grubenwasseranlage diskutiert.

17.2 Aufbau und Funktionsweise einer Grubenwasseranlage

Zu Zeiten des aktiven Bergbaus wird das ständig in das Bergwerk zufließende Grubenwasser (Summe aus Oberflächen-, Sicker-, Grundwasser), über ein umfangreiches Wasserhaltungssystem aus tiefen Bereichen nach oben befördert. Dazu wird das Grubenwasser

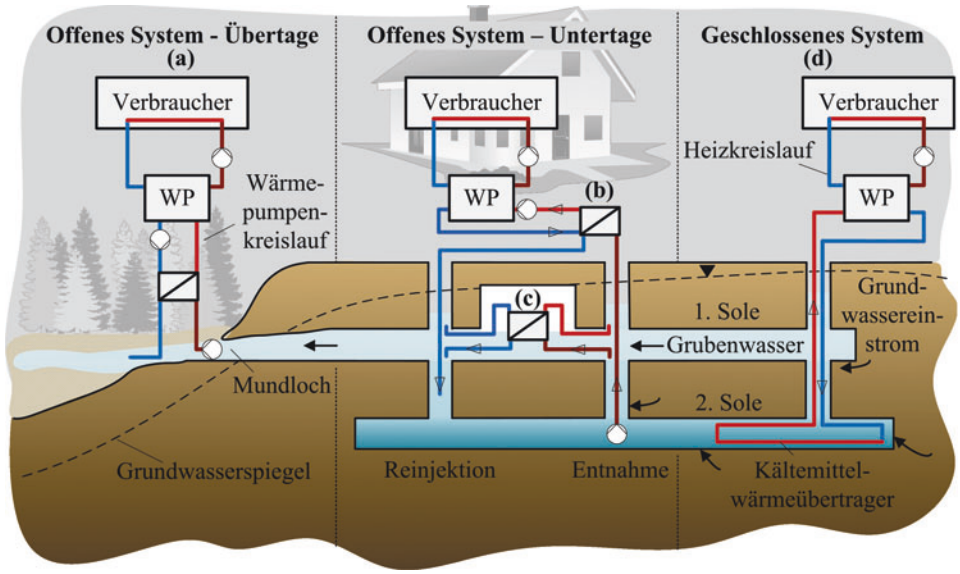


Abb. 17.1 Schematischer Aufbau einer Grubenwasseranlage mit unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten (offene und geschlossene Systeme)

auf ein Vorfluterniveau gehoben, von welchem es anschließend über sogenannte Wasserlösungsstollen zu Mundlöchern abgeführt wird. (Huber 1990) Austrittsstellen, in welchen das Grubenwasser zutage kommt, können somit unter Umständen bereits während des aktiven Bergbaubetriebes und vor einer Flutung vielfältig genutzt werden, siehe dazu (a) in Abb. 17.1. Eine Nutzung von künstlichen Bergbauseen als Wärmequelle ist ebenfalls möglich (Jessop et al. 1995; la Touche und Preene 2011; Preene und Younger 2014). Auch Wasser aus großen Tunnelbauwerken, welches meist entsprechend dem Gefälle zu den Portalen fließt, kann als Wärmequelle genutzt werden (Kaltschmitt 2009). Nachfolgend werden die unterschiedlichen Nutzungskonzepte unterteilt in vor und nach einer Flutung sowie die wichtigsten Vor- und Nachteile einer Grubenwassernutzung aufgeführt.

17.2.1 Nutzungsarten

Mögliche Nutzungsarten vor einer Flutung:

- Stromerzeugung z. B. im Kavernenkraftwerk (Ausnutzung von Höhendifferenzen bei der Wasserhaltung) (Galinsky et al. 2001; Ramos und Falcone 2013).
- Heizen und Kühlen von Bergbaugebäuden, -anlagen (Huber 1990), Wohnhäusern, Prozessen oder Bergbauschächten (durch Luftvorheizung, Jensen 1983) unter Ausnutzung von stehenden/fließenden Wässern oder über eine thermische Zusatznutzung des geförderten Wassers aus Wasserhaltungsanlagen (Preene und Younger 2014).

- Ausnutzung von Hohlräumen unterschiedlicher Höhenlage für den Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks zur Nutzung und Speicherung von Überkapazitäten aus z. B. Wind- oder PV-Strom (Beck und Schmidt 2011; Niemann 2012; Ramos und Falcone 2013).
- Nutzung der Strömungsenergie von Luftbewegungen in Schächten durch Aufwindkraftwerke in einem Bergwerk unter Ausnutzung von Druckunterschieden zur Oberfläche (Gahlen 2009).
- Nutzung der Grubenluft, welche durch die Verweildauer im Bergwerk ganzjährig eine konstante Temperatur und Luftfeuchte aufweist, sowie nahezu keim-, schadstoff- und staubfrei ist (MSG 25.05.2011).

Wird ein Bergwerk stillgelegt, so entsteht ein weitverzweigtes Netzwerk aus teilweise oder vollständig gefluteten Gängen. Aufgrund der fehlenden Wasserhebung steigt der Grundwasserspiegel kontinuierlich, meist bis zu den Wasserlösungsstollen, an. Das gesamte Grubengebäude stellt somit eine überdimensionale Drainage dar, die durch die Stollen und Schächte einen intensiven Wärmeaustausch zwischen Gestein und Grubenwasser ermöglicht. Der natürliche Grundwasserspiegel wird jedoch gegenüber der vorbergbaulichen hydrogeologischen Situation meist nicht wieder erreicht. Dieses Grubenwasser kann zur geothermischen Nutzung herangezogen werden, da es die Eigenschaften eines riesigen Wärmespeichers besitzt.

Mögliche Nutzungsarten nach einer Flutung:

- Geothermisches Heizen und Kühlen von Gebäuden, Bergwerksanlagen und Industrieprozessen (Jessop et al. 1995; Preene und Younger 2014; Ramos und Falcone 2013), mit/ohne Wiedereinleitung in den Grubenbau (mit/ohne Nutzung potentieller Energie in Turbine) (Huber 1990).
- Speicherung von Energie, die aus erneuerbaren Quellen gewonnen wurde (z. B. thermische Solarenergie) (Bracke und Bussmann 2015; Eikmeier und Wagner 2001; Schaberg 1998).

Beim Wärme- und Stofftransport in gefluteten Grubengebäuden kann zwischen Stagnations- und Zirkulationswässern unterschieden werden. Temperaturverteilungsanalysen an Gruben im Siegerland (Südwestfalen/Deutschland) haben gezeigt, dass im Gegensatz zu oberflächennahen Grubenbauten die tiefen gefluteten Tunnelsysteme über mehrere hundert Meter keine nennenswerten Schwankungen der Temperaturverteilung und der hydrochemischen Zusammensetzung zeigen. Es wird vermutet, dass die Grubenbauten als ein System kommunizierender Röhren mit ausgebildeten Konvektionskreisläufen und mit Gasaustausch zusammenwirken. Dagegen zeigen Grubensysteme in 200–300 m Teufe, aufgrund einer oftmals schlechteren Anbindung an tiefere Schächte, eine Stagnation und eine damit verbundene Temperaturschichtung. Insbesondere durch oberirdische Zuflüsse kann es im Vergleich zu tieferen Grubenbauten zu starken Schwankungen und Störungen des vertikalen Temperaturfeldes kommen (Wieber und Ofner 2008).

Dieser Beitrag ist vorwiegend auf die thermische Nutzung vor bzw. nach der Flutung von Bergwerken fokussiert. Für die Nutzung von Grubenwässern sind somit im Wesentlichen nach Hall et al. (2011), Huber (1990), Preene und Younger (2014) und Ramos und Falcone (2013) folgende Standortparameter relevant:

- Tiefe der möglichen Entnahmestelle (Wasserspiegel) bzw. Höhendifferenz bis über Tage bzw. zum Nutzer (entscheidend für den Energieaufwand der Pumpen),
- Entfernung der Entnahmestelle (über Tage) und Länge des Verteilsystems zum potentiellen Nutzer,
- Menge des potentiell entnehmbaren Wasserabflusses (fließend),
- maximales Temperaturniveau des Grubenwasser bei Entnahme und minimal erlaubtes Temperaturniveau bei der Rückführung in die Grubenbaue,
- Tiefe der Schächte und räumliche Ausdehnung der gefluteten Grubenbaue (Potential),
- Zugänglichkeit des Reservoirs und Anbindung an den restlichen Grubenbau,
- Chemismus des Wassers wie hydrochemische Zusammensetzung und Mineralisation,
- Stabilität der Grubenausbaue (Stollen, Schächte und Tunnel),
- vorhandene Ausrüstung des Bergwerks wie z. B. Schachtförder- oder Wasserhebeanlage etc.

Neben ausgewählten Standort- und Betriebsparametern werden in Abschn. 17.3 weitere wichtige Parameter für die Planung und den Betrieb einer Grubenwasseranlage vertiefend erläutert.

Transport und thermische Nutzung des Grubenwassers

Zur Nutzung der thermischen Energie des Grubenwassers gibt es im Wesentlichen die Möglichkeit der offenen und der geschlossenen Wasserführung, siehe Abb. 17.1. Nachfolgend wird auf die wichtigsten Systemunterschiede und auf beispielhafte Varianten dazu eingegangen. Dabei können zur Erschließung der Wasserreservoire in den Grubenbauen entweder vorhandene Schachtsysteme genutzt oder neue Bohrungen niedergebracht werden. Letzteres empfiehlt sich, sofern möglich, schon vor der Flutung eines Bergwerkes zu planen und aufgrund der Zugänglichkeit zur Bohrüberwachung durchzuführen.

Da das Temperaturniveau der im Grubenwasser gespeicherten Wärme für eine direkte Beheizung meist zu gering ist, kommen üblicherweise Wärmepumpen (WP) zum Einsatz. Diese ermöglichen das Anheben der Temperatur auf das für die Wärmebereitstellung notwendige Niveau.

Für den Wärmetransport (z. T. auch als Energieförderung bezeichnet) zur Wärmepumpe sind nach Huber (1990) folgende Varianten mit entsprechend unterschiedlichen Anforderungen möglich:

- Betrieb der Wärmepumpe unter Tage:
  - Schaffung erforderlicher „flutungssicherer“ Maschinenräume ist notwendig,
  - Schacht und Schachtförderung müssen bis zum Aufstellungsort ausgebaut und unterhalten werden,

  - Aufstellungsort bedarf einer umfangreichen Bewetterung,
  - Elektroenergieversorgung, Regel- und Messtechnik muss bis vor Ort gelegt werden.
- Förderung des Grubenwassers über Tage, (b in Abb. 17.1):
  - Energieaufwand durch Pumpen ist hoch,
  - Zufuhr des Grubenwassers direkt in die WP kann zu Ablagerungen führen,
  - besteht die Möglichkeit der Wasserrückführung in die Grube, kann durch mechanische Koppelung von Turbine und Pumpen + Elektromotor (Turbine-Freilauf-Motor-Pumpe) oder Kopplung von Turbine und Generator (z. B. Asynchronmotor) zur Rückspeisung ins Netz elektrische Energie gewonnen werden → zurückgewonnene Energie liegt ca. zwischen 50 % (mechanisch gekoppelt) und 30 % (elektrisch gekoppelt);
  - Grubenwasser kann auch zur Kühlung genutzt werden.
- Installation eines Zwischenkreislaufs zwischen Grubenwasser und Wärmepumpe (c in Abb. 17.1):
  - am häufigsten eingesetzte Variante,
  - keine Korrosions- und Verschmutzungserscheinungen an WP bzw. Anbauteilen,
  - deutlich geringere Förderdrücke notwendig,
  - Wärmeübertrager im Bergwerk müssen für einen hohen Betriebsdruck (abhängig von Förderhöhe) ausgelegt sowie für Wartung und Reinigung zugänglich und zerlegbar sein,
  - Grubenwasser und Zwischenkreislauf kann auch zur Kühlung genutzt werden.
- Aufteilung der Wärmepumpe in Kältemittelverdampfer unter Tage und Kältemittelkondensator über Tage (Splitausführung) (d in Abb. 17.1):
  - Transport des Kältemittels über große Entfernungen via Thermosiphon-Prinzip,
  - WP als Splitausführung, mit Verdichter über Tage (lange Saugleitung) oder unter Tage (lange Druckleitung) möglich,
  - bei ölgeschmierten Verdichtern ist die Ölzirkulation zu berücksichtigen,
  - Kältemittelmasse im WP-Kreislauf sehr groß, bei Leckage ist eine mögliche Umweltbeeinflussung zu beachten,
  - keine Nutzung des Grubenwassers zur Kühlung möglich.

In Abhängigkeit von der Höhendifferenz wurden von Huber (1990) die theoretischen Leistungszahlen der unterschiedlichen Transportvarianten für die Parameter Förderhöhe 100 m, Wärmequellentemperatur 20 °C, Kältemittelaustrittstemperatur 48 °C, Wärmeleistung 1 MW, WP mit Kältemittel R22 (seit 2015 verboten) bestimmt, siehe Tab. 17.1. Allgemein gilt, dass die Leistungszahl mit abnehmender Kältemitteltemperatur (Temperatur Heizniveau) und zunehmender Grubenwassertemperatur steigt.

Der Großteil der recherchierten Anlagen (vgl. Abschn. 17.4) nutzt jedoch einen Primär- (Grubenwasser) und einen Sekundärkreislauf (Prozesswasser), welche mit einem Wärmeübertrager (meist geschraubter Plattenwärmeübertrager) aus korrosionsfestem Material (z. B. Edelstahl oder Titan) verbunden sind. Hierdurch wird verhindert, dass sich Bestandteile des Grubenwassers im gesamten Anlagensystem (Pumpen,

Tab. 17.1 Reihenfolge der Leistungszahl in Abhängigkeit unterschiedlicher Wärmetransportvarianten. (Nach Huber 1990)

Leistungszahl	WP-Splitausführung (lange Saugleitung)
hoch	WP-Splitausführung (lange Druckleitung)
	Pumpenförderung d. Grubenwassers mit Energierückgewinnung (mech. Kopplung)
↓	Pumpenförderung d. Grubenwassers mit Energierückgewinnung (elektr. Kopplung)
	Pumpenförderung mit Zwischenkreislauf
niedrig	Allg. Pumpenförderung des Grubenwassers zur Wärmepumpe über Tage

Wärmeübertrager-Wärmepumpe, Rohrleitungen, Absperreinrichtungen etc.) ablagern bzw. dieses durch Korrosion beschädigen (Wieber und Ofner 2008).

17.2.2 Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten

Im Vergleich zur Nutzung fossiler Energieträger oder anderer regenerativer Energiequellen hat die geothermische Nutzung von gefluteten Grubenbauen viele Vorteile. Nachfolgend sind die wesentlichen Vor- und Nachteile aus unterschiedlichen Literaturquellen (Flynn et al. 1986; Heitfeld et al. 2006; Jessop et al. 1995; Jessop et al. 1995; Kynoch 2010; Matthes und Schreyer 2007a, b, Preene und Younger 2014) zusammengetragen.

Energetische Vorteile

- Die meisten Grubengebäude weisen ein großes Raumvolumen auf und können somit große Mengen an Grubenwasser bzw. eine sehr große Wärmemenge speichern.
- Tiefe und mitteltiefe Grubenwässer unterliegen keinen saisonalen Schwankungen der Wassertemperatur, was für die Auslegung und langfristige Nutzung vorteilhaft ist.
- Grubenwasser kann in kalten, gemäßigten und heißen Klimazonen durch den potentiellen Heiz- und Kühleinsatz mit und ohne Wärmepumpe genutzt werden (Jessop et al. 1995; Preene und Younger 2014). Die bergtechnischen, geologischen und hydrogeologischen Bedingungen sind im Allgemeinen gut bekannt, was ein geringes Fündigkeitsrisiko der Ressource Geothermie z. B. im Vergleich zu Projekten der tiefen Geothermie bedeutet und eine wichtige Voraussetzung für deren technische Nutzung darstellt.

Ökologische Vorteile

- Grubenwasser gehört zu den regenerativen Energiequellen und ist in den Gruben ganzjährig und nahezu unerschöpflich vorhanden.

- Die Nutzung der Energiequelle Grubenwasser trägt bei der Wärmbereitstellung im Vergleich zu Verbrennungsprozessen zur Verringerung der Luftverschmutzung bei (Kynoch 2010; Preene und Younger 2014; Ramos und Falcone 2013).
- Reduzierung des CO_2-Ausstoßes (Bsp. Nova Scotia: Reduzierung um ca. 50 % bei Vergleich aller Energieströme – elektrisch/Öl/etc.) (Jessop et al. 1995).

Ökonomische Vorteile

- Die Nutzung von Grubenwasser weist geringere Kosten gegenüber üblichen Heiztechniken auf (dies ist stark abhängig von den volatilen Preisen der fossilen Konkurrenzenergieträger) (Jessop et al. 1995; Kynoch 2010; Preene und Younger 2014).
- Geringe Energiekosten können eine Ansiedlung neuer Industrie begünstigen (Kynoch 2010). Ehemalige obertägige Betriebsflächen bieten nach einer Stilllegung Potential für Wohnbebauung und Gewerbeansiedlung mit entsprechendem Abnehmerpotential und kurzen Versorgungswegen (Heitfeld et al. 2006).
- Die direkte Nutzung der Wärme aus den Grubenbauten zur Beschleunigung chemischer Prozesse ermöglicht z. B. die ganzjährige Förderung von Gold und Silber an entsprechenden Standorten (Flynn et al. 1986).
- Stabile und kalkulierbare Energiepreise erhöhen für die Industrie die Wettbewerbsfähigkeit und Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen (Kynoch 2010).
- Die Weiternutzung vorhandener „stillgelegter" Infrastruktur bzw. die Nachnutzung der „Altlasten" aus dem Bergbau ist für viele betroffene Städte und Gemeinden ein wichtiges Ziel (Heitfeld et al. 2006; Kynoch 2010; Preene und Younger 2014; Ramos und Falcone 2013).
- Bei frühzeitig bekannter und geplanter Folgenutzung bestehen erhebliche Synergien im Zuge der allgemeinen notwendigen Sanierung des Altbergbaus, z. B. Nutzung der Gelder zur Verwahrung des Schachtes für das Geothermieprojekt. Zusätzlich wird die Sicherung einer Kontrolle der Abflussverhältnisse aus dem Bergbaurevier im Rahmen der Grubenwassernutzung weiterhin ermöglicht (Matthes und Schreyer 2007a, 2007b).
- Unabhängigkeit von einem Primärenergieträger (Öl, Gas, Kohle), da elektrischer Strom sowohl aus erneuerbaren Energien als auch fossilen Energieträgern bereitgestellt werden kann (Curtis und Roijen 2011).
- Eventuell ist die Grubenwassernutzung auch für entlegene Standorte ohne Gas- bzw. Ölversorgung umsetzbar (Curtis und Roijen 2011).

Nachteile:

- Da jedes Bergwerk ein Unikat ist, erfordert auch jede Grubenwasseranlage eine eigene Machbarkeitsstudie inkl. geotechnischer Voruntersuchung (Matthes und Schreyer 2007b, Preene und Younger 2014).
- Es sind höhere Anfangsinvestitionen als bei vergleichbaren Heiz-/Kühlsystemen notwendig (Matthes und Schreyer 2007b), wobei die Amortisationszeit stark vom Energiepreis abhängig ist.

- Um das große Potential von Grubenwasser zu nutzen und die Amortisationszeit zu verkürzen, sind Anlagen mit einer großen Leistung günstiger, wodurch jedoch zusätzliche Kosten für ein notwendiges Wärme-/Kälteverteilnetz anfallen (Kynoch 2010).
- Sind zusätzlich bergbautechnische Arbeiten notwendig, so besteht ein erhöhtes Kostenrisiko (Matthes und Schreyer 2007a, b).
- Die hydrochemische Zusammensetzung der Grubenwässer kann z. B. durch Temperatur-, Druckänderungen oder den Eintrag von Sauerstoff verändert werden. Banks 2012 beschreibt die Ausfällungen (Oxidationen) von z. B. Eisenhydroxid und Manganoxid im Wärmeentzugssystem, nachdem das Wasser mit Luft in Kontakt gekommen ist. Dies kann zur Verockerung der Wärmeübertrager führen (vgl. Abschn. 17.3.4).
- Liegt das Vorfluterniveau durch alte bestehende Entwässerungsnetzwerke in großer Tiefe, müssen für eine Nutzung:
  - z. T. tiefe Wasserstände bzw. große Höhendifferenzen (> 100 m) überwunden werden, was sich negativ auf die Betriebskosten auswirkt (Banks 2012; Kynoch 2010) und
  - ein erhöhter Transportaufwand von Material, ein erhöhter Aufwand bei der Installation durch eine spezialisierte Bergbaufirma und die notwendige regelmäßige Wartung kostenseitig berücksichtigt werden.
- Wird das Grubenwasser nicht wieder in das Bergwerk zurückgeführt, kann es bei unsachgemäßer Einleitung zu Wasserverschmutzungen im Grundwasser oder Flüssen kommen.

17.3 Planung, Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage

Wird für die Energieversorgung die Geothermie und im Speziellen Grubenwasser in Betracht gezogen, muss dem verantwortlichen Personenkreis bewusst sein, dass es sich um eine individuelle Energiequelle handelt. Da Geologie, Aufbau und Infrastruktur jedes Bergwerks unterschiedlich sind, muss auch für jedes geflutete Bergwerk eine eigene Potentialstudie durchgeführt werden (Jessop et al. 1995; Preene und Younger 2014). Nachfolgend sind Vorgehensweise und Hinweise für die Planung und Umsetzung eines Grubenwasserprojektes aus einer Vielzahl an Veröffentlichungen zusammengestellt.

Um potentielle Standorte aus einer großen Anzahl an Bergwerken zu erkennen, wurden u. a. in Studien in Kanada (Kynoch 2010) oder auch in Deutschland (Ramos und Falcone 2013) folgende spezielle Auswahlkriterien definiert:

- mind. 30 m Tiefe, um entsprechende Wassertemperaturen vorfinden zu können,
- einen möglichst großen Grubenkörper, um eine große Wärmemenge zu gewährleisten,
- als Anhaltspunkt für einen guten Zustand des Grubenbaues und einer evtl. Nachnutzung von vorhandenen (Mess-)Daten des Bergwerkes sind ausschließlich nach 1950

geschlossene Bergwerke zu berücksichtigen. Für die Harz-Region in Deutschland wurden Bergwerke, welche vor 1885 betrieben wurden, als zu alt und nicht nutzbar deklariert.
- Wasserqualität des Grubenwassers,
- möglichst geringe Entfernung zu möglichst vielen potentiellen Wärme- und Kältenutzern (Reduzierung Verteilernetzkosten),
- geringe Wahrscheinlichkeit einer Wiedereröffnung des Bergwerks für eine lange Nutzung und als Sicherheit für die hohen Investitionskosten.

Auf Grundlage von lokalen Datenbankinformationen berichten Kynoch (2010) für Kanada von 2500 bis 7500 stillgelegten Bergwerken, woraus mithilfe der Auswahlkriterien 25 potentielle Standorte für die Grubenwassernutzung extrahiert wurden.

Nach der Auswahl geeigneter Standorte muss anschließend eine Machbarkeitsstudie durchgeführt werden. Nachfolgend werden daher wichtige Faktoren zur Planung und Umsetzung vorgestellt, die aus einer Vielzahl an Veröffentlichungen zu Grubenwasseranlagen zusammengetragen wurden.

17.3.1 Planung

Identifizierung der Kenndaten des Wärmereservoirs
Ein wesentlicher Parameter für die Machbarkeitsstudien zur Nutzung geothermischer Niedrig-Enthalpie-Systeme (Grubenwasser) ist die Identifizierung der Kenndaten des Wärmereservoirs wie Größe, Ergiebigkeit und Grubenwassertemperatur. Wichtige Fragenstellungen dazu sind nach Jessop et al. (1995), Kynoch (2010), Preene und Younger (2014) folgende:

- Welche Gesamtenergiemenge ist verfügbar? Bestimmung über das effektive Volumen und die Zuflüsse in das Reservoir sowie die Grubenwassertemperaturen. Diese Fragestellung kann durch evtl. vorhandene Aufzeichnungen zum Grubengebäude, durch hydrogeologische Bohrungen sowie Modellierungen quantifiziert werden. Analytische Lösungen (Rodríguez und Diaz 2009) und vereinfachte zweidimensionale (2D) numerische Modelle (Ghoreishi et al. 2012) wurden zur Bestimmung des Wärmetransportes in Teilen des Grubengebäudes bereits vielfältig eingesetzt (Ramos und Falcone 2013). Eine weiterführende Literaturübersicht dazu geben Loredo et al.(2016).
- Wie groß ist das Risiko bei der Zugänglichkeit der vorhandenen thermischen Energie? Gibt es eine ausreichende hydraulische Verbindung zwischen den einzelnen Sohlen durch Schächte oder Klüftigkeiten im Gestein? Liegt eine Zirkulation der Grubenwässer zwischen den einzelnen Sohlen und Stollen vor oder gibt es eine Temperaturschichtung wie in stehenden Wasserreservoirs? Durch die Zirkulation der Grubenwässer kann ein großer Teil des Grubengebäudes als wärmeübertragende Fläche ausgenutzt werden, was einer Nutzung deutliche Vorteile bringt. Hydrogeologische

Studien, Modellierungen sowie Pumptests können Grundlagen zur Ermittlung der Ergiebigkeit sein. Wird das Bergwerk bereits aktiv (Pumpen) oder passiv (Lösungsstollen) entwässert, sinkt das Risiko der Wärmezugänglichkeit deutlich. Standorte mit diesen Voraussetzungen können bevorzugt in Betracht gezogen werden.

- Welche maximale Temperatur kann bei der Wärmeentnahme dauerhaft sichergestellt werden? Daraus ergibt sich die indirekte (Wärmepumpe) oder die direkte Nutzung der Wärme (durch Wärmeübertrager bei $t > 35\,°C$) zur Beheizung bzw. zur direkten Kühlung ($t < 18°C$). Die Temperatur eines Grubenwassers hängt maßgeblich von der maximalen Tiefe des Bergwerkes, dem geothermischen Temperaturgradienten, der hydraulischen Zirkulation und der Größe des Reservoirs ab. Wird Wärme und/oder Grubenwasser entzogen, entsteht ein Ungleichgewicht (z. B. Temperaturabsenkung), was zur Verringerung der Nutzungsdauer führen kann.
  - Für die Auslegung ist die untere und obere Temperaturgrenze, ab welcher das Wärmepumpensystem bzw. die freie Kühlung ineffizient arbeitet, von großer Bedeutung.
  - Kann die Wärmenutzung zu nachteiligen Umweltauswirkungen, z. B. Ablauf chemischer Reaktionen (siehe Abschn. 17.3.4), führen?

Evaluierung möglicher Nutzer von Wärme und Kälte

Die Eigentumsverhältnisse, das Nutzungspotential und damit mögliche Anwender der Grubenwasserwärme und -kälte variieren bei annähernd jedem Bergwerk (Louie 2015). In vielen Fällen befinden sich Bergwerke weit entfernt von dicht besiedelten Gebieten. Es ist jedoch besonders in Europa wahrscheinlich, dass als Ergebnis der laufenden Entwicklung eine zunehmende Anzahl an Bergwerken bis in besiedelte Areale reicht. Dadurch entstehen evtl. Möglichkeiten, Fernwärmenetze oder auch die direkte Versorgung zu initialisieren (la Touche und Preene 2011).

Eine naheliegende Anwendung von Grubenwasserwärme ist die Versorgung aktiver Bergwerke selbst. Der Wärmebedarf für Beheizung der Verwaltungsgebäude, Mannschaftsräume, Werkstätten usw. liegt in kürzester Entfernung zur Wärmequelle und wird über den gesamten Lebenszyklus eines Bergwerkes benötigt. Grubenwasser kann auch zur Kühlung der Grubenluft oder Eisfreihaltung von Eingängen und Gerätschaften verwendet werden (Toth 2011). Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass Eigentümer und Nutzer identisch sind und somit Absprachen einfacher und Interessenslagen gleich sind.

Sind in der Umgebung des Bergwerkes Industrie-, Verwaltungs- oder Wohngebäude ansässig, so können evtl. zusätzlich Nutzer gewonnen werden. Weitere potentielle Nutzer sind in der Landwirtschaft z. B. zur Beheizung von Ställen, Gewächshäusern, Fischfarmen, zur Trocknung von Erzeugnissen oder anderen großen Niedertemperaturverbrauchern zu finden, siehe Abb. 17.2.

Besonders nach der Schließung des Bergwerkes kann die Nutzung von Grubenwasser neue Einnahmequellen für die Bergbauunternehmen generieren und durch Ansiedlung neuer Industriezweige eine Nachnutzung des obertägigen Grubengeländes fördern. Dies kann auch die nachhaltige Entwicklung von Gemeinden mit geschlossenen Bergwerken unterstützen (Preene und Younger 2014).

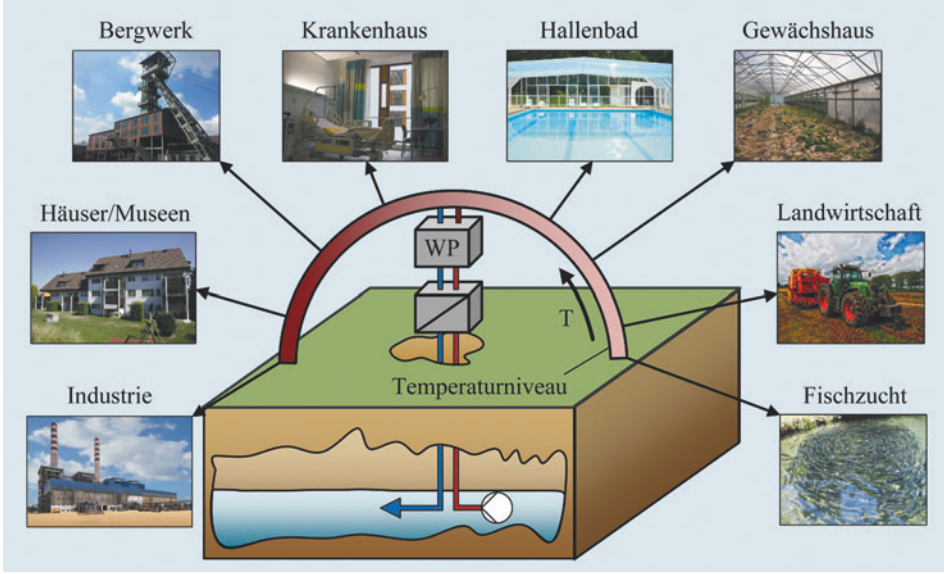


Abb. 17.2 Potentielle Nutzer von Wärme und Kälte aus einer Grubenwasseranlage mit unterschiedlichen Temperaturniveaus

Neben dem Wärmeentzug gibt es auch die Möglichkeit der saisonalen Speicherung von Niedertemperaturwärme z. B. in Kombination mit Solaranlagen. Erste Untersuchungen zu geeigneten Standorten z. B. von ehemaligen Steinkohlebergwerken haben die Einspeicherung von Wärme in die oberen Bereiche von Tagesschächten als sehr geeignet identifiziert (Gahlen 2009).

Ist das Bergwerk nicht vollständig geflutet und besteht die Möglichkeit einer Bewetterung, so liegt ein bisher noch nahezu ungenutztes Potential in der Nutzung der Grubenluft vor. Bei ausreichender Verweilzeit im Grubengebäude stellt sich eine ganzjährig konstante Temperatur und Luftfeuchte sowie staub-, keim- und schadstofffreie Luft ein, siehe auch Abschn. 17.4.3.1 (MSG 2011). Kommt es aufgrund des Aufbaues des Bergwerkes zu einer natürlichen Bewetterung, so kann die selbstständig austretende Luft theoretisch u. U. auch in Aufwindkraftanlagen genutzt werden (Gahlen 2009).

Identifizierung des realen Wärme-/Kältebedarfes

Zur Auslegung einer Grubenwasseranlage sind genaue Kenntnisse des benötigten Wärme- und Kältebedarfs notwendig, was Planungs- und Ingenieurbüros anhand von Planungsunterlagen und Verbrauchswerten erstellen. Je genauer die Daten sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Über- oder Unterdimensionierung der Anlage. Dazu ist eine Ist-Analyse des in Betracht gezogenen Gebäudebestandes durchzuführen. Um das Potential von Grubenwasser möglichst im großen Umfang zu nutzen, sind Anwendungen mit Wärme- und Kältebedarf zu bevorzugen.

Zur Prognostizierung des Wärmebedarfs ist prinzipiell zwischen Wohnbau (Wohngebäuden mit normalen Innenraumtemperaturen) und Nichtwohnbau wie Büro-/Gewerbegebäude und anderen Nutzungsarten (Lagergebäude etc.) zu unterscheiden. Hierzu werden in der Regel energetische Bilanzierungsverfahren z. B. nach der in der BRD gültigen Energieeinsparverordnung (aktuell EnEV 2014 mit erhöhten Anforderungen ab 2016) (Volland 2014) und den entsprechenden Richtlinien wie beispielsweise den DIN EN 832, DIN V 4108; DIN 4701; DIN V 18599 eingesetzt.

Diese Berechnungsverfahren bieten den großen Vorteil, dass sie die erweiterten Bilanzierungsgrenzen, wie beispielsweise den Primärenergiefaktor des eingesetzten Energieträgers und die Effizienz der Anlagentechnik in der Energiebilanzierung berücksichtigen. Als ausschlaggebende Bewertungsgröße wird der Primärenergiebedarf errechnet (Weller et al. 2008).

Es ist jedoch auch darauf zu achten, dass die gesetzlich eingeführten Energiebilanzierungsverfahren mitunter starke Abweichungen von experimentell bestimmten Verbrauchswerten aufweisen, was in Extremfällen bis zu 100 % betragen kann. Besonders die Anwendung bei ungewöhnlichen Bauweisen, wie sie beispielsweise im geschützten Altbaubestand häufig anzutreffen sind, ist nicht unproblematisch. Im Bereich der untersuchten denkmalgeschützten Gebäude liegt der tatsächliche Verbrauch nach Weller et al. (2008) tendenziell niedriger als der errechnete Endenergiebedarf. Diese Abweichungen setzen sich einerseits durch Ungenauigkeiten bei der Verbrauchsmessung und andererseits durch Abweichungen bei der Bedarfsermittlung zusammen.

Beachtung des Bergrechtes und Identifizierung wichtiger Umwelteinflüsse

- Um die Ressource Grubenwasser verwenden zu können, müssen klare Regularien und Gesetze des jeweiligen Landes bzw. Bundesstaates zur Nutzung von Niedertemperaturgeothermie aus gefluteten Bergwerken bestehen und beachtet werden (Jessop et al. 1995).
- Erdwärme ist nach dem Bundesberggesetz (BBergG, §3 Bergfreie und grundeigene Bodenschätze) ein bergfreier Bodenschatz, für dessen Aufsuchung und Nutzung eine Erlaubnis der Bergbehörde erforderlich ist. In Abschn. 17.3.3 wird darauf näher eingegangen.
- Bereits in der Planungsphase müssen mögliche Umweltrisiken durch die Nutzung des Grubenwassers sowie Einschränkungen durch behördliche Auflagen mit in Betracht gezogen werden. Basierend auf den Erfahrungen in anderen Branchen kann dieses Risiko typischerweise quantitativ bestimmt und durch gutes Design und gute Planung verringert werden (Preene und Younger 2014). In Tab. 17.2 sind mögliche Einflüsse durch die Grubenwassernutzung zusammengeführt.

Planung und Festlegung der notwendigen Infrastruktur

Wurde der benötigte Wärmebedarf ermittelt, kann eine erste grobe Planung der Anlage und der dafür notwendigen Infrastruktur vorgenommen werden. Dabei müssen u. a. folgende Punkte beachtet werden:

Tab. 17.2 Mögliche Umwelteinflüsse durch die Nutzung von Grubenwasser. (Nach Preene und Younger 2014)

Mögliche Umweltauswirkungen	Weitere Folgen
Negative Einflüsse	
Absenkung des Grundwasserspiegels	Die längerfristige Entnahme von Grubenwasser kann zur lokalen Absenkung des Grundwasserspiegels und zu Bodenabsenkungen führen.
Thermische und chemische Auswirkungen auf Oberflächenwässer	Durch die Einleitung von Grubenwasser in wärmere oder kältere Oberflächenwasser kann es aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung (z. B. Sauerstoffgehalt) zu Ausfällungen von gelösten Stoffen, Freisetzung von Gasen oder Temperaturänderungen durch chemische Reaktionen kommen.
Thermische und chemische Auswirkungen auf Grundwässer	Durch die Injizierung von Grubenwasser in wärmere oder kältere Grubenwässer oder Grundwasserleiter kann es aufgrund unterschiedlicher Temperaturen und Zusammensetzungen zu Langzeitveränderungen durch chemische Reaktionen kommen. Eine Veränderung der Fließeigenschaften (z. B. durch Ausfällungen in Klüftigkeiten) kann eine weitere Folge sein.
Beeinflussung der Stabilität des Untergrundes	Durch die Entnahme von Grubenwasser können sich die Druckverhältnisse im Untergrund ändern, was wiederum Einfluss auf die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit ausüben kann. Weiterhin können Untergrundarbeiten (wie z. B. Bohrungen) destabilisierend wirken.
Positive Einflüsse	
Reduzierung von Treibhausgasen	Verringerung der Luftverschmutzung sowie des CO_2-Ausstosses.
Nutzung regenerativer Energie	Reduzierung der Nutzung fossiler Rohstoffe.
Vorteile für Gemeinschaften und Unternehmen aufgrund langfristig und zuverlässig verfügbarer Energie	In entlegenen Gebieten und in Entwicklungsländern ist die Verfügbarkeit von zuverlässigen Energiequellen beschränkt. Die Nutzung von Grubenwasser kann für die wirtschaftliche Entwicklung hilfreich sein.

- Auswahl der Nutzungsart (geschlossenes oder offenes System), vgl. Abschn. 17.2.
- Auslegung der notwendigen Wasserförderung und -hebung (Pumpen, Rohrleitungen). Muss das Grubenwasser große Höhenunterschiede überwinden, so verringert der Pumpenaufwand den COP deutlich (Athresh et al. 2015). Eventuell können vorhandene Wasserhaltungsanlagen weiter- oder nachgenutzt werden.
- Auswahl geeigneter Wärmeübertrager zur Trennung von Grubenwasser, Prozess- und Heizwasser inkl. Planung des Wartungsaufwandes der Wärmepumpe und der Reinigung des grubenwasserdurchströmten Wärmeübertragers.

- Bei ansteigender Entfernung zwischen Nutzer/Wärmeverbraucher und Wärmequelle (Grubenwasser) wird evtl. ein Wärmenetz zur Wärmeversorgung notwendig.
- Abwasserentsorgung/Wiedereinleitung bzw. Reinfiltrationsanlagen bei offenen Systemen (evtl. sind Feldversuche notwendig).
- Einsatz von Wärmepumpentechnik und/oder direkter Nutzung der Wärme des Grubenwassers für z. B. Kühlung.
- Bauliche Maßnahmen, wie z. B. Montagekosten, Sicherungsmaßnamen an den Grubenbauen, Hausanschlüsse, Erneuerung des Heizungssystems für ein niedriges Temperaturniveau.
- Einbindung des Heizsystems in evtl. bestehende Versorgungssysteme wie z. B. BHKW, Gas-, Ölheizung, Fernwärme inkl. einer intelligenten Regelungstechnik.
- Gibt es gesetzliche Auflagen zur Kontrolle der Wasserzusammensetzung bzw. zum Langzeitmonitoring?

Ziel der Planungen ist die Ableitung der entsprechenden Investitionskosten, welche alle für den Bau erforderlichen Positionen (z. B. Maschinen- und Bautechnik, Material, Montage) einschließlich Planungsaufwendungen, Fördermittel (z. B. KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau, z. B. KfW-Programm Erneuerbare Energien), BAFA (Bundesanstalt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Energie – Heizen mit Erneuerbaren Energien)) und Rücklagen für Unvorhergesehenes beinhalten.

Bewertung der erhobenen Daten, Machbarkeitsstudie, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Nutzung von Grubenwasser kann z. B. anhand einer Rentabilitätsrechnung in Anlehnung an die VDI 2067 durchgeführt werden (Wieber et al. 2008). Dabei werden Aufwendungen für den Bau und den Betrieb einer Grubenwasseranlage gegen den Einsatz anderer regenerativer bzw. konventioneller Heizungstechniken auf Basis verschiedener Energieträger – wie z. B. Gas, Strom, Fernwärme, Sonnenkollektoren, Erdwärme etc. – gegenübergestellt. In der Betrachtung werden Investitions-, Wärme-/Kältegestehungskosten, Fördermittel sowie Betriebskosten zusammengeführt. Es ist darauf zu achten, dass auch die Wartungskosten mit einbezogen werden.

Aufgrund der stark schwankenden Öl- und Gaspreise ist eine langfristige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Teil schwierig, wenn auch zwingend notwendig. Liegen die jährlichen Kosten bei der Versorgung mit Wärme aus Grubenwasser über den Kosten für herkömmliche Energieträger, so können zusätzlich weitere Effekte eine Umsetzung unterstützen. So haben erneuerbare Energieträger schon heute trotz z. T. höherer Kosten psychologisch deutlich Vorteile. Die Errichtung von Pilotanlagen an besonders geeigneten Standorten kann Signalcharakter haben (Heitfeld et al. 2006).

Prognosen zur Entwicklung der Grubenwasserqualität und -quantität für die Zeit nach der Bergwerksnutzung z. B. bei Steinkohlegewinnung sind zum Teil sehr schwierig (Werner 2009), was auch eine Risikoabschätzung erschwert. Bei der Betrachtung des Betriebsrisikos müssen Betriebsstörungen – wie z. B. Verschleiß durch Korrosion, Verstopfungen

und Verkrustungen aufgrund aggressiven Grubenwassers oder Änderungen der Reservoirtemperatur – berücksichtigt werden. Diese Risiken können durch hydrogeologische und geochemische Modellierungen quantifiziert werden (Preene und Younger 2014).

Erfolgreiche Erfahrungsberichte zeigen, dass Risiken nicht als Barrieren, sondern als Leitfaden für Vorstudien und Untersuchungen zu potentiellen Standorten dienen sollten (Preene und Younger 2014).

17.3.2 Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage

Hat man sich für den Bau einer Grubenwasseranlage entschieden, so muss eine detaillierte Auslegung der Anlage erfolgen. Dabei sind einige Aspekte zu beachten. Anhand von Literaturangaben sowie Mitteilungen von Anlagenbetreibern sind nachfolgend beispielhaft zu beachtende Punkte bei der Umsetzung aufgeführt.

- Technik, welche unter Tage zum Einsatz kommt, muss sehr genau auf die Verwendbarkeit unter Bergwerksbedingungen überprüft werden. Die Grubenluft sowie das Grubenwasser sind häufig sehr korrosiv. Ausführende Gewerke sollten belegte Erfahrungen mit der Installation von Technik in Bergwerken haben.
- Alle beweglichen Teile (Pumpen, Klappen, Ventile etc.) müssen in regelmäßigen Intervallen bewegt werden, um die Betriebsfähigkeit zu gewährleisten. Aufgrund der meist korrosiven Eigenschaften bzw. aufgrund von Ablagerungen aus dem Grubenwasser kann es schnell zur „Blockade“ der beweglichen Bauteile kommen.
- Wird durch das Bergwerk Oberflächenwasser geleitet, so muss unter Umständen auch mit temporärem Hochwasser unter Tage gerechnet werden (z. B. in der Anlage „Reiche Zeche“ in Freiberg). Eine zeitweise Flutung der untertägigen Bauteile darf nicht zum Betriebsausfall führen.
- Das Grubenwasser sollte weitestgehend in einem abgeschlossenen Kreislauf geführt werden, um den Zutritt von Sauerstoff und die dadurch mögliche Ausfällung von z. B. Eisenhydroxid und anschließende Verockerung der Leitungen und Wärmeübertrager zu vermeiden (Konrad et al. 2010).
- Bei der Wahl der Materialen sollte darauf geachtet werden, die Adsorption und Ausfällung an der Wandung zu minimieren (Konrad et al. 2010). Für Wärmeübertrager und Pumpen wird teilweise Titan eingesetzt, um der Korrosion z. B. durch Salzanteile vorzubeugen (Ramos und Falcone 2013).
- Zum großen Teil werden Platten-Wärmeübertrager eingesetzt, um das Grubenwasser vom Prozesswasser zu trennen. Bei den Wärmeübertragern sollte darauf geachtet werden, dass keine gelöteten, geschweißten oder dauerhaft verbundenen Einheiten zum Einsatz kommen, um eine Reinigung und somit auch Öffnung dieser zu ermöglichen (geschraubte Plattenwärmeübertrager). Es empfiehlt sich daher, das Grubenwasser nicht direkt durch die Wärmeübertrager der Wärmepumpe zu leiten, da diese meist kompakt und schlecht zugänglich verbaut sind.

- Durch geeignete Messstellen sollte der Anlagenbetrieb über ein Monitoringsystem kontinuierlich überprüft werden. So kann z. B. durch die Messung des Druckverlustes über den Wärmeübertrager auf dessen Verschmutzungsgrad rückgeschlossen werden, was eine bedarfsgerechte Reinigung ermöglicht. Weiterhin kann mithilfe von wenigen Temperatursensoren eine mögliche Änderung des Temperaturniveaus des Reservoirs bzw. eine Fehlfunktion erkannt werden.
- Bei Inbetriebnahme sollten unbedingt die Druckverluste aller Leitungsteile bzw. einzelner relevanter Abschnitte (z. B. Wärmeübertrager) als Referenzwerte für evtl. zukünftige Fehlersuchen bestimmt werden. Insofern nicht dauerhaft die Anlagen- bzw. Differenzdrücke aufgezeichnet werden, sind zumindest Anschlussstutzen für Druckmesseinrichtungen vorzusehen (Müller und Rottluff 2001).
- Vor und nach strömungstechnischen Engstellen im System (u. a. Platten-Wärmeübertrager) sind Anschlussstutzen für evtl. zyklisch durchzuführende Reinigungsspülungen zum Lösen von Ablagerungen vorzusehen (Müller und Rottluff 2001).
- Die Wartungskosten sollten bei der Planung mit beachtet werden, um eine regelmäßige Reinigung der Wärmeübertrager (Kreislaufspülung mit chemischen Lösungsmitteln oder z. B. plattenweise durch Wasserstrahl) sowie Wartung der Wärmepumpe sicherzustellen. Wie bei jedem Heizsystem bedarf auch eine Grubenwasseranlage der Wartung durch Fachpersonal. Konrad et al. (2010) geben ein halbjährliches Wartungsintervall an, welches jedoch z. B. bzgl. möglichen Reinigungsintervallen anlagenspezifisch durch Anlagenmonitoring angepasst werden muss.
- Behörden können Auflagen für ein Monitoring erheben, weshalb bereits bei der Planung eine langfristige automatisierte Auswertung und Speicherung der Messdaten in Betracht gezogen werden sollte.
- Besonders in Kohlebergwerken kann das Grubenwasser auch Grubengas enthalten, was einer besonderen Beachtung bedarf (Heitfeld et al. 2006).
- Wird die Grubenwasseranlage im Verbund mit anderen Systemen wie z. B. BHKW oder Gasbrennwerttechnik betrieben, muss eine Mindestbetriebszeit der Grubenwasseranlage sichergestellt werden. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass aufgrund der z. T. komplexeren Betriebsweise das Bedienpersonal z. B. bei Störungen eher auf konventionelle und einfachere Techniken zurückgreift und die notwendigen Betriebszeiten dadurch nicht erreicht werden können. Daraus können jedoch schwerwiegende Störungen entstehen, die bei erneutem Betrieb deutlich umfangreichere Reparaturen bedürfen.
- Die Nutzer und das Bedienpersonal sind frühzeitig in das Projekt mit einzubeziehen, um die Akzeptanz der geothermischen Grubenwassernutzung zu fördern.

17.3.3 Bergrecht

Natürlich vorkommende Erdwärme ist nach dem Bundesberggesetz (BBergG) § 3 *Bergfreie und grundeigene Bodenschätze* ein bergfreier Bodenschatz, für dessen Aufsuchung (BBergG § 7) und Gewinnung (BBergG § 8) eine Erlaubnis der Bergbehörde gemäß

Tab. 17.3 Auszüge aus dem aktuellen bundesdeutschen Bergrecht BBergG aus Kremer und Neuhaus (2001)

Bergrecht	Gesetz	Beschreibung
Erteilung und Verteilung	§§10–15	• Gebundener Verwaltungsakt • schriftlicher Antrag an Behörden (Informationspflicht), Absprache dieser Untereinander (geologisches Landesamt, Bezirksregierung, Bergbehörde) • bei mehreren Anträgen erhält der Antragsteller mit bereits erteilten Erlaubnissen Vorrang
Versagungs-gründe	§ 11	• Nichtbeachtung der formalen Vorschriften • wirtschaftliche Solidität des beantragenden Unternehmens • Kein Schutz des öffentlichen Interesses
Nutzungsdauer	§ 16 Abs. 4 und 5	• Erlaubnis für höchstens 5 Jahre, Verlängerung um 3 Jahre • höchstens für 50 Jahre
Beginn	50–51 § 70 Abs. 1	• Bergrechtlicher Betriebsplan für Aufsuchung und Gewinnung • Auskunfts-/Vorlagepflicht über die Tätigkeiten
Ende	69 Abs. 2	• Abschlussbetriebsplan ist zu erstellen • Betriebseinstellung ohne Abschlussbetriebsplan erfolgt nach Anordnung der zuständigen Behörde • Gefahrenprüfung ist erfolgt

BBergG eingeholt werden muss (Rosner et al. 2009; Wolf et al. 2007). Eine Bewilligung oder das Bergwerkseigentum wird für die Durchführung der Gewinnung im Einzelfall entsprechend befristet (BBergG § 16 (4 und 5)) und wird nur unter Vorlage eines Betriebsplanes erteilt (BBergG § 52 ff). Eine Übersicht aus dem aktuell gültigen deutschen Bergrecht ist in Tab. 17.3 dargestellt.

Wenn für die Bereiche der Erdwärmegewinnung bereits andere Zulassungen, wie z. B. die Gewinnung von Grubengas, erteilt sind, können Interessenkonflikte auftreten (Heitfeld et al. 2006).

Konzessionen zur Aufsuchung von Erdwärme bilden auch die genehmigungsrechtliche Grundlage für die Ausführung geplanter Pilotprojekte (Rosner et al. 2009).

Bei einer möglichen Nutzung von Grubenwasser/Erdwärme werden auch andere zu beachtende Rechtsgebiete berührt. Da Grundwasser häufig den Energieträger darstellt, muss diesem z. B. unter Einbeziehung des Wasserhaushaltsgesetzes und des Landeswassergesetztes Rechnung getragen werden. Je nach Anlagenart zur geothermischen Grubenwassernutzung (offen, geschlossen, bzw. Einleitung des Grubenwassers in Gewässer) sind eventuell noch weitere Genehmigungsverfahren wie Naturschutz- und Immissionsschutzrecht zu berücksichtigen (Wolf et al. 2007). Müssen Bohrungen abgeteuft werden und fallen diese unter das Bundesberggesetz, gelten dafür zusätzlich noch länderspezifische Verordnungen, wie z. B. im Land Nordrhein-Westfalen die *Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen* (Tiefbohrverordnung – BVOT) (Gahlen 2009).

Darüber hinaus existieren weitere standortspezifische rechtliche Bestimmungen, wie z. B. die Übertragung der erteilten Aufsuchungs- und Gewinnungserlaubnis auf andere Nutzer, eine evtl. Vererbung von Nutzererlaubnissen, die Gefahrenprüfung (z. T. bundeslandspezifisch). Diese werden hier nicht weiter aufgeführt.

17.3.4 Wasserchemie

Das natürlich vorkommende Wasser enthält stets organische und anorganische Stoffe, sowohl in gelöster als auch ungelöster Form. Die Qualität und der pH-Wert sind von vielen Parametern abhängig. Der Chemismus und die Belastung von Wässern mit Mineralien hängt dabei, neben der Entstehungsart (Oberflächen-, Sicker-, Quellwasser), auch von unzähligen weiteren Faktoren, wie dem Alter des Wassers, der Zusammensetzung und Reaktivität der umgebenden/durchflossenen Gesteine, deren Löslichkeit, der Kontaktzeit, der Fließgeschwindigkeit, dem Redox-Potential (Eh-Wert), der Temperatur und Druck etc. ab. Die Löslichkeit gibt dabei die maximale Menge eines Stoffes an, die in einem Lösungsmittel (hier Wasser) als ein homogenes Gemisch (gesättigte Lösung) aufgenommen werden kann. Hierbei besteht sowohl ein großer Einfluss der Temperatur, des Druckes als auch des pH-Wertes auf die Löslichkeit (Griebler und Mösslacher 2003; Hölting und Coldewey 2013; Ramos und Falcone 2013). Letzteres ist z. B. für ausgewählte Metallhydroxid-Minerale in Grubenwässern in Younger et al. (2002) S. 76 ff. dargestellt.

Der Chemismus des Grubenwassers hängt maßgeblich von der Lagerstätte, deren Aufbau, der Historie des Grundwasserspiegels sowie dem Anteil an in die erzmineralreichen Gesteinsschichten eindringenden Wässer ab. Allgemein werden die zutage tretenden Erzkörper durch einsickerndes Wasser und Sauerstoff stetig oxidiert, wobei u. a. viele Metalle ausgelaugt werden (Oxidationszone). In dieser Zone verbleibt u. a. Fe^{3+}-Hydroxid, weshalb der Bereich im Bergbau auch als „Eiserner Hut“ (rotbraun bis schwarz gefärbt) bezeichnet wird. Die gelösten Stoffe werden mit dem Sickerwasser bis zum Grundwasser mitgeführt und dort ausgefällt (z. B. die sulfidischen Erze des Kupfers und Silbers), weshalb dieser Bereich auch als Zementationszone bezeichnet wird. Durch die im aktiven Bergbau durchgeführten Grundwasserspiegelabsenkungen erstrecken sich diese Verwitterungsprozesse sowohl flächig als auch in der Tiefe über ein deutlich vergrößertes Gesteinsvolumen. Verstärkt werden die Verwitterungsprozesse dabei durch die bei der Sulfid- und Arsenidverwitterung entstehende Schwefelsäure als auch durch Mikroorganismen. Dies führt zu einer erhöhten Anreicherung von gelösten Verbindungen im Gruben-/Grundwasser (Evans 1992).

Somit weist das in Bergwerke eingedrungene und abgeleitete Wasser eine hohe Mineralisation, viele gelöste Stoffe (z. T. toxische Metalle) sowie einen durch chemische Reaktionen hervorgerufenen sauren oder auch alkalischen pH-Wert auf. Letzterer wird u. a. durch die Flutung von Bergwerken geprägt, indem das Grubenwasser entweder aus Oxidationsprozessen vorhandene Sulfite und Abfallprodukte (niedriger pH-Wert) oder Karbonate (Calcit, Dolomit etc.) und Silikate (Feldspat, Glimmer etc.) bzw. andere

alkalisch reagierende Mineralien (hoher pH-Wert) von den Gesteinswänden aufnimmt bzw. herauslöst (Banks et al. 2004; Ramos und Falcone 2013; Tichomirowa et al. 2010; Wolkersdorfer 2008).

Die in Wisotzky (2011) S. 36ff. u. a. für Grundwasserleiter beschriebenen Säure-Base-Reaktionen treten ebenso in Bergbauwässern mit ihren hohen Mineralisationen auf und führen dabei z. T. zu einer pH-Wert-Stabilisierung (auch pH-Wert-Pufferung genannt). Der pH-Wert befindet sich dabei im sauren oder basischen Bereich, wobei aufgrund der Pufferwirkung eine weitere pH-Wert-Absenkung bzw. -Zunahme vermindert wird. Dies wirkt vor allem bei möglichen Wasseraufbereitungsmaßnahmen hinderlich und ist daher zu berücksichtigen. Als ein Beispiel kann die Pyritverwitterung als Oxidation des gebundenen Sulfitschwefels im Pyrit (FeS_2) durch das Vorhandensein von Sauerstoff zu Sulfat/Hydrogensulfat und Wasserstoffionen in sauren Braunkohletagebaurestseen ($0 < \text{pH-Wert} < 4$) genannt werden. In diesen sauren Wässern fällt das schwer wasserlösliche Eisen(III)-Hydroxid als gelber bis rotbrauner Niederschlag (dem Ocker) aus (Balkenhol 2000; Wisotzky 2011; Wolkersdorfer 2008).

Ein zu berücksichtigender Faktor ist der mikrobiologische Einfluss, wobei z. B. chemolithoautotroph lebende Bakterien bei der Entstehung von sauren Grubenwässern eine wesentliche Rolle spielen. Diese Bakterien beschleunigen u. a. bei der Pyritverwitterung die Oxidationsgeschwindigkeit von Fe^{2+} zu Fe^{3+} um den Faktor 10^5 bis 10^6, was zu einer verstärkten Versauerung führt. Im Verbund mit weiteren Mikroorganismen kann es zu einem ständigen Kreislauf aus Reduktion, Oxidation mit Ablagerung und Lösung in sogenannten Eisen- und Mangankreisläufen kommen. Ebenso ist die biologische als auch chemische Verockerung durch Sauerstoffeintrag (Re-Oxidation von Fe^{2+}) von z. B. aus Bergwerken an die Oberfläche austretender eisenhaltiger Wässer bekannt (Balkenhol 2000; Banks et al. 2004; Griebler und Mösslacher 2003; Wolkersdorfer 2008).

Die durch die Bergwerksentwässerung abgeleiteten sauren Grubenwässer bewirken bei der Einleitung in Flüsse z. T. einen negativen Umwelteinfluss. Die Entwässerung aus dem Freiberger Bergbaurevier trägt z. B. zu 37 % der Zink- und 7 % der Cadmiumbelastung der Elbe bei (Tichomirowa et al. 2010; Wolkersdorfer 2008; Younger et al. 2002).

Einfluss der Wasserchemie auf die Reservoirtemperatur

Für eine ökonomische geothermische Grubenwassernutzung ist vor allem die vorherrschende Gesteins- bzw. Grubenwassertemperatur relevant.

Wie allgemein bekannt, wird das oberflächennahe Erdreich/Gestein bis in 15–25 m Tiefe saisonal durch Sonneneinstrahlung, Regen und die Außentemperatur beeinflusst. Mit steigender Tiefe dominiert der geothermische Temperaturgradient (aufgrund des Wärmeflusses aus tieferen Gesteinsschichten). Hierzu können zusätzlich noch radiogene sowie geochemische Prozesse einen großen Einfluss durch Wärmeproduktion besitzen. Geochemische Prozesse können vor allem in Bergwerken und Grubenwässern auftreten, welche Minerale enthalten, die unter Zufuhr von Feuchtigkeit oder Luft reagieren. Beispielhaft nennen Banks (2012) und Younger et al. (2002) Sulfidminerale wie Pyrit und Markasit (FeS_2), Sphalerit (ZnS) und Galenit (PbS), welche häufig in Metallerz- und

Kohlebergwerken vorkommen. Durch eine Oxidation entstehen hierbei gelöste Metalle, Sulfate und Säuren, was allgemein als saurer Bergwerksabfluss (*acid mine drainage*) bezeichnet wird und eine potentielle Umweltgefährdung an vielen Bergwerksstandorten darstellt.

Für die folgenden zwei möglichen exothermen Reaktionen:

$$2FeS_2 + 2H_2O + 7O_2 = 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+ \quad (17.1)$$

$$ZnS + 2O_2 = Zn^{2+} + SO_4^{2-} \quad (17.2)$$

gibt Banks (2012) S. 69 f eine Wärmefreisetzung von >1400 kJ/mol (Pyrit) bzw. >1700 kJ/mol (Sphalerit) an, was zu einer deutlichen Temperaturerhöhung sowohl des Gesteins als auch des Grubenwassers führen kann. Dies kann für geflutete Bergwerke als eine nicht zeitlich konstante Wärmequelle angesehen werden, da z. B. der Sauerstoffeintrag nach der Flutung abnimmt. Dennoch kann die resultierende Temperaturerhöhung einen wesentlichen Einfluss auf die ökonomische Bewertung haben. Andere Wärmeeinträge durch exotherme organische Zersetzungsprozesse (*Fouling*) sind möglich, spielen jedoch eine untergeordnete Rolle (Banks 2012; Wisotzky 2011).

Weiterhin können ebenso endotherme Reaktionen, wie das Lösen von Kaliumchlorid oder Natriumchlorid, zu Temperaturabsenkungen des Wassers führen, was jedoch vornehmlich bei Salzlagerstätten auftritt (Wisotzky 2011).

Charakterisierung der chemischen Bestandteile im Grubenwasser

Durch standardisierte Wasserbeprobungen (siehe u. a. Griebler und Mösslacher 2003) und Analysen können die physikalischen Parameter und die chemische Zusammensetzung des Wassers, sprich die Ionenkombination (Anionen, Kationen), ermittelt werden und zur Auswertung der hydrochemischen Eigenschaften und des Wassertyps in verschiedenen Darstellungsformen, wie Einzel- und Sammeldiagrammen oder in flächenhaften Darstellungen erfolgen. Sammeldiagramme eigenen sich hierbei zum Vergleich mehrerer Analysen, um einzelne Ionenbeziehungen ableiten zu können. Eine gebräuchliche Darstellungsform für Grundwässer und deren anorganische Hauptlösungskomponenten ist das sogenannte Piper-Diagramm, bestehend aus zwei Dreieckdiagrammen und einem Viereckdiagramm (Raute). Hierbei werden im linken Dreieck die Kationen (Alkalien: Na^+ und K^+, Erdalkalien: Ca^{2+}, Mg^{2+}), im rechten Dreieck die Anionen (Cl^-, SO_4^{2-} und NO_3^-, HCO_3^- und CO_3^{2-}) sortiert und in der Raute als ein gemeinsamer Punkt dargestellt, siehe Abb. 17.3. (Hölting und Coldewey 2013 S. 210 ff).

Die in Abb. 17.3 dargestellten Ergebnisse von chemischen Wasseranalysen verschiedener Bergbauwässer in Mitteldeutschland zeigen eine unterschiedliche Mineralisation und eine hohe Diversität zwischen z. B. sulfatischem oder karbonatischem Charakter. Diese z. T. großen Unterschiede der chemischen Zusammensetzung der Grubenwässer sind, wie schon beschrieben, sehr von der Gesteinszusammensetzung und dem Bergbaustandort (abgebaute Erze, durchteufte Schichten) abhängig. Da die mögliche Zusammensetzung und daraus resultierende Reaktionen so vielfältig sein können, wird an dieser Stelle auf

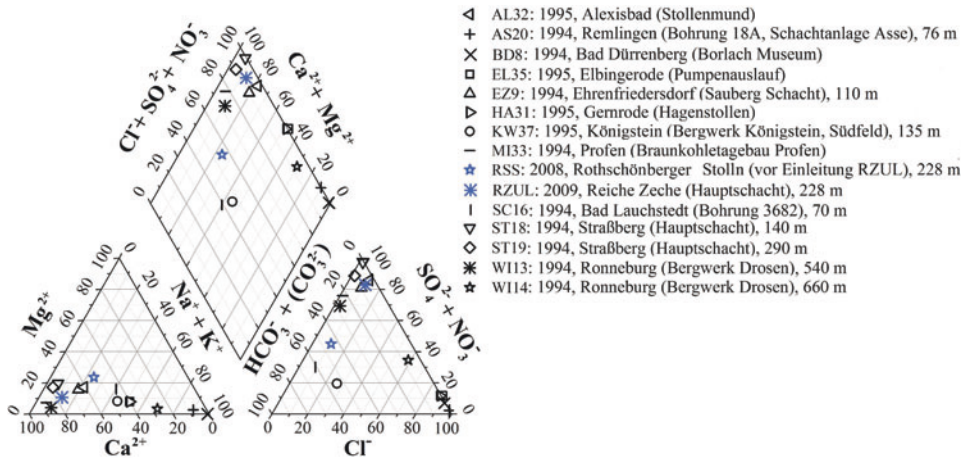


Abb. 17.3 Piper-Diagramm zu chemischen Analysen von Wasserproben aus Bergwerken in Mitteldeutschland (aus Mühlenweg et al. 1997) und für die Reiche Zeche (blaue Symbole), Freiberg (aus Konrad et al. 2010), mit Benennung: Kürzel Probenstandort, Probenjahr, Ort, Tiefe der Probennahme

weiterführende Fachliteratur z. B. von Wolkersdorfer (2008), Younger et al. (2002) und Wisotzky (2011) bzw. Analysen von Tiefenwässern in Schneider et al. (2014) verwiesen. Beispielhaft wird die chemische Wasserzusammensetzung für den Standort Freiberg in Abschn. 17.4.3.1 vorgestellt.

Zusätzlich zu dem dargestellten Piper-Diagramm, in dem nicht alle zu betrachtenden gelösten Inhaltsstoffe (z. B. Fe^{2+}/Fe^{3+}, Al^{3+} etc.) aufgetragen sind, müssen auch weitere chemische Indikatoren wie pH-Wert und Redox-Potential für eine umfassende Bewertung betrachtet werden. Zur Darstellung der in Redox-Systemen vorherrschenden Spezies nennen Merkel und Planer-Friedrich (2008) u. a. Stabilitäts- oder Prädominanzdiagramme (auch Eh-pH- oder pE-pH-Diagramm) in denen üblicherweise das Redoxpotential (Eh) von meist in Lösung befindlichen Elementen über dem pH-Wert aufgetragen ist. Lösungsmittel ist hier wiederum häufig Wasser. Bei Unterschreitung einer vom Diagrammersteller definierten Konzentration oder Aktivität wird meist die dominierende, ausfallende Mineralphase dargestellt, was für die Bewertung und Vorhersage für Grubenwässern verwendet werden könnte. Für weitere Details hierzu wird auf Merkel und Planer-Friedrich (2008) S. 45ff verwiesen.

Einfluss der geothermischen Nutzung auf das Wasser

Für die Planung von Grubenwasseranlagen ist der Einfluss einer Temperaturänderung hinsichtlich Änderungen in der chemischen Zusammensetzung zu betrachten. Hierbei sind bei der geothermischen Grubenwassernutzung sowohl eine moderate Temperaturabsenkung bei Nutzung als Wärmequelle für Wärmepumpen bei Heizanwendungen als auch eine Temperaturerhöhung bei Kühlanwendungen möglich. In der Literatur genannte Auswirkungen bei mineralisierten Wässern sind in Tab. 17.4 zusammengestellt.

Tab. 17.4 Auswahl von Auswirkungen bei Temperaturänderung von mineralisierten Wässern. (Hellawell 1986; Konrad et al. 2010; PKG 2011)

Temperaturabsenkung	Temperaturerhöhung
Absinkende Löslichkeit der Ionen (Ausfällung – *scaling*) → sinkende Leitfähigkeit	Erhöhte Löslichkeit von Ionen → steigende elektrische Leitfähigkeit
⇒Beeinflussung des pH-Wertes ⇔ Beeinflussung der Löslichkeit	
Zunahme von Oxidationen und Ausfällungen	→CO_2-Ausgasung ⇒ z. B. Ausfallen von $CaCO_3$ →Abnahme des gelösten Sauerstoffs
Absenkung der Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse	Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse
Verringerte Stoffwechselvorgänge der Organismen	Erhöhte Stoffwechselvorgänge von Organismen → Abbauprozesse nehmen zu → *fouling* möglich (Biofilmbildung)
Teilweise Zunahme der biologischen Verockerung (z. B. Bakteriengattung Gallinella 1–5 °C)	Vorteilhaft für viele biochemische Prozesse von z. B. Mikroorganismen
Untere Grenze: Eisbildung → Volumenänderung des Wassers	Abnahme der Dichte und Viskosität → Sedimentation partikulärer Substanzen

Aus vergleichbaren Untersuchungen zur Thermalwassernutzung ($t > 50\,°C$) für Heizanwendungen ist u. a. bekannt, dass es bei der Umwälzung des warmen Wassers in offenen Kreisläufen an Feststoffoberflächen zu schwarzen schleimartigen Überzügen kommen kann. Diese ließen sich als Rückstände von sulfidreduzierenden Bakterien identifizieren. Weiterhin ist bekannt, dass Korrosion und Ablagerungen vor allem vermehrt bei Eintrag von Sauerstoff in das Wasser, z. B. bei Anlagenstillstand, stattfinden, was ebenso für Grubenwasseranlagen gilt. Bei Sauerstoffzutritt kommt es weiterhin zu Ausfällungsreaktionen wie z. B. von Eisenhydroxid, was u. a. zur Verockerung und somit zur Verstopfung von Anlagenteilen (Wärmeübertrager) führen kann und folglich zu vermeiden ist. Beispielhaft werden für Grundwässer Grenzwerte für Eisen (> 0,5 mg/l) und Mangan (> 0,2 mg/l) angegeben, oberhalb derer es zu unerwünschten Reaktionen kommen kann. Zur Vermeidung von Ausfällungen wird bei Thermalwasserkreisläufen hierzu meist eine Druckhaltung installiert. Zur Vermeidung von Luftzutritt sollte die Grubenwassernutzung in einem weitestgehend geschlossenen Kreislauf stattfinden (Banks et al. 2009; Konrad et al. 2010; Schneider et al. 2011; Wolkersdorfer 2008).

Für eine Simulation und Vorhersage zur Änderung des chemischen Gleichgewichts in Abhängigkeit der Temperatur verwenden verschiedene Literaturstellen u .a. die folgenden Programme: *PHREEQC*, *FactSage* und *Thermo-Calc*. (Banks et al. 2009; Hölting und Coldewey 2013; Merkel und Planer-Friedrich 2008; Wisotzky 2011; Wolkersdorfer 2008).

Banks et al. (2009) geben hierbei für die geothermische Grubenwassernutzung an, dass bei typischen geringen Temperaturänderungen von z. B. 6 K keine großen Änderungen in der maximalen Löslichkeit und folglich keine größeren Ausfällungen von z. B. Calcit

oder Eisenhydroxid zu erwarten sind. Dies ist aber unter anderem nach Ausführungen von Merkel und Planer-Friedrich (2008) zu Prädomianzdiagrammen stets zu prüfen.

17.3.5 Öffentlichkeitswirksame Darstellung

Die öffentlichkeitswirksame Außendarstellung eines Projektes ist für eine langfristige Etablierung und Akzeptanz von großer Bedeutung. Besonders die Nutzung von Grubenwässern, als nichtalltägliche Energiequelle, ist in der Bevölkerung nur wenig bekannt. Aufgrund der Zusammengehörigkeit von Grubenwasser und Bergwerk entstehen Fragen u. a. in Bezug auf Umwelteinflüsse, Schadstoffe oder Verfügbarkeit. Aus diesem Grund sollten mit Beginn der Planung das Interesse der Bevölkerung geweckt, sowie gleichzeitig geeignete Informationen bereitgestellt werden.

Zu einer öffentlichkeitswirksamen Darstellung gehören neben der Beratung und Information auch Messe- und Tagungsteilnahme sowie Vorträge, Workshops und Gespräche mit Behörden und der ansässigen Bevölkerung. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Einbeziehung lokaler Medien, die Erstellung einer Projekt-Webseite und die Präsenz in anderen sozialen Medien (Louie 2015).

Internationale Forschungsprojekte haben größtenteils einen Arbeitsschwerpunkt im Bereich Öffentlichkeitsarbeit. Im Rahmen von größeren Vorhaben z. B. zum Thema Bergbausanierung entstanden Webseiten, welche aber nur noch zum Teil aufgerufen werden können, wie z. B.:

- REVI (INTERREG II C): Revitalisierung von Städten in ehemaligen Kohlebergbaugebieten
- READY (INTERREG III B) 2003–2006: Rehabilitation and Development of Mining Regions – Sanierung und Entwicklung von Bergbauregionen
- ReSOURCE 2009–2012: Exploring Post-mining Potentials in Central Europe
- VODAMIN (SAB Ziel 3) 2010–2013: Verbesserung der Wasserqualitäten bergbaubeeinflusster Gewässerkörper von Bergbaufolgelandschaften in Sachsen und Tschechien (http://www.vodamin.eu/de/)

Ein großer Kritikpunkt liegt in der langfristigen Verfügbarkeit der Daten und der Zugänglichkeit zu Abschlussberichten. Auch werden eine Vielzahl von Webseiten nach dem Projektende nicht mehr betreut und sind folglich innerhalb kurzer Zeit nicht mehr erreichbar. Ein Ziel neuer Forschungsprojekte sollte sein, die Verfügbarkeit von Abschlussberichten und Webseiten langfristig zu gewährleisten.

Im Rahmen einer Recherche der Technischen Universität Michigan wurde z. B. für Kommunen eine Übersicht zur Nutzung von Grubenwasser zur Heizung und Kühlung am Beispiel Calumet in Michigan (USA) verfasst (Louie 2015). Jedoch wurde dieser Bericht nie international veröffentlich und ist somit nur eingeschränkt zugänglich.

Eine der bekanntesten Grubenwasseranlagen befindet sich in der Gemeinde Heerlen in den Niederlanden. Durch eine Vielzahl von Veröffentlichungen (z. B. *minewater project* 2011; Roijen et al. 2007; Verhoeven et al. 2014) und Presseartikeln, einer aktiv betriebenen Webseite (http://www.mijnwater.com) sowie Präsenz in den sozialen Medien wie Twitter, Facebook, LinkedIn oder YouTube wurde die öffentlichkeitswirksame Arbeit hier sehr gut umgesetzt. Es gibt kaum eine Anlage, welche so präsent in den digitalen Medien ist, wie die in Heerlen.

Eine interaktive Visualisierung der wichtigsten Betriebsdaten sowie die Darstellung der Anlageneffizienz mittels Arbeitszahlen konnte jedoch auf keiner Webseite von Grubenwasseranlagen recherchiert werden.

Eine solche öffentlichkeitswirksame Darstellung von Grubenwasseranlagen könnte die Vorbehalte gegenüber dieser Technologie weiter verringern. Der nachfolgende Abschnitt soll daher dazu dienen, die Informationen aus einer sehr umfangreichen Recherche zusammengefasst einer breiten Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen.

17.4 Übersicht zur weltweiten geothermischen Grubenwassernutzung

Im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche wurden sowohl Fachliteratur (z. B. Hall et al. 2011), frei verfügbare Präsentationen, Tagungsbände und Anfragen bei einzelnen aktuellen Anlagenbetreibern für die Datenzusammenstellung in diesem Abschnitt verwendet. Nachfolgend werden in Abschn. 17.4.1 zuerst aus den recherchierten Anlagen und Kenndaten die daraus abgeleiteten und zusammengefassten Ergebnisse als Übersicht vorgestellt. In Abschn. 17.4.2 werden die einzelnen Anlagendetails Tab. 17.5 und Tab. 17.6) und die zugeordneten geografischen Standorte gezeigt, bevor in Abschn. 17.4.3 auf ausgewählte Beispiele in Sachsen (Deutschland) – mit deren Historie, Details zur Anlagenkonzeption und Umsetzung sowie eventuell aufgetretenen Problemen – eingegangen wird. Aus dem recherchierten Datenbestand wurden, sofern möglich, z. T. einzelne Größen zusätzlich berechnet.

17.4.1 Entwicklung und aktueller Stand von Grubenwasseranlagen

Beginnend ist hierzu als Übersicht die weltweite Anzahl von in Betrieb genommen bzw. stillgelegten Anlagen pro Jahr in Abb. 17.4 dem historischen Rohölpreis gegenübergestellt. Aufgrund eines starken Rohöl- und folglich auch Energiepreisanstieges kam es auch zu vermehrten Planungen und zeitlich versetzten Anlageninstallationen. Hierbei ist jedoch mit dem Strompreis noch ein wesentlicher Faktor unberücksichtigt, da dieser einen großen Einfluss auf die Ökonomie der am häufigsten eingesetzten elektrisch betriebenen Wärmepumpen hat. Der Strompreis differiert wiederum zwischen den einzelnen Staaten (Bsp.: BRD 29,5 ct/kWh, Tschechische Republik 12,7 ct/kWh, Daten für 1. Halbjahr 2015; priv.

Tab. 17.5 Kenndaten der weltweit in Betrieb befindlichen geothermischen Grubenwasseranlagen

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
1a	Freiberg	Erzgebirge, Deutschland	Rothschönberger Stolln	Silber	220	o.	14	–	600/860	Kreiskrankenhaus Freiberg	2014	Ulbricht 2013 Johnson Controls KKH FG 2014
1b	Freiberg	Erzgebirge, Deutschland	Reiche Zeche, Rothschönberger Stolln	Silber	228	o.	18; 15 (Heiz.; Kühl.)	56 (144)*	155/200 (670)*; 155 (500)*	Universitäts-gebäude	2013	Grab et al. 2010 SIB 16.10.2013 Bauconzept 2015
1c	Freiberg	Erzgebirge, Deutschland	Alter Fürstenstolln	–	55	o.	10	22	96/130 120/– (Kühl.)	Schloss Freudenstein	2009	Lagerpusch 2010 Hall et al. 2011 Batchelor et al. 2015
2	Marienberg	Erzgebirge, Deutschland	Wismut-Schacht 302	Uran	144	o.	12	120	700–830/ 800–1700	Freizeitbad	2007	Wieber und Ofner 2008 Lagerpusch 2010)
3	Pobershau	Erzgebirge, Deutschland	Walfisch-Stollen	Zinn	12	g.		–	–/15	Zweifamilienhaus	2008	Lagerpusch 2010 MA 2015
4a	Ehrenfriedersdorf	Erzgebirge, Deutschland	Nord-West-Feld	Zinn	100	o.	10	–	65/95 66/– (Kühl.)	Mittelschule	1994	Wieber und Ofner 2008 Debes 2012b Lagerpusch 2010
4b	Ehrenfriedersdorf	Erzgebirge, Deutschland	Zinngrube, Revier Sauberg	Zinn	110	o.	11	22	82/120	Besucherbergwerk	1998	Raube 2012 Wieber und Ofner 2008 Wieber und Ofner 2008 Kissing 2009 Lagerpusch 2010
5a	Bad Schlema	Erzgebirge, Deutschland	Grube Schlema-Alberoda	Uran	90	o.	11	14	100/200	Schule	2013	Wismut 2012 Debes 2012b Vater 2012 Ramos et al. 2015
5b	Bad Schlema	Erzgebirge, Deutschland	Grube Schlema-Alberoda	Uran	102	g.	21	–	–/–	Einfamilienhaus	2007	Debes 2012a LfULG 2012 Vater 2007 Vater 2012

Tab. 17.5 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
6	Marl	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Auguste Victoria	Steinkohle	700	g.	16-21	–	70/–	4 Familienhäuser	2010	RAG 2009 Bracke und Bussmann 2015 Lintker 2014 Louie 2015 Thien 2015
7	Bochum	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Robert Müser	Steinkohle	570	o.	20	40	–/690	Feuerwache, 2 Schulen	2012	Raube 2012 Bracke und Bussmann 2015 Willmes und Bücker 2014
8a	Essen-Katernberg	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Zollverein	Steinkohle	950	o.	30	522	790/–	Museum	2000	Wieber und Ofner 2008 Debes 2012b RAG 2009 Thien 2015
8b	Essen-Heisingen	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Heinrich	Steinkohle	335–480	o.	22	20	354/–	Seniorenheim	1984	Wieber und Ofner 2008 Wieber und Ofner 2008 RAG 2009 NRW 2004 Wolf et al. 2007
9	Landsweiler-Reden	Deutschland	–	Kohle	800	o.	32	50	450/–	Gebäude des Garten Reden	2012	Reden 2008 RKN 2012 Frisch 2012 TKLN 2014
10	Wettelrode	Mansfeld-Südharz, Deutschland	Röhrig Schacht, Segen-Gottes-Stollen	Kupfer	300	o.	13	90–150	32/47	Bergbaumuseum	2013	Koch 2012 Ramos et al. 2015 Hoffmann et al. 2014
24	Zagorje ob Savi	Slowenien	–	Braunkohle	450	o.	28	3	–/–	Forschungs-einheit OLEA	ca. 2012	Op't Veld 2012 Vidrih et al. 2011

Tab. 17.5 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
25	Markham	Wales, Großbritannien	Markham Colliery Shaft 3	Kohle	235	o.	15	15–26	34–58/54–78	Bürogebäude Alkane Energy	ca. 2015	Athresh et al. 2015
26	Crynant	Wales, Großbritannien	Süd-Wales Kohlerevier	Kohle	65	–	12	7	–/35	Farmgebäude	2014	Farr und Tucker 2015
27	Dawdon, County Durham	England, Großbritannien	„East of Wear“ Bergbaugebiet	Kohle	–	o.	19	<100	–/12	Bürogebäude	2011	Preene und Younger 2014 Bailey et al. 2013
28	St Day, Cornwall	England, Großbritannien	Mount Wellington Mine	Zinn	–	g.	–	–	–/20	Fabrik- und Bürogebäude	2008	Preene und Younger 2014
29	Shettleston, Glasgow	Schottland, Großbritannien	–	Kohle	100	o.	12	10,8	–/65	16 Wohnhäuser	1999	Hassani et al. 2011 Wieber und Ofner 2008 Banks et al. 2008 Preene und Younger 2014
30	Lumphinnans	Schottland, Großbritannien	–	Kohle	170	o.	14,5	–	–/65	18 Wohnhäuser	2001	Wieber und Ofner 2008 Banks et al. 2003 Preene und Younger 2014
31	Norberg	Schweden	Mimer-Mine	Eisen	300	o.	4–7	–	–/180	mehrere Gebäude	1985	Wolf et al. 2007 Arkay 1993
32	Ljusnarsberg	Schweden	–	Kupfer	310	–	2–13	–	–/–	mehrere Gebäude	–	Arkay 1993
33	Nowo-schachtinsk	Russland	–	Steinkohle	50–150	o.	12–13	960	7800/10900	Wohnhäuser, öfftl. Gebäude	2007-2009	JISC 2007
34	Heerlen	Niederlande	Oranje Nassau	Kohle	700	o.	28 (Heiz.)	<120	–/–	Einkaufszentrum, Büros	2013	Jones et al. 2014 Verhoeven et al. 2013
					250		16 (Kühl.)	<230	–/–			

Tab. 17.5 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
35	Pribram	Böhmen, Tschechien	Prokop-Schacht	Uran	–	o.	28	36	420/500	Schule, Verwaltungsgebäude	1989	Myslil und Frydrych 2005 Wolf et al. 2007
36	Marienbad	Böhmen, Tschechien	Hachov-Plana	Uran	–	–	ca. 20	-	–/550	Bergwerksgebäude	1989	Wolf et al. 2007
37	Novaky-Laskar	Slowakei	Bohrung S1-NB-II	Braunkohle	1851	o.	58	50	2733/–	Bergwerkbelüftung	2001	Halmo 2010
54	Park Hills	Missouri, USA	–	Blei	122	o.	14	16,9	–/113 –/– (Kühl.)	Verwaltungsgebäude	1995	Wieber und Ofner 2008 GeoExchange 2002 Hall et al. 2011
55	Scranton	Pennsylvania, USA	Marvine Mine Pool	Steinkohle	122	o.	14	–	–/– (Kühl.)	Universitätsgebäude	2010	Korb 2012
56	Kingston	Pennsylvania, USA	–	Steinkohle	–	o.	16	20,4	130/–	Freizeitzentrum	1981	Wikipedia 2012a Korb 2012
57	Butte	Montana USA	Orphan Boy Mine	Gold, Silber, Kupfer	245	g.	20–27 24–35	18-20	108/147 100/120 (Kühl.)	Universitätsgebäude	ca. 2014	Wikipedia 2012b Thornton 2013 ORNL 12. 2014
58	Calumet	Michigan, USA	–	Kupfer	90	o.	13–18	20	129/–	Keweenaw Research Center	–	Louie 2015
59	Springhill	Nova Scotia, Kanada	–	Kohle	140	o.	18	14,4 16,8	111/– 159/– (Kühl.)	Fabrikgebäude, Restaurant	1989	Wieber und Ofner 2008 Jessop et al. 1995 Raymond und Therrien 2008 Banks et al. 2003 Herteis 2015

* – geplante Endausbaustufe, T_W – Grubenwassertemperatur, Q – Volumenstrom, P_{Heiz} – Heizleistung, WP – Wärmepumpe, Inbetr. – Inbetriebnahme, o. – offen, g. – geschlossen

Tab. 17.6 Kenndaten der weltweit geplanten, im Bau befindlichen oder stillgelegten geothermischen Grubenwasseranlagen

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
11	Zwickau	Erzgebirge, Deutschland	–	Steinkohle	625	o.	24	30	500 /600	Universitäts-gebäude	Probe-betrieb	Sunbeam 2013 Röder 2012 Röder 2015
12	Bad Schlema	Erzgebirge, Deutschland	Grube Schlema-Alberoda	Uran	–	o.	27		2400/–	Gewerbe, Wohnhäuser	Studie	Vater 2012
13	Aue	Erzgebirge, Deutschland	Schacht 383	Kupfer	–	o.	20–25	100	1000/–	Industriegebiet	Studie (storn.)	ReSource 2011
14	Friedeburg, Hettstedt-Burgörner	Mansfeld-Südharz, Deutschland	Schlüssel Stollen	Kupfer	79–90	o.	8–12	1.200	1400/–	Industriegebiet	Studie	Hoffman und Joppich 2012 Lau 2012
15	Wiederstedt	Mansfeld-Südharz, Deutschland	Mundlochstollen Wiederstedt	Kupfer	<5	o.	10–12	120	–/–	Novalisschloss	In Planung	Lau 2012 ncn KG - 2012 MK 2012
16	Bottrop	Ruhrgebiet, Deutschland	Prosper Haniel	Steinkohle	>1200	g.	25–30		500/–	Wohn- und Gewerbegebiete	Num. Studie	Bracke und Bussmann 2015 Bracke und Bussmann 2015
17	Hamm (Sieg)	Siegerland-Wied, Deutschland	Grube Huth	Eisen	465	–	10	12	69/–	Industrie-, Verwaltungs-gebäude	Studie	Wieber 2010
18	Seelbach bei Hamm	Siegerland-Wied, Deutschland	Grube Kupferner Kessel	Eisen	–	–	10	13	78/–	Waldschwimm-bad	Studie	Wieber 2010
19	Bitzen	Siegerland-Wied, Deutschland	Grube St. Andreas	Eisen	730	–	13	11	100/–	Wohnhäuser	Studie	Wieber 2010
20	Pracht-Wickhausen	Siegerland-Wied, Deutschland	Grube Hohe Grete	Eisen	430	–	10	6	36/–	–	Studie	Wieber 2010

Tab. 17.6 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
21	Breitscheid	Siegerland-Wied, Deutschland	Grube Alte Hoffnung/Tränke	Eisen	300	–	10	15	87/–	Firmengebäude	Studie	Wieber 2010
22	Willroth	Siegerland-Wied, Deutschland	Grube Georg, Schacht 2	Eisen	850	o.	17–22 36	194 441	900/1200 5100/– (Kühl.)	Gewerbegebiet	Studie	Münch 2009 Wieber 2010 Münch 2010
23	Alsdorf	Aachener Revier, Deutschland	Eduard Schacht	Steinkohle	860	g.	22–26	–	–/420	Wohnpark, Energeticon	In Bau	Stüber 2012 Clauser et al. 2005 GrEEN 2015 Schetelig et al. 2005
38	Handlova	Slowakei	Alter Stollen	Braunkohle	–	o.	18	216	–/2840	Wohngebiet	Studie	Halmo 2010
39	Hrastnik, Trbovlje	Slowenien	Trbovlje-Hrastnik-Mine	Braunkohle	40	o.	14	41	–/–	Bürogebäude	Studie (storn.)	Butolen 2010
40a	Zagorje ob Savi	Slowenien	Bore KT-1/97	Braunkohle	425	–	30-32	36	–/–	Schwimm-, Sporthalle	Studie	Butolen 2010
40b	Zagorje ob Savi	Slowenien	Bore FK-1/97	Braunkohle	180	–	13	40–43	–/–	–	Studie	Butolen 2010
41	Mieres, Asturien	Spanien	–	Kohle	362	o.	17-23	23508	137.000/ 160.000	Universitäts-gebäude	Studie	Loredo et al. 2011 Ordonez et al. 2010 Jardón 2013
42	Dolni Rychnov	Tschechien	Anezka, Bohrung HDR1	Braunkohle	24	o.	10	1	11/–	Rathaus, Kindergarten, Seniorenheim	Studie	ENERGONPLAN s.r.o. 2011
43	Czeladz	Polen	Saturn Mine, Schacht Pawel	Kohle	188	o.	12-14	1440	–/–	Historisches Bergwerk	Studie	Op't Veld 2012 Malolepszy et al. 2005 Vidrih et al. 2011

Tab. 17.6 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
44	Nowa Ruda	Polen	–	Kohle	890	o.	23	72	419/1600	–	Studie	Malolepszy 2003
45	Burgas	Bulgarien	Cherno More Mine	Kohle	–	–	16	–	–/70-80	Fabrik	Studie	Op't Veld 2012 Remining Lowex 2012 Vidrih et al. 2011
46	Recsk	Ungarn	–	Kupfer	1160	o.	29	72	–/2,5	Bäder, Hotels	Studie	Hall et al. 2011 Dillenardt und Kranz 2010 Toth und Bobok 2007
47	Gardanne	Frankreich	Morandat Mine	Kohle	1109	o.	25	–	–/–		In Planung	Op't Veld 2012 brgm 2014
48	Freyming-Merlebach	Frankreich	Freyming-Merlebach-Mine	Kohle	1250	o.	52	–	–/		Studie	minewater project 2011
49	Kongsberg	Norwegen	Kings Mine	Silber	33	g.	16	–	12/–	Unterirdischer Festsaal	Studie	Banks et al. 2003 Preene und Younger 2014 Banks et al. 2004
50	Folldal	Norwegen	Folldal Mine	Kupfer, Zink, Schwefel	600	g.	6	–	13,4/18	Museum	Still. (1998–2008)	Hall et al. 2011 Banks et al. 2003 Ramos et al. 2015
51	Midlothian	Schottland, Großbritannien	Monktonhall Colliery	Kohle	900	o.	13	108	1150/1500	–	Still	Banks et al. 2003 minewater project 2011
52	Mossend, North Lanarkshire	Schottland, Großbritannien	–	Kohle	–	o.	–	–	–	Beheizung eines Containers	Still. (1992–n/a)	Banks et al. 2009

Tab. 17.6 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
53	Fohnsdorf	Österreich	Kohlenmulde	Kohle	750	o.	30	–	–/900	180 Niedrig-energiehäuser	Studie	Bieg et al. 2013
60	Britannia Beach	British Columbia, Kanada	Britannia Mine	Kupfer	1250	o.	15	600	960–4000/ 1200–5000	–	Studie	Hall et al. 2011 Grasby et al. 2012
61	City of Yellowknife	North West Territories, Kanada	Con Mine, Robertson Schacht	Gold	400	o.	35	21	240/300	–	Studie (storn.)	Ghomshei 2007 Anselmi 2014
62	Bruce Mines	Ontario, Kanada	–	Kupfer	103	o.	8	14	–/–	Treibhäuser, Gebäude	Studie	Jarvie-Eggart und Michelle 2015
63	Springfield	Illinois, USA	Panther Creek Mine #2	Kohle	–	–	–	18	–/–	National Guard Headquarter	Studie	IDoMA 04.15
64	Timmins	Ontario, Kanada	MacIntyre und Hollinger Mine	Gold	250	o.	12–13	–	–/–	Arena, Krankenhaus	Studie (storn.)	Hall et al. 2011
65a	Kingston	Pennsylvania, USA	–	Steinkohle	87	o.	13	–	–/–	Freizeitzentrum	Still. (1979–1999)	Korb 2012
65b	Kingston	Pennsylvania, USA	–	Steinkohle	–	o.	–	–	–/–	Medizinisches Zentrum	Still. (1980er–2000er)	Korb 2012
66	Carbondale	Pennsylvania, USA	–	–	–	–	–	–	–/–	–	Still. (1980er–1990er)	Korb 2012
67	Pittsburgh	Pennsylvania, USA	–	Kohle		o.	14	23	–/–	Kirche	Außer Betrieb	Korb 2012 Ove 2008 Burtner et al. 2009
68	Murdochville	Quebec, Kanada	Gaspe Mine, Schacht P1100	Kupfer	670	o.	7	177	765/1020	Gewerbegebiet	(Num.) Studie	Raymond und Therrien 2008 Raymond und Therrien 2008 Raymond und Therrien 2014

T_W – Grubenwassertemperatur, Q – Volumenstrom, P_{Heiz} – Heizleistung, WP – Wärmepumpe, storn. – storniert, num. – numerisch, still. – stillgelegt, o. – offen, g. – geschlossen

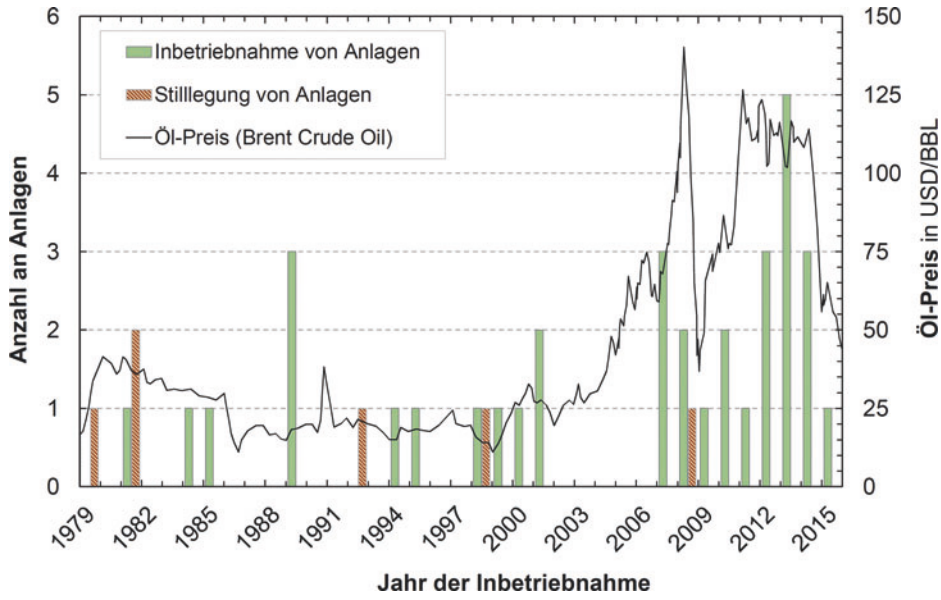


Abb. 17.4 Zeitliche Entwicklung von Errichtung/Inbetriebnahme bzw. Stilllegung von Grubenwasseranlagen weltweit im Vergleich zum Öl-Preis. (Datenquelle Öl-Preis: tradingeconomics.com)

Haushalte bis 5000 kWh/Jahr, Statistisches Bundesamt – Destatis 24.März.2016), weshalb hier auf eine entsprechende Darstellung verzichtet wird.

Aus der Datenabstraktion der umfangreichen Recherche in Abb. 17.5 geht hervor, dass eine geothermische Grubenwassernutzung ehemaliger Bergwerke – sowohl in umgesetzten Anlagen als auch mit Machbarkeitsstudien – im europäischen und weltweiten Vergleich bisher besonders in Deutschland forciert wurde, vgl. auch Tab. 17.5 und 17.6. Hierbei ist immer die existierende Wärme- und Kälteabnehmerstruktur sowie die Bergwerksnähe relevant, welche besonders häufig in Deutschland infolge einer hohen

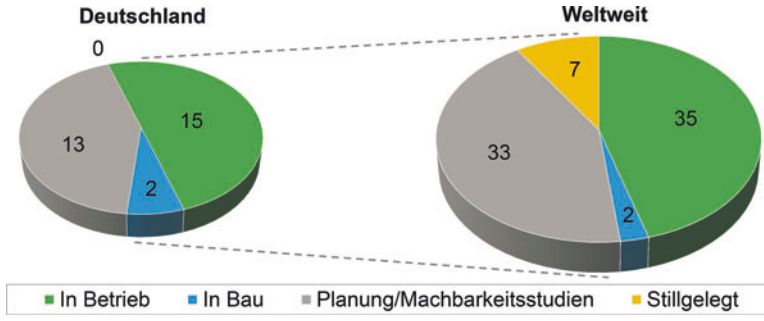


Abb. 17.5 Übersicht der betriebenen, geplanten (bzw. in Bau befindlichen) und stillgelegten geothermischen Anlagen mit Grubenwassernutzung weltweit und in Deutschland, Stand 12.2015

Besiedelungsdichte gegeben ist. Es sei hierzu erwähnt, dass nationale Studien von Ländern außer Deutschland selten veröffentlicht und demzufolge schwierig recherchierbar sind.

Die Anzahl der vorliegenden Studien zeigt, dass bei zukünftig evtl. weiter steigenden Energiepreisen mit einem weltweiten Ausbau der Grubenwassernutzung gerechnet werden kann. Die mit 35 geringe Anzahl an recherchierten weltweit in Betrieb befindlichen Anlagen ist auf verschiedene Ursachen und differenzierte Hemmnisse zurückzuführen, vgl. Abschn. 17.2.2.

Bei Betrachtung der Leistungsbereiche sowohl installierter als auch geplanter möglicher Anlagen (Abb. 17.6) ist deutlich eine Konzentration von Anlagen im kleinen Leistungsbereich bis max. 200 kW erkennbar, was vorwiegend durch die derzeitige Abnehmerstruktur mit überwiegend Einzelkunden erklärbar erscheint. Größere Leistungsbereiche bedürfen einerseits einer breiteren Abnehmerstruktur und folglich eines Wärme- bzw. Kältenetzes, welches mit weiteren Investitionskosten verbunden ist. Andererseits wären Großabnehmer, wie Industriekunden, denkbar, wobei jedoch die Standortnähe und der Wärmepreis wesentliche Entscheidungskriterien darstellen. Die recherchierten Machbarkeitsstudien und Planungen zeigen aber auch hier einen Trend zu größeren Anlagenleistungen auf.

Einzig die Kühlung mittels Grubenwasser erscheint derzeit noch deutlich unterrepräsentiert, obwohl diese gegenüber der Wärmebereitstellung keine Wärmepumpe und folglich weniger Installations- und Betriebskosten (Wartung, Strom) aufweist.

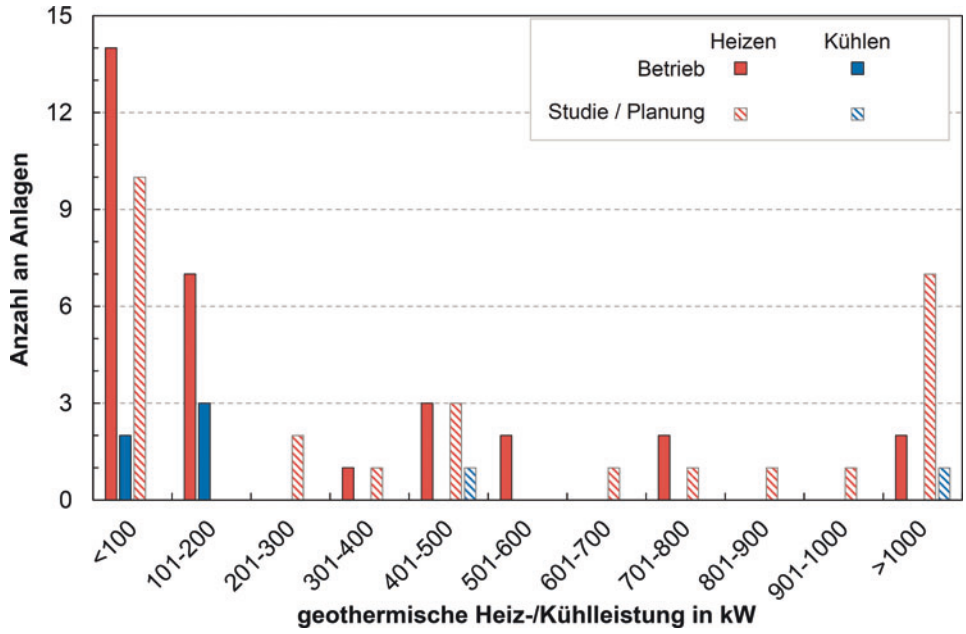


Abb. 17.6 Recherchierte und berechnete geothermische Heiz- und Kühlleistung der Anlagen in Betrieb sowie der Studien und geplanten neuen Anlagen

Die kumulierte Heiz- und Kühlleistung aller weltweit in Betrieb befindlicher Anlagen beläuft sich dabei auf >22,5 MW (heizen, nach der Wärmepumpe) sowie >0,6 MW (kühlen). Die Problematik bei dieser Datenzusammenstellung sind die z. T. unvollständigen Angaben von bereits realisierten Projekten.

Die geothermische Nachnutzung von Grubenwässern aus dem Altbergbau kann ebenso hinsichtlich der ursprünglich abgebauten Erze und Mineralien unterschieden werden. Aus Abb. 17.7 ist u. a. eine überproportional gehäufte Nachnutzung von gefluteten Kohlegruben ersichtlich, was einerseits mit der großen Anzahl und andererseits mit den dabei z. T. großen Tiefen dieser Bergwerke und somit erhöhten Wassertemperaturen korrespondiert. Aufgrund der hier aufgelisteten 35 Anlagen weist diese Zusammenstellung gegenüber einer Studie von Loredo et al. (2016) (mit 28 Grubenwasseranlagen) eine geringfügige Verschiebung der ursprünglich abgebauten Erze auf.

Aus dieser Darstellung können teilweise evtl. häufig auftretende Probleme aufgrund des Wasserchemismus gefolgert und auf andere zukünftige Standorte übertragen werden.

In Abb. 17.8 und 17.9 sind die recherchierten Anlagen mit den aus Tab. 17.5 und 17.6 zugewiesenen Nummerierungen entsprechend ihres Betriebsstatus eingetragen. Es sei hierzu angemerkt, dass für die Kontinente Südamerika, Afrika, Asien und Australien keine Anlagen recherchiert werden konnten. Es ist aber nicht auszuschließen, dass u. a. in Südamerika Studien zur Nachnutzung von Altbergbau bis hin zu einer Umsetzung durchgeführt wurden.

Nachfolgend sind die geplanten und realisierten Grubenwasseranlagen in Deutschland und Europa in Abb. 17.8 dargestellt. Für Europa ist eine Konzentration der Anlagen vor allem auf Mitteleuropa und Großbritannien ersichtlich, was u. a. mit den Erzlagerstätten und den jeweiligen gefluteten alten Abbaugebieten sowie der heutzutage vorherschenden Besiedelungsdichte (Abnehmerstruktur) zu erklären ist. Für Süd- und Osteuropa konnten Studien zu potentiellen Standorten recherchiert werden, jedoch sind dort andere Faktoren, wie eine unzureichende Abnehmerstruktur bzw. fehlende Investoren und finanzielle Unterstützungen, als Hemmnisse für eine Realisierung vorhanden.

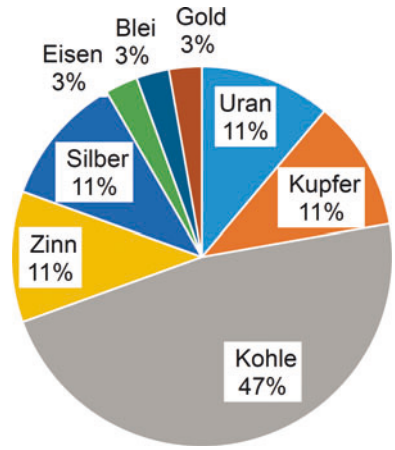


Abb. 17.7 Vorwiegend abgebaute Rohstoffe in den aktuell 35 gefluteten Bergwerken mit geothermischer Grubenwassernutzung

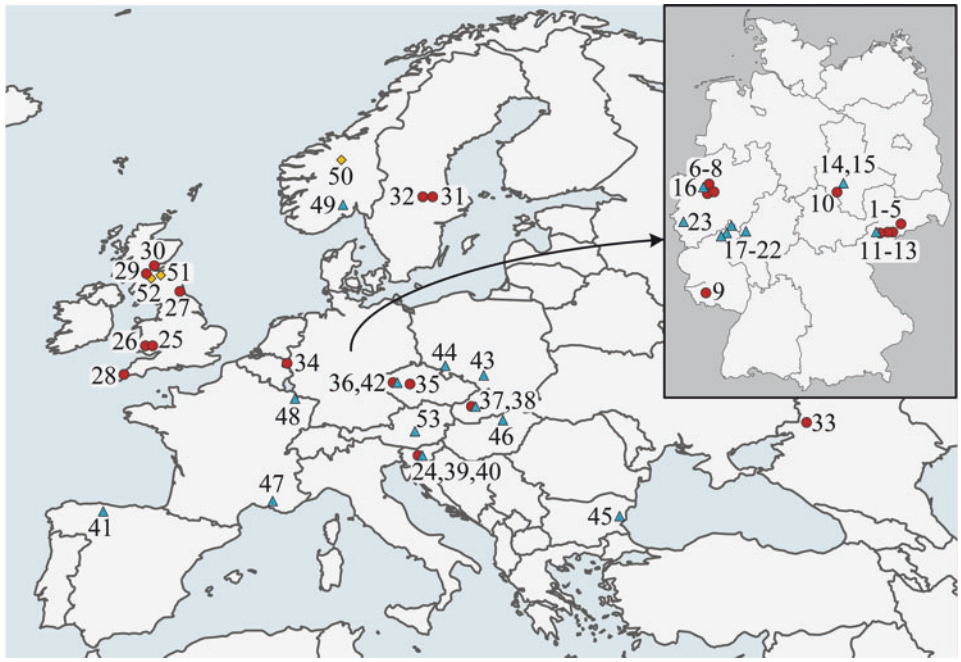


Abb. 17.8 Übersicht der Grubenwasseranlagen in Deutschland und Europa (rot: Anlage ist in Betrieb; gelb: Anlage wurde nach Betrieb stillgelegt; blau: Bau oder Planung einer Anlage, Machbarkeitsstudie) Nummern wie Tab. 17.5 und 17.6

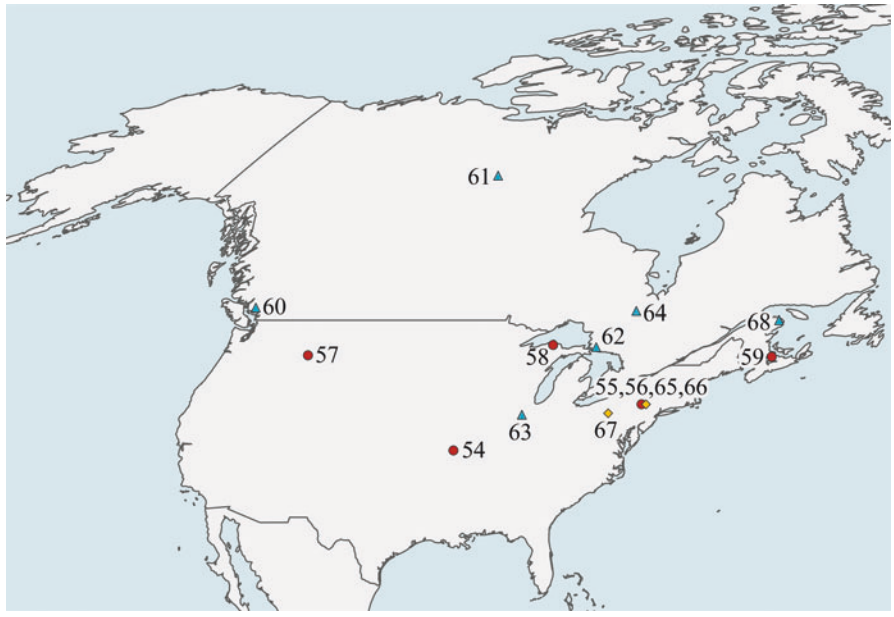


Abb. 17.9 Übersicht der Grubenwasseranlagen in Nordamerika (rot: Anlage ist in Betrieb; gelb: Anlage wurde nach Betrieb stillgelegt; blau: Bau oder Planung einer Anlage, Machbarkeitsstudie) Nummern wie Tab. 17.5 und 17.6

In Deutschland sind die ehemaligen Bergbauregionen in Ost-, Mittel- und Westdeutschland mit einer vergleichsweise großen Zahl von realisierten Grubenwasseranlagen vertreten. Vor allem der Bereich des Erzgebirges (Ostdeutschland) ist aufgrund der historisch bedingten Schließungen und Flutungen alter Metallerz-Bergbaue nach 1990 mit vielen Anlagenbeispielen vertreten. Im Ruhrgebiet und in südlich gelegenen Bereichen (Westdeutschland) existieren ebenfalls vereinzelt Anlagen, wobei nach der sukzessiven Schließung des Steinkohlebergbaus und der nachfolgenden Flutung ebenso große Potentiale vorhanden sind, was an den gehäuften Studien Nr. 16–23 in Abb. 17.8 deutlich wird.

Allgemein ist davon auszugehen, dass ein weitaus größeres Potential vorhanden ist, als es die derzeitige Nutzung widerspiegelt. Diese Diskrepanz ist vor allem auf die derzeitigen Energiekosten (vgl. Abb. 17.4) zurückzuführen und könnte sich zukünftig bei sich ändernden Marktbedingungen auch positiv auf die Anlagenanzahl der geothermischen Grubenwassernutzung auswirken.

In Abb. 17.9 sind die geplanten und realisierten Grubenwasseranlagen in Nordamerika mit den zugewiesen Nummerierungen aus Tab. 17.5 und 17.6 eingetragen. Darin hebt sich vor allem der östliche Teil mit einer großen Anlagen- und Studiendichte gegenüber dem restlichen Kontinent ab.

Die erste in der Literatur u. a. von Jessop et al. (1995) auch als Pionierarbeit umfangreicher beschriebene Anlage befindet sich in Springhill, Kanada. Weiterhin konnten für Kanada vor allem wissenschaftliche Artikel recherchiert werden, welche umfangreiche Potentialstudien zu gefluteten Bergwerken und Einschätzungen zu Wärme- bzw. Kältenutzern für Kanada ausweisen. Beispielhaft seien hier Grasby et al. (2012) bzw. Watzlaf und Ackman (2006) genannt, welche über 2200 geflutete Bergwerke mit einem theoretischen Gesamtwärmepotential von 18,6 TJ betrachteten.

Das Potential erscheint somit, wegen der zahlreichen gefluteten Bergwerken, sehr groß zu sein. Für Nordamerika gelten dazu dieselben Hemmnisse wie für andere Standorte weltweit, wobei hier vor allem die z. T. geringe Besiedlungsdichte ein wesentliches Hemmnis darstellen könnte. Beim Vergleich des wichtigen Betriebskostenfaktors Strom kann für Kanada im Jahr 2014 ein gegenüber Deutschland um ca. 58 % geringerer Preis genannt werden (Statista 2016), welcher sich maßgeblich auf die Wirtschaftlichkeit einer Grubenwasseranlage mit Wärmepumpen auswirkt.

17.4.2 Ausgewählte Beispiele

Von den derzeit recherchierbaren weltweit betriebenen Anlagen zählen die Anlagen in Springhill, Nova Scotia (Kanada, Banks et al. 2004; Jessop et al. 1995), Heerlen (Niederlande, Roijen et al. 2007; Roijen 2011), Lumphinnans (Großbritanien, Banks et al. 2004; Watzlaf und Ackman 2006), Parkhill (USA, Watzlaf und Ackman 2006), Folldal und Kongsberg (Norwegen, Banks et al. 2004), Zeche Heinrich, Marienberg (Deutschland, Matthes und Schreyer 2007b, Preene und Younger 2014), zu den am umfangreichsten beschriebenen geothermischen Grubenwasseranlagen. Nachfolgend werden

mit der „Reichen Zeche“ (Freiberg) und „Ehrenfriedersdorf“ zwei Standorte in Sachsen ausführlich betrachtet.

17.4.2.1 Reiche Zeche in Freiberg

Im Freiberger Revier mit seinen Polysulfiterzen wurde in den Jahren 1168 bis 1915 vorrangig Silber, aber auch Kupfer, Blei, Arsen und später Zink und Pyrit (FeS_2) abgebaut (Tichomirowa et al. 2010). Am Standort Freiberg wurde dazu u. a. der Schacht *Reiche Zeche* bis auf 724 m (-263 m NHN) abgeteuft (Konrad et al. 2010). Zwischen 1968 und 1969 wurde der Bergbau im Freiberger Revier endgültig eingestellt und anschließend wurden die Gruben unterhalb des künstlich angelegten Entwässerungssystems mit dem Hauptentwässerungsstollen *Rothschönberger Stolln* (Bauzeit: 1844–1890, Länge des Haupttraktes: 28,9 km) mit einem Volumen von ca. 2,6 Mio. m^3 geflutet. Folgende weitere Entwässerungsstollen von unterschiedlicher Tiefe werden weiterhin zur Wasserabfuhr verwendet: Hauptstollen Umbruch (1822–1850, 3,6 km), Alter Tiefer Fürstenstollen (1384–19. Jh., 10 km), Verträglicher Gesellschafts Stolln (1801–1810, 2,3 km) (Huber 1990; Tichomirowa et al. 2010).

Der prinzipielle Aufbau des Schachtsystems Reiche Zeche ist mit den beiden Entwässerungsstollen Rothschönberger Stolln (RSS) und Hauptstollen Umbruch (HU) in Abb. 17.10 dargestellt. Aus den tieferen gefluteten Grubenbauen steigt in der Hauptschachtröhre der Reichen Zeche artesisch warmes Wasser auf und wird an einem Überlauf (RZUL) in den Rothschönberger Stolln eingeleitet.

Die durchschnittliche Wassertemperatur und -menge des Entwässerungsstollens Rothschönberger Stolln (RSS) ist in Tab. 17.7 angegeben. Das im Schacht Reiche Zeche aufsteigende Wasser zeigte nach Baacke (2000) innerhalb von 15 Jahren eine Temperaturabsenkung um ca. 5 K auf. Dies wird einerseits mit absinkenden Kaltwasserfronten (Verdrängung des warmen Wassers) und andererseits durch Erreichen eines chemischen Gleichgewichtszustandes mit Rückgang an exothermischen chemischen Reaktionen in den gefluteten tiefen Grubenabschnitten erklärt. Ein weiteres stetiges Absinken der Wasseraustrittstemperatur ist nach Modellrechnungen von Baacke (2000) nicht zu erwarten (Baacke 2000; Konrad et al. 2010).

Aktuelle Nachnutzung der Gruben am Standort Freiberg

Am Standort Reiche Zeche wurde nach der Flutung des Freiberger Reviers eine Weiternutzung als Forschungs- und Besucherbergwerk angestrebt, was aufgrund des künstlich angelegten Entwässerungssystems ohne Pumpen möglich ist. Somit sind große Bereiche geflutet, jedoch auch oberflächennähere Stollensysteme nutzbar. Daraus wurden die zwei Nachnutzungsarten umgesetzt:

- Nutzung der Grubenluft
- Nutzung des Grubenwassers (2 Anlagen).

Erstere stellt mit der Gewinnung von „Rohluft“ aus einem nicht gefluteten Bergbaustollen unter Tage für das Kreiskrankenhaus Freiberg vermutlich eine einzigartige Nutzungsvariante dar. Die gewonnene keim-, staub- und pollenfreie, feuchte Luft wird dabei zur

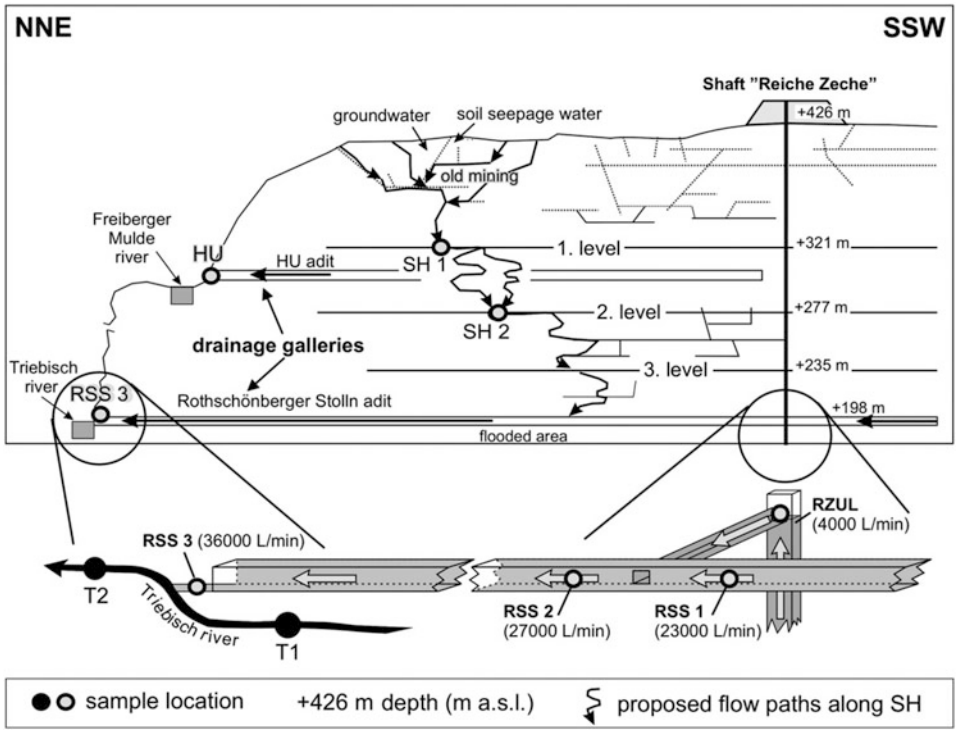


Abb. 17.10 Schematisches Profil des Freiberger Bergbaureviers mit Entnahmestellen für Wasserproben im Entwässerungsstollen (Rothschönberger Stolln, RSS), am Wasseraustritt der gefluteten Reichen Zeche (RZUL) und dem Fluss Triebisch (Zufluss zur Elbe). (Aus Tichomirowa et al. 2010, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier AG 2016. All Rights Reserved)

Tab. 17.7 Reservoirdaten des Entwässerungssystems am Standort Reiche Zeche. (Aus Huber 1990 und Konrad et al. 2010)

Ort (Abkürzung aus Abb. 17.10)	Wassermenge	Temperatur
Rotschönberger Stolln (RSS1)	> 540 m^3/h	10,2–13,7 °C
Schacht Reiche Zeche Überlauf (RZUL)	70–360 m^3/h	18,5–20 °C

Kühlung, Heizung und Befeuchtung bestimmter Hausbereiche genutzt. Dazu werden pro Stunde ca. 73.000 m^3 Frischluft aus dem Muldental durch das alte Stollensystem gedrückt, wodurch die Luft auf ihrer ca. 3 km langen Wegstrecke eine relative Luftfeuchtigkeit von 95 % bei ganzjährig nahezu konstantem Temperaturniveau von ca. 10 °C aufweist. Die Grubenluft wird anschließend beim Verbraucher auf 21 °C erwärmt (rel. Feuchte ca. 50 %) und besitzt somit sehr gute Eigenschaften für OP-Säle und Patientenzimmer (Gahlen 2009; MSG 25.05.2011).

Die deutlich bekanntere Nutzungsart stellt die geothermische Grubenwassernutzung dar, welche nachfolgend vertiefend erläutert wird.

Konzeption und Umsetzung der Grubenwasseranlage (Nr. 1b)
Bei der Planung einer solchen Geothermieanlage mit Grubenwassernutzung am Standort Reiche Zeche (Freiberg) wurden im Vorfeld folgende Nutzerbedingungen festgelegt, um Bürogebäude, Labore und eine Versuchshalle des Instituts für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen der TU Bergakademie Freiberg mit Wärme und Kälte zu versorgen (Grab et al. 2010; Konrad et al. 2010):

- Realisierung von Heizung und Kühlung,
  - z. T. zeitlich häufig wechselnden Betriebsmodi (Heizen/Kühlen),
  - Nutzung von Wasser aus dem Schacht Reiche Zeche (vorwiegend Heizfall) und aus dem Rothschönberger Stolln (vorwiegend Kühlfall),
- Nutzung eines Sekundärkreislaufes (Prozesswasser) zum Wärmetransport (siehe Abb. 17.11),
  - hierzu Hebung von Grubenwasser um ca. 12 m in einen Maschinenraum,
  - Sekundärkreislauf mit ca. 216 m Höhendifferenz,
- Erweiterbarkeit des Sekundärkreislaufes bei Bedarf (Größe der Rohrleitung (Abb. 17.12), Platzbedarf im Maschinenraum für zusätzliche Pumpen und Wärmeübertrager),

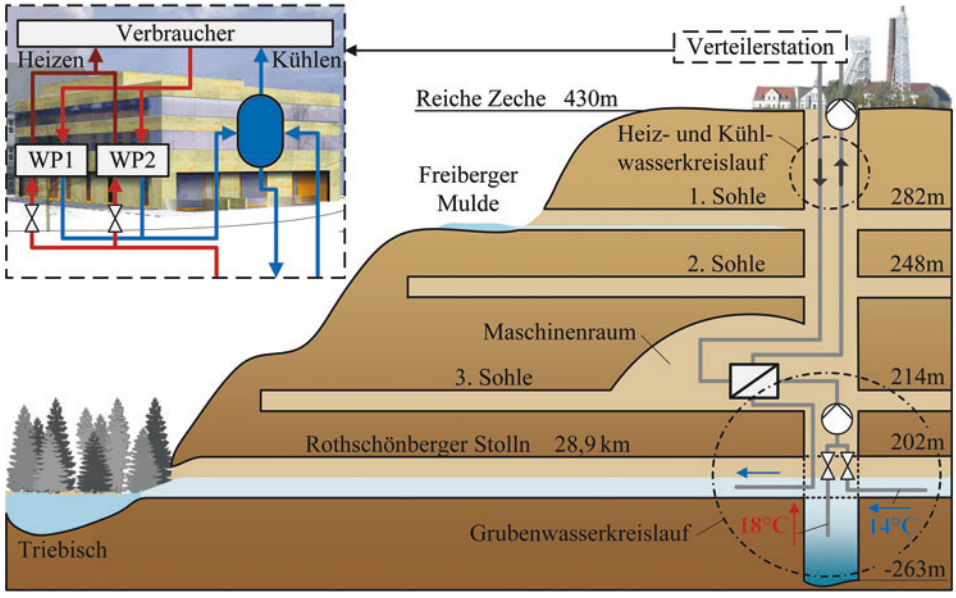


Abb. 17.11 Schematisches Profil des Reichen-Zeche-Schachtes (Freiberg) und Darstellung des geothermischen Grubenwasserkreislaufes (Anlagennr. 1b, Tab. 17.5) mit oberirdischer Verteilstation und Nutzern

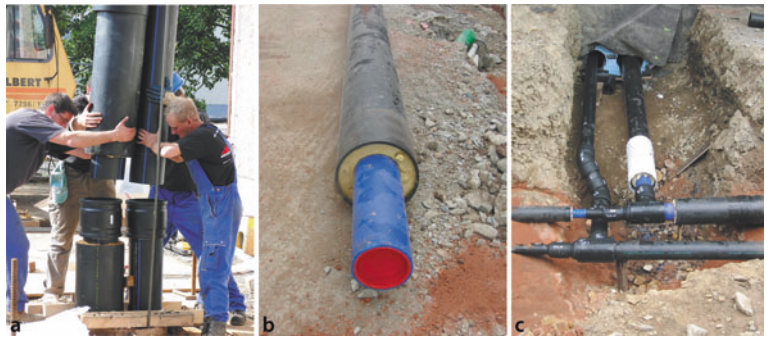


Abb. 17.12 **a** Vor- und Rücklauf des Prozesswasserkreislaufes, **b** das Vorlaufrohr ist wärmegedämmt ausgeführt, **c** Verteilung des Prozesswassers

  - 1. Ausbaustufe: ca. 200 kW Heizleistung (155 kW Kälteleistung),
  - 2. Ausbaustufe: ca. 670 kW Heizleistung (500 kW Kälteleistung) evtl. zukünftig (die zweite Ausbaustufe wurde in der Rohrdimensionierung und in den Planungen zum Platzbedarf für zusätzliche Wärmeübertrager und Pumpen unter Tage mit vorgesehen)
- oberirdische Installation von mehreren „blinden“ Verteilern für zukünftige Abnehmer am Standort Reiche Zeche.

Zur Verminderung von Anlagenausfällen und Zerstörungen wurden folgende Maßnahmen geplant und umgesetzt:

- weitestgehend geschlossener Kreislauf des Grubenwassers (Ausschluss von zusätzlichen Sauerstoffzutritten → Vorbeugung gegen Ausfällungen und Verockerung);
- Fließgeschwindigkeit > 1 m/s, um Ablagerungen im System zu vermeiden;
- sofern möglich werden Anlagenstillstände vermieden;
- Wahl entsprechender Werkstoffe (Titan-Wärmeübertrager, Edelstahl und PE-Rohre (Grubenwasserkreislauf);
- Einbau eines auswechselbaren Filters vor den Wärmeübertragern;
- Druck- und Temperaturmesstechnik zur Überwachung des Anlagenbetriebes;
- regelmäßiger Betrieb von Klappen, Ventilen und Pumpen zur Vermeidung von Ablagerungen;
- Einplanung regelmäßiger Reinigungen der unter Tage installierten Wärmeübertrager (1/2- bis 1-jährliches Intervall);
- Notabschaltung (stromlos) der gesamten unterirdischen Anlage bei zu hohen Wasserständen.

Hydrochemische Zusammensetzung des Wassers

In Abb. 17.13 sind ausgewählte Messwerte aus der Literatur von drei Messstellen in der Reichen Zeche in Freiberg vor dem Bau einer Anlage zur geothermischen

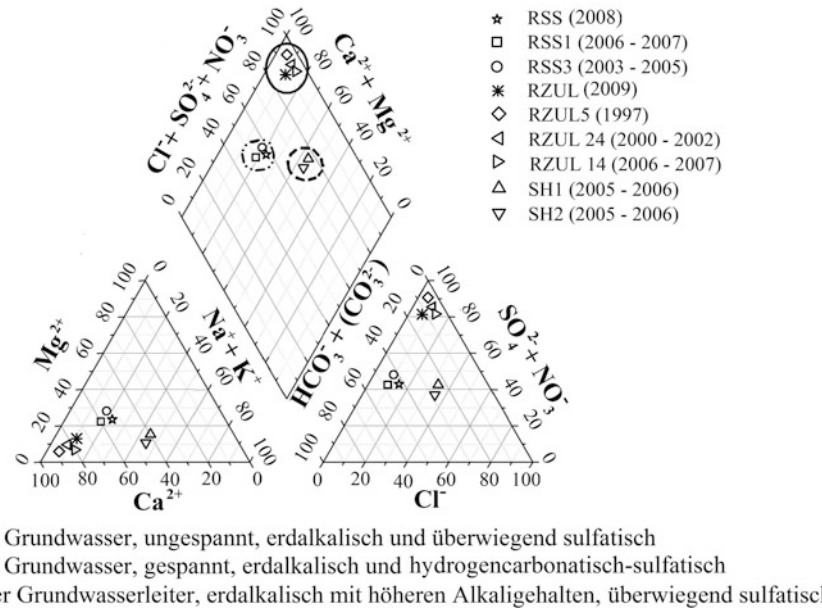


Abb. 17.13 Piper-Diagramm zu chemischen Analysen von Wasserproben aus dem Freiberger Revier mit RSS Rothschönberger Stolln, RZUL – aus Schachtröhre Reiche Zeche aufsteigende Wässer als Überlauf in RSS, SH – in Bergwerk einsickernde Grubenwässer, Daten von 2008–2009. (Aus Konrad et al. 2010, 2000–2007 aus Tichomirowa et al. 2010)

Grubenwassernutzung eingetragen. Zusätzlich ist eine mögliche Einordnung analog zu Tiefenwässern nach Löffler (2011) dargestellt. Es ist dabei deutlich die variierende Mineralisation zwischen den Wässern eines Reviers mit unterschiedlichem Herkunfts- und Probenort erkennbar. Konrad et al. (2010) weisen z. B. für die aus der Schachtröhre aufsteigenden Wässer am Überlauf zum Rothschönberger Stolln ein chemisches Ungleichgewicht, aufgrund des schnellen Wasseraufstieges und Wasserzutritten, aus. Wiederum befindet sich das Grubenwasser aus dem Rothschönberger Stolln vor der Einleitung nahezu im chemischen Gleichgewicht.

Konrad et al. (2010) haben hydrochemische Modellierungen mit dem Programm PhreeqC zur Vorhersage der Änderung des chemischen Gleichgewichts in Abhängigkeit der Temperatur durchgeführt. Sie geben an, dass selbst ohne Temperaturabsenkung bei den im chemischen Ungleichgewicht befindlichen, fließenden Wässern (RZUL) mit Ausfällungen von α-$Al(OH)_3$, Quarz, $ZnSiO_3$, Calcit (bei Luftkontakt) zu rechnen ist. Mit einer Absenkung bzw. Erhöhung der Temperatur bleiben jedoch die Gesamtmengen an Ausfällungen (Präzipitatmengen) nahezu konstant. Im Rothschönberger Stolln ist mit leichten Ausfällungen von $Fe(OH)_3$ zu rechnen.

Durch entsprechende Vorkehrungen (erhöhte Strömungsgeschwindigkeit >1 m/s, kaum Stillstandszeiten, geschlossener Kreislauf unter Luftabschluss, Materialauswahl,

regelmäßige Reinigungen) sind verschmutzungsbedingte Anlagenstörungen vermeidbar, vgl. dazu nachfolgenden Abschnitt zum Probebetrieb (Konrad et al. 2010).

Ausgewählte Ergebnisse des Anlagenbetriebes

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und Testphase der Forschungsanlage erfolgte eine Evaluierung des Anlagenbetriebes für den Sommer- und Winterbetrieb. Bereits beim Bau der Anlage wurde auf ein sehr umfangreiches Monitoringsystem geachtet, weshalb eine Evaluierung überhaupt erst ermöglicht wird. Mithilfe der installierten Messtechnik können sowohl die Grubenwasserseite als auch die Prozesswasserseite intensiv betrachtet werden. Die Evaluierung des Anlagenbetriebs ermöglicht nach der Inbetriebnahme die Erkennung und Abstellung von möglichen Problemen sowie eine Optimierung der Anlagenfahrweise. Für die untersuchte Anlage werden für jeden Kreislauf die Volumen- sowie die Wärmeströme an verschiedenen Stellen ermittelt, wodurch Verluste an das umgebende Erdreich, Wärmeübertragerwirkungsgrade sowie die Funktionsweise u. a. der Pumpen untersucht werden können. Neben der Wärmebilanzierung wird auch die Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher wie Gruben- und Prozesswasserpumpen sowie der Wärmepumpen erfasst und ausgewertet. Durch ständige Änderungen der Wärme-/Kälteanforderungen in Kombination mit einem instationären Systemverhalten tritt eine hohe Volatilität der Einzelmesswerte auf, welche aufgrund der hohen Messwerterfassungsfrequenz (alle 5 min) erfasst werden können. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit und Dämpfung dieser Schwankungen sind in den nachfolgenden Diagrammen gleitende Mittelwerte dargestellt. Abb. 17.14 zeigt die ermittelten Wärme- und Kälteleistungen, welche von der Grubenwasseranlage zur Verfügung gestellt wurden.

Bei Betrachtung der benötigten Kälteleistung im Sommer fällt die starke Korrelation mit der Außentemperatur auf. Der Wärmebedarf im Sommer beschränkt sich dagegen nur

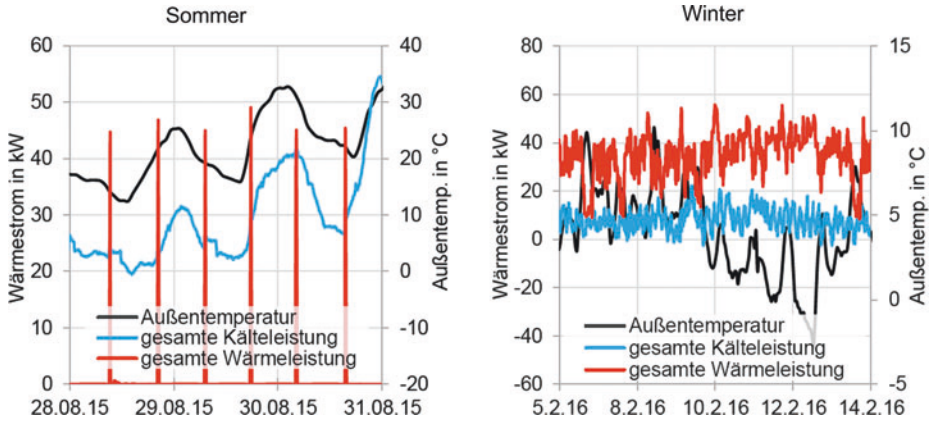


Abb. 17.14 Verlauf der Außentemperatur sowie der Wärme- und Kälteleistung im untersuchten Sommer- und Winterzeitraum

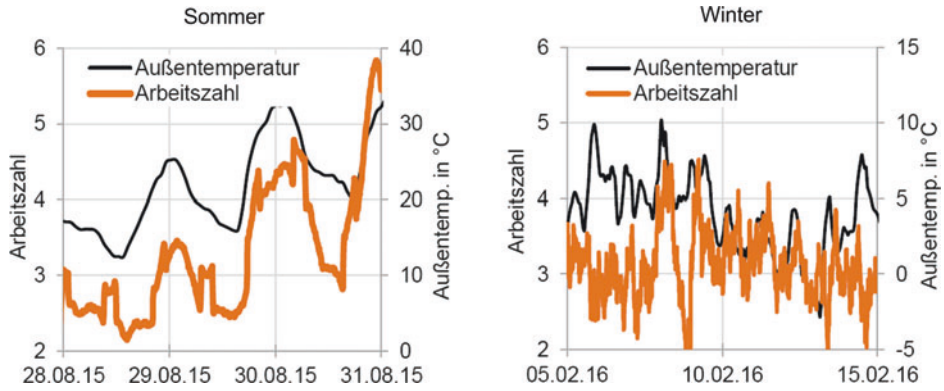


Abb. 17.15 Arbeitszahl der gesamten Anlage für einen repräsentativen Untersuchungszeitraum im Sommer und im Winter

auf die Bereitung des Warmwassers. Die Kühlung wird mit steigendem Kältebedarf immer effizienter, was sich auch in der sehr stark ansteigenden Arbeitszahl in Abb. 17.15 widerspiegelt.

Bei der energetischen Betrachtung konnte über einen ersten Auswertezeitraum für den Sommer 2015 eine gute Arbeitszahl (= Elektroenergieaufwand/Gesamtnutzen) von 3,24 (Abb. 17.15) und im Winter 2015/2016 von 3,10 ermittelt werden. Beide Werte berücksichtigen, dass sowohl im Sommer als auch im Winter ein Heiz- und Kühlbedarf besteht. Weiterhin sind in dieser Betrachtung alle elektrischen Verbraucher (außer Messtechnik) mit berücksichtigt, was bei sonst üblichen Evaluierungen meist nicht gegeben ist.

Aufgrund einer defekten Regelklappe sowie einzeln aufgedeckter erhöhter Energieverbräuche infolge der bisherigen Anlagenregelung besteht in der Betriebsweise noch ein wesentliches Potential zur weiteren Steigerung der Arbeitszahl.

Betriebserfahrungen und Schlussfolgerungen

In den ersten Jahren mit realem Probebetrieb wurden verschiedene Erkenntnisse, wie z. B. zur Verschmutzung einzelner Anlagenteile, Messdatenauswertung bei komplizierter Anlagensteuerung, Sicherungsmaßnahmen bei Sonderereignissen (Hochwasser im Schachtsystem) gewonnen und Anpassungsmaßnahmen ab- und eingeleitet. Ein zuvor nicht erwartetes Problem zeigte sich in einer schlechten Datenverfügbarkeit (∼70 %, 2015) für eine automatisierte Anlagenüberwachung und ein energetisches Monitoring vor allem von obertägigen Messgeräten (Wärmemengenzähler, Elektroenergiezähler), welche in kurzen Zeitintervallen über M-BUS abgefragt wurden.

Folgende wesentlichen Erkenntnisse können bisher gefolgert werden:

- Ein in der Rohrleitung (Grubenwasserkreislauf) eingebauter Filter zeigte seine Wirksamkeit, wobei mithilfe einer installierten Differenzdruckmessung eine Vorhersage

zum Reinigungsintervall und zum Wechsel desselben aus Betriebserfahrungen ableitbar ist.

- Die Wärmeübertragerplatten verschmutzen mit zunehmender Betriebsdauer auf der Grubenwasserseite, wobei die Ablagerungen jedoch gering und leicht zu entfernen sind, Abb. 17.16.
- Einige Messfühler wie z. B. pH-Wert-Sensoren weisen aufgrund der z. T. aggressiven Wässer eine erhöhte Ausfallquote auf, was bei einer Kostenplanung zu berücksichtigen ist.
- Unterirdisch angebrachte Schaltschränke sollten in einem flutungssicheren Raum installiert werden, um vor eventuellen Hochwasserereignissen geschützt zu sein.
- Klappen, Ventile und Pumpen müssen in regelmäßigen Abständen automatisiert bewegt/betrieben werden, um ein Ausfall durch Ablagerungen zu vermeiden.
- Der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung im Wärmeübertrager (Grubenwasser/Sekundärkreislauf) sollte stetig überwacht werden, um Reinigungen rechtzeitig vornehmen zu können.
- Eine kontinuierliche Messwerterfassung und die dauerhafte Aufzeichnung in einer Datenbank sind wichtig, um sowohl automatisiert den Anlagenzustand zu überwachen als auch bei einer möglichen Fehlersuche manuell Daten verfügbar zu haben.
- Die Datenaufzeichnung sollte gleichzeitig zur außenwirksamen Darstellung verwendet werden.
- Das Messwerterfassungssystem mit dem verwendeten Übertragungsprotokoll ist sorgfältig auszuwählen, um eine hohe Datenverfügbarkeit zu gewährleisten.

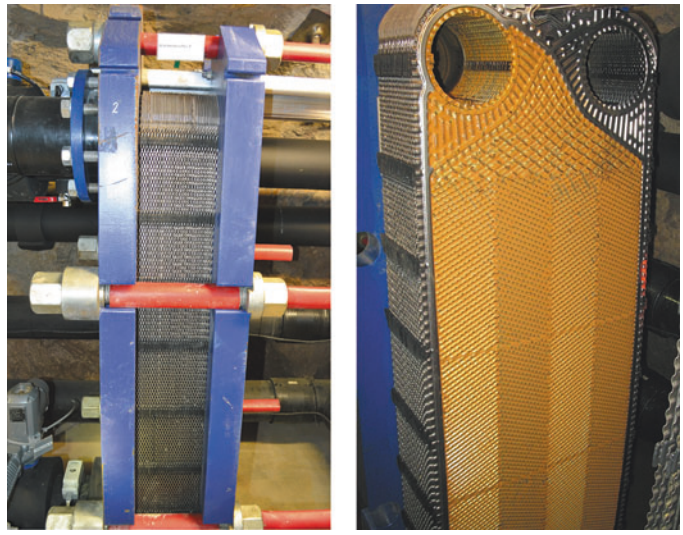


Abb. 17.16 Zusammengebauter Titanplatten-Wärmeübertrager der Grubenwasseranlage Reiche Zeche (links), Ablagerungen auf einer Wärmeübertragerplatte auf der Grubenwasserseite (rechts)

Aufgrund der angewandten Schutzmaßnahmen vor übermäßigen Ablagerungen werden u. a. die ungeregelten Grubenwasserpumpen dauerhaft betrieben, auch wenn keine Wärme- oder Kälteanforderung vorliegt. Dies mindert die energetische Effizienz ungemein.

Die Anlage zur geothermischen Grubenwassernutzung stellt insgesamt eine moderne, voll funktionsfähige Einrichtung mit maximierten Anlagenbetriebsstunden (bis auf Stillstände im Grubenwasserkreislauf bei Wartungsarbeiten) dar.

17.4.2.2 Ehrenfriedersdorf (Sachsen)

In Ehrenfriedersdorf in Sachsen wurde seit dem 13 Jhd. bis 1990 Zinnerz gewonnen. Bereits 1992 wurde im Zinnbergwerk (Zinnerz GmbH) eine Wärmepumpe mit 16 kW zur Versorgung eines Betriebsgebäudes installiert (später wieder stillgelegt) (Rottluff 1993). Von Juli 1993 bis Feb. 1994 wurden die Zinnerzgruben geflutet. Die Gebirgstemperatur liegt zwischen 11 und 14 °C und die nach der Flutung ermittelten Wassertemperaturen liegen zwischen 10 und 12 °C (Rottluff et al. 1994).

Konzeption und Umsetzung der Grubenwasseranlagen (Nr. 4a, 4b)

Insgesamt gibt es derzeit zwei separat betriebene geothermische Anlagen zur Grubenwassernutzung in Ehrenfriedersdorf, welche als Vorreiter für die energetische Nachnutzung von gefluteten Grubenbauen im Erzgebirge gelten, siehe Anlagenschema in Abb. 17.17.

Anlage zur Beheizung einer Mittelschule (4a) Bei der Planung zur Beheizung einer Mittelschule wurde die Grubenwassernutzung in Betracht gezogen. Dazu wurden bereits

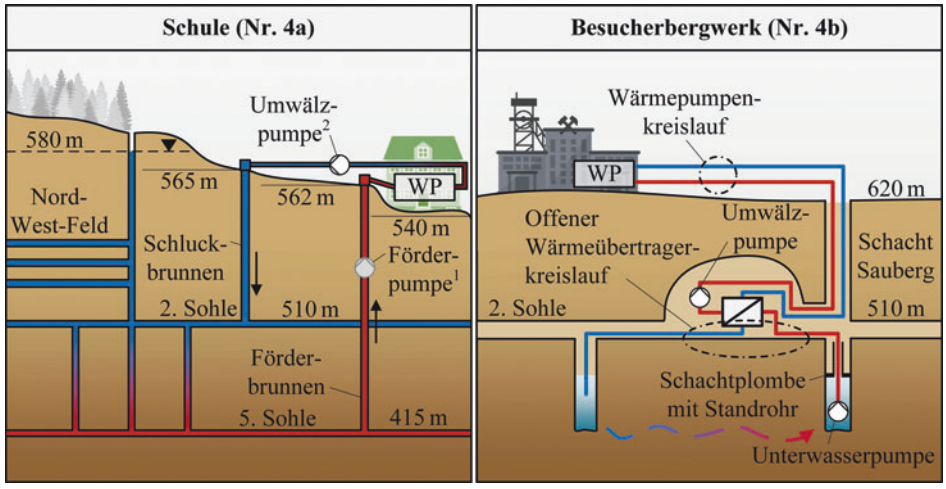


Abb. 17.17 Schematische Bergwerksprofile und Aufbau von zwei separaten Grubenwasseranlagen in den gefluteten Guben in Ehrenfriedersdorf (Sachsen), links: Anlage 4a, mit Umbauten wie in Tab. 17.8 nach Müller und Rottluff (2005): [1]ursprünglicher Aufbau, [2]2011 Entfernung des Förderstranges; rechts: Anlage 4b mit untertägigem Grubenwasserkreislauf; Anlagennummern wie in Tab. 17.5

bei der Verwahrung des Bergwerkes vor der Flutung perspektivisch zwei Richtbohrungen (Förderbohrung = 143 m, Schluckbohrung = 53 m) für eine spätere Grubenwassernutzung abgeteuft. Nach erfolgter Flutung im Februar wurde im April 1994 die erste Stufe der geothermischen Grubenwassernutzung mit Beheizung der Mittelschule aus dem „Nordwestfeld“ als offenes System mit Grubenwasserförderung bis über Tage (Höhendifferenz ca. 47 m) mittels einer Unterwasserpumpe aufgenommen, vgl. Abb. 17.17 links. Dabei war der Höchststand des Flutungswasserspiegels noch nicht erreicht. Eine Erweiterung der installierten Anlage (bis 70 m^3/h) um zusätzliche Abnehmer wie z. B. einen Kindergarten, ein Jugendzentrum sowie ein Altersheim sollten als zukünftige Ausbaustufen folgen, wurden jedoch außer dem Anschluss eines Turnhallenneubaus und der Grundschule bisher (Stand Mitte 2016) nicht realisiert.

Der Grubenwasserkreislauf wurde aus innenseitig kunststoffbeschichteten Stahlrohren für die Steigleitung (Förderbohrung) und einer Stahl-Versturzleitung (Schluckbohrung), im obertägigen Teil aus erdverlegten HDPE-Rohren mit entsprechenden Stahl-Absperrvorrichtungen sowie einer Doppelpumpe (Wilo DPn 50/200-1) und Anschlussleitungen aus Stahl zu einem direkt im Wärmepumpenkreislauf integrierten gelöteten Wärmeübertrager aufgebaut. Es waren wenige Messstellen während der Inbetriebnahme sowie einzelne dauerhafte im Wärmepumpenkreislauf verbaut, welche sich jedoch als zahlenmäßig zu gering herausstellen sollten.

Bei der Inbetriebnahme wurde der maximale Durchfluss an Grubenwasser über einen Schieber auf ca. 9,5 m^3/h gedrosselt. Die Heizzentrale der Schule bestand neben der Wärmepumpe (Sulzer Escher Wyss, $Q_{Heiz} \sim 95$ kW) weiterhin aus einem Gas-BHKW (ca. 65 kW) und einem Gas-Spitzenlastkessel (ca. 155 kW). Das Gas-BHKW lieferte hierbei den Strom für die Grubenwasseranlage, was sich zukünftig negativ auf die Betriebsstunden der geothermischen Grubenwasseranlage auswirken sollte (Müller und Rottluff 2005; Rottluff 2012).

Anlage zur Beheizung eines Besucherbergwerkes (4b) Eine weitere Wärmepumpenanlage, die die Wärmequelle Grubenwasser nutzt, wurde mit der Gründung eines Besucherbergwerkes (1995) in Ehrenfriedersdorf geschaffen, wobei dieses mitsamt seinen Betriebsgebäuden (Mineralogisches Museum und die Bergschmiede) seit 1998 unter Nutzung von 10 °C konstant warmen Grubenwasser mittels einer mehrstufigen, elektrisch betriebenen Wärmepumpe (Q_{Heiz} = 120 kW) beheizt und mit Warmwasser versorgt wird.

Diese realisierte Anlage zur Beheizung der Besucherbergwerksgebäude wurde von vornherein mit zwei Kreisläufen (Grubenwasser-, Prozesswasserkreislauf) geplant und realisiert, siehe Abb. 17.17 rechts. Es handelt sich hierbei um einen offenen Grubenwasserkreislauf unter Tage, wobei die verschraubten Plattenwärmeübertrager für den Sekundärkreislauf in 110 m Tiefe, die Umwälzpumpen aber über Tage installiert sind. Mit dem geschlossenen Prozesswasserkreislauf (Sekundärkreislauf) über zwei Schachtrohrleitungen muss, im Vergleich zu einem offenen System bis über Tage, nur ein Bruchteil der Elektroenergie zum Pumpenantrieb bereitgestellt werden. Ein weiterer positiver Effekt dabei ist, dass die mit Grubenwasser durchströmten Bauteile minimiert werden und

folglich die Wartung und mögliche notwendige Reinigung auf wenige Anlagenteile (z. B. Wärmeübertrager) begrenzt ist. Eine solche Technologie ist nur dann anwendbar, wenn der untertägige Bereich jederzeit zugänglich ist. Im vorliegenden Fall ist dies durch die Nutzung als Besucherbergwerk gewährleistet.

Der Wärmebedarf der angeschlossenen Bergwerksgebäude beträgt ca. 120 kW (Heizsystem mit Niedertemperaturheizkörpern, teilweise Fußbodenheizung), wofür max. 22 m^3/h Grubenwasser im Grubenwasserkreislauf gepumpt werden müssen. Hierzu wird das Grubenwasser (Sauberger Hauptschacht) über eine von zwei Unterwasserpumpen unterschiedlicher Baugröße zum Wärmeübertrager gepumpt, darin bis auf 4 °C abgekühlt und über PE-Leitungen entfernt von der Entnahmestelle zurück in die gefluteten Solen gespeist. Das an den Wärmepumpen nutzbare Temperaturniveau beträgt zwischen 7 und 9 °C. Die mehrstufige Wärmepumpe wird jeweils gesondert über einzelne Umwälzpumpen entsprechend des Wärmebedarfs versorgt und betrieben (Bussmann 15.04.1998; Rottluff 1998).

Auch in dieser Anlage wurde aufgrund von Einsparungen nur wenig Messtechnik installiert und folglich auch hier keine langfristige Messwerterfassung realisiert. Einzig in den Anfängen wurde durch einen Verein ehrenamtlich eine Messwerterfassung durchgeführt. Die Wärmepumpeneinheit über Tage wird dauerhaft überwacht, um evtl. Änderungen im Betrieb zu erkennen (Rottluff 1998).

Betriebserfahrungen

Anlage zur Beheizung einer Mittelschule (4a) Die Grubenwasseranlage zur Beheizung der Mittelschule wies über große Betriebszeiträume einen zuverlässigen Betrieb auf, vgl. Tab. 17.8. Dennoch kam es aufgrund des ursprünglich umgesetzten 1-Kreislauf-Systems nach 7 Jahren zu stärkeren Verschmutzungen u. a. im Wärmepumpen-Wärmeübertrager und folglich zu Anlagenstörungen.

Die Problematik der Verschmutzung von Anlagenteilen wurde zusätzlich durch eine ungünstige Zusammenstellung der Heizzentrale aus bestehenden (Gas-Spitzenlastkessel) und neuen Heiztechniken (Gas-BHKW mit stromseitig gekoppelter Grubenwasseranlage) unterstützt. Bis zu einem grundlegenden Umbau der Heizungszentrale, aufgrund eines Defektes des BHKWs (vgl. Tab. 17.8), wurde die Grubenwasseranlage folglich nur betrieben, wenn das BHKW in Betrieb war und dieses die Grundlast an Wärme nicht allein bereitstellen konnte (ab Außentemperaturen ca. ≤ 6 °C). Daraus resultierten lange Stillstandszeiten für die Grubenwasseranlage, was einerseits bei mineralisierten Wässern aufgrund von dabei auftretenden Absetzungen und Ausfällungen generell als ungünstig einzustufen ist. Andererseits sollten solche Anlagen mit Nutzung erneuerbarer Energiequellen stets im Hinblick auf eine Maximierung der Laufzeiten geplant und betrieben werden.

Aus den aufgetretenen Anlagenstörung und erfolgter Ursachenforschung (vgl. Tab. 17.8) wurden folgende Verbesserungsvorschläge von Müller und Rottluff (2001, 2005) abgeleitet:

Tab. 17.8 Zusammenstellung der Betriebszeiträume und dokumentierten Vorkommnisse des Betreibers, dem Verein Energiemodell Sachsen e. V. (Nach Müller und Rottluff (2001, 2005), Rottluff (2012), Weller et al. (2008))

Betrieb	Vorkommnis	Annahmen	Reaktion des Betreibers bzw. der Firmen
1994–1998	Zuverlässiger Grundlastbetrieb Langsam absinkender Durchfluss	Verschmutzung von Anlagenteilen (Filtereinsatz – Pumpe, Wärmeübertrager)	Rücknahme der Drosselung im Grubenwasserkreislauf Ende 1998 Bericht über sinkenden Durchfluss Sichtprüfung + Druckwasserspülung des Wärmeübertragers (erfolglos)
1998–Anfang 2000	Unterschreitung min. Wasser-volumenstrom	Untertägiger Teil verschlossen (konnte ausgeschlossen werden) Ablagerungen im System (vermutlich Eisenhydroxid, etwas Karbonat)	Automatische Abschaltung der Wärmepumpe Vergleich Durchfluss mit Pumpenkennlinie → erhöhter Druckverlust aufseiten des Wärmeübertragers 2 chemische Spülungen → Durchflusserhöhung*
Vorschläge: 1.) Erneuerung Wärmeübertrager und Änderung der Stahl- in PE-Leitungen, 2.) Anlagenumbau (geschlossener WP-Kreislauf: Erneuerung integrierter Wärmeübertrager, getrennter Grubenwasserkreislauf mit verschraubtem Plattenwärmeübertrager inkl. Anschlüssen zur Reinigung			
Bis 03.2005	Unterschreitung min. Wasservolumenstrom, Ausfall der Wärmepumpe	Unterwasserpumpe und Wasserzähler defekt Verschmutzungen im System	Durchflussmessungen weisen erhöhten Druckverlust auf Wärmepumenseite auf Rohrprobe (Ablagerungen, s. Abb. 17.18a)
Vorschlag: Anlagenumbau: geschlossener WP-Kreislauf mit Erneuerung integrierten Wärmeübertragers, getrennter Grubenwasserkreislauf mit verschraubtem Plattenwärmeübertrager inkl. Anschlüssen zur Reinigung, Ausbau Unterwasserpumpe, Ringsaugventil, Steig- und Versturzleitung			
Bis 2007	Zuverlässiger Betrieb		
2007	Defekt des BHKW (Stromversorger für Wärmepumpe Grubenwasser) Umbau Heizungs- und Gruben-wasseranlage	Verschleiß BHKW Stetige Verschmutzung von Anlagenteilen	Reparatur des BHKW Umbau der Anbindung der Wärmepumpe an Stromnetz Grubenwasseranlage wird in 2 Kreisläufe aufgeteilt (obertägiger verschraubter Plattenwärmeübertrager)
2007–08.2011	Zuverlässiger Betrieb		
08.2011–11.2011	Bohrungssanierung und Umbau an Grubenwasseranlage		Kurzzeitige Wasserabsenkung zum Ausbau: Unterwasserpumpe, Ringsaugventil, Steig- und Versturzleitung
2011 bis heute	Zuverlässiger Betrieb		

* von 9,4 auf 10,2 m^3/h, jedoch zeitnahe Sättigung des Spülmittels, chemische Reinigung nur bedingt erfolgreich

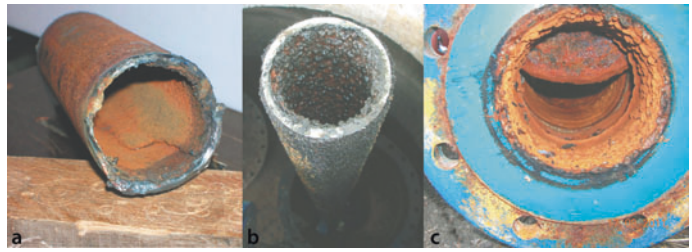


Abb. 17.18 Ausgebaute Anlagenteile mit markanten Ablagerungen: **a** oberirdisch installiertes Stahlrohrstück zum Wärmepumpen-Wärmeübertrager 2005 nach ca. 11 Jahren Betriebszeit (Müller und Rottluff 2005), **b** und **c** bei Sanierung der Bohrung entfernte Versturzleitung und Schieber 2011 nach ca. 18 Jahren Betriebszeit und Sauerstoffkontakt beim Ausbau. (Rottluff 2012)

- An den höchsten Punkten eines Rohrleitungssystems mit Förder- und Schluckbohrung sind geeignete und ausreichend dimensionierte Entlüfter und Manometer anzubringen.
- Es sind vor und nach kritischen Anlagenteilen (Pumpen, Schiebern, Wärmeübertragern etc.) ausreichende Messanschlussstutzen, z. T. mit dauerhaft installierten Messgeräten (z. B. Differenzdruckmesser), vorzusehen.
- Bei Inbetriebnahme sind die Druckverluste der Neuanlage als Vergleichswerte aufzuzeichnen,
- Eine kontinuierliche Anlagenüberwachung und Datenaufzeichnung (Monitoring) ermöglicht hilfreiche Rückschlüsse und Vorplanungen von anlagenspezifischen Reinigungs- und Wartungsintervallen (hier 1-mal jährlich).
- Eine Ausführung der geothermischen Grubenwasseranlage als 2-Kreislauf-System mit „kurzen“ Längen des Grubenwasserkreislaufes erscheint hinsichtlich der Vermeidung von übermäßigen Verschmutzungen als sinnvoll.

Bei den Wartungen bzw. Umbaumaßnahmen konnten durch Müller und Rottluff (2005), Rottluff (2012) folgende Verschmutzungen differenziert nach eingesetztem Material und Installationsort (vgl. Abb. 17.18) festgestellt werden:

- An den Innenseiten der Metallbauteile traten Ablagerungen als Folge der Mineralisation des Grubenwassers auf, wobei Ablagerungen im Verdampfer der Wärmepumpe zur Anlagenstörung führten.
- Oberflächenbehandelte Innenflächen (kunststoffbeschichtet) der Stahlrohr-Steigleitung (Förderbohrung) wiesen nach ca. 18 Jahren Betriebszeit lediglich eine dünne, ockerfarbige, schlammartige Schicht auf, die sich im feuchten Zustand leicht mechanisch entfernen ließ (abwischen).
- Nicht oberflächenbehandelte Stahlrohre der Schluckbohrung (Versturzleitung) sowie Absperrschieber und Bohrungsverrohrung wiesen tiefschwarze Ablagerungen unterschiedlicher Mächtigkeit (Innen/Außen) auf. Bei nicht durchströmten Teilen (z. B.

Rohraußenseiten) wurde eine ca. 1–2 mm starke Ablagerung, bei durchströmten Bauteilen eine ca. 5–7 mm dicke Ablagerung detektierbar, die sich nach Luftkontakt (Sauerstoff) innerhalb weniger Stunden rostbraun verfärbte. Diese Ablagerungen waren mechanisch nur schwer zu entfernen.
- Korrosion am Stahl war dagegen kaum festzustellen, das Material der Versturzleitung war kaum korrodiert.

Anlage zur Beheizung eines Bergbaumuseums (4b) Vom Anlagenbetreiber wurden keine nennenswerten Fehlfunktionen der Grubenwasseranlage mitgeteilt. Es wird jedoch die jährliche z. T. aufwendige Reinigung der geschraubten Plattenwärmeübertrager unter Tage als Aufwand und folglich als Belastung empfunden, weshalb alternative Reinigungsmöglichkeiten (u. a. Druckluftspülung) getestet wurden.

Weiterhin wurde eine mögliche Installation eines Monitoringsystems unter Tage aufgrund der Höhendifferenz und Entfernung zum Museum als erhöhter Zeit- und Kostenaufwand angesehen, weshalb ein solches bisher nicht installiert wurde.

Aufgrund der aktuellen extrem niedrigen Energiepreise für Gas (3–5 ct/kWh, Jahr 2016) ist für den Anlagenbetreiber der Strompreis (>20 ct/kWh, Jahr 2016) für die Wärmepumpe inkl. Peripherie selbst bei hoher Anlageneffizienz derzeit höher, weshalb die Nutzung einer erneuerbaren Energie als alleinige Argumentation von Betreiberseite kritisch hinterfragt wird.

17.5 Fazit

Aufgrund der stetig wachsenden Zahl an stillgelegten und gefluteten Bergwerken steigt auch das Potential zur geothermischen Nachnutzung der Grubenwässer zum Heizen (mittels Wärmepumpen) und Kühlen. Hierzu sind in diesem Beitrag die möglichen Varianten zur Umsetzung detailliert aufgeführt.

Wesentliche Vorteile (u. a. Kosten) zeigten sich bei der Berücksichtigung einer geothermischen Nachnutzung vor der jeweiligen Bergwerksflutung durch Planungsarbeiten, der Erschließung bzw. der Sicherung von Abschnitten und dem Einbau notwendiger Leitungen. Wie allgemein üblich, ist auch bei Grubenwasseranlagen in der Planungsphase eine Erstellung einer Machbarkeitsstudie unter entsprechender Betrachtung und Berücksichtigung folgender Aspekte notwendig:

- oberirdische standortnahe Abnehmerstruktur mit Energiebedarfsermittlung,
- am Standort nutzbare Wärme-/Kälteverteilnetze,
- Reservoirtemperatur und Ergiebigkeit,
- geotechnische Voruntersuchungen,
- Wasserchemismus und dessen Einfluss auf Anlagenteile und möglichen Verschmutzungsgrad,

- evtl. thermische Auswirkungen auf das Reservoir,
- Investitionskosten und evtl. länderspezifische Förderungen.

Trotz der sehr hohen Anzahl an möglichen Standorten zur geothermischen Grubenwassernutzung konnten bisher weltweit nur 35 in Betrieb befindliche Anlagen recherchiert werden, wofür häufig die erhöhten Kosten zur Anlageninstallation (z. B. bergtechnische Kosten, Vorbeugung von Korrosionen) und die derzeit niedrigen Kosten von konkurrierenden fossilen Energieträgern benannt werden.

Als weitere wesentliche Punkte können sicherlich das z. T. geringe technische Interesse von Installateuren und Wärmeversorgern, die ungenügende Öffentlichkeitsarbeit und Datenlage zu Funktionsbeispielen von geothermischen Grubenwasseranlagen und die teilweise rechtlich unklare Situation zur Nachnutzung alter Grubenbaue angeführt werden.

Anlagenspezifisch erscheint ein geschlossenes System mit untertägigem Primär- und Sekundärkreislauf (bis über Tage) die technisch günstigste und eine sehr häufig umgesetzte Variante zu sein. Als wesentlicher Vorteil kann hierbei die Minimierung der Anlagenteile, welche mit dem Grubenwasser direkten Kontakt haben, angeführt werden. Dies ist allerdings meist nur dann anwendbar, wenn der untertägige Bereich jederzeit z. B. über ein Besucherbergwerk o. ä. zugänglich ist. Allgemein ist für solche Anlagen ein angepasstes Anlagenmonitoring zu empfehlen, einerseits um den Istzustand einschätzen und mögliche Probleme erkennen zu können. Andererseits wird dadurch eine öffentlichkeitswirksame Darstellung zum Abbau von Vorurteilen und zum Nachweis der Anlageneffizienz erst ermöglicht.

Die Anzahl von insgesamt zwei in der Umsetzung befindlichen Anlagen und 33 recherchierten z. T. wissenschaftlichen Studien zur geothermischen Grubenwassernutzung weltweit weisen einen möglichen potentiellen Anstieg einer Nutzung der Ressource Grubenwasser aus. Die Umsetzungen sind dabei u. a. von der zukünftigen Entwicklung konkurrierender Energiepreise, der Erstellung langfristiger und konkurrenzfähiger Energieliefermodelle sowie einer kombinierten Nutzung der Potentiale zur Heizung und Kühlung abhängig. Wesentlichen Einfluss können ebenso gesetzliche Vorgaben im Rahmen von z. B. Energieeffizienzmaßnahmen und eventuelle finanzielle Anreize durch Fördermaßnahmen haben.

Literatur

Anselmi, E.: Con geothermal not feasible, says city. Officials concede controversial energy source is less than thought. In: Northern News Services, 11.11. http://www.nnsl.com/frames/newspapers/2014-11/nov12_14geo.html, (2014). Zugegriffen: Dez. 2015

Arkay, K.: 1st Springhill Geothermal Energy Conference, Springhill, Nova Scotia. Geological Survey of Canada (1993)

Athresh, A. P., Al-Habaibeh, A., Parker, K.: Innovative approach for heating of buildings using water from a flooded coal mine through an open loop based single shaft GSHP system. Energy Procedia. **75**, 1221–1228 (2015)

Baacke, D.: Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube „Himmelfahrt“ in Freiberg/Sachsen. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg (2000)

Bailey, M., Moorhouse, A., Watson, I. (Hrsg.): Heat extraction from hypersaline mine water at the dawdon mine water treatment site. Conference: Mine Closure, At Cornwall, UK. https://www.researchgate.net/publication/281033759_Heat_Extraction_from_Hypersaline_Mine_Water_at_the_Dawdon_Mine_Water_Treatment_Site (2013). Zugegriffen: 17. Nov. 2017

Balkenhol, R. K.: Experimentelle Untersuchungen und Modellierungen von Folgereaktionen der Pyritverwitterung in Braunkohletagebau-Haldensedimenten. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultäten (2000)

Banks, D.: An Introduction to Thermogeology. Ground source heating and cooling, 2. Aufl. John Wiley and Sons Ltd, Chicester (2012)

Banks, D., Pumar, A. F., Watson, I.: Existing Open Loop Minewater-Sourced Heat Pump Schemes in Scotland: Factors for Success and Failure. HolyMoor, 08.10.2008

Banks, D., Pumar, A. F., Watson, I.: The operational performance of Scottish minewater-based ground source heat pump systems. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. **42**(3), 347–357 (2009). http://doi.org/10.1144/1470-9236/08-081

Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., Jessop, C.: Mine water as a resource: Space heating and cooling via use of heat pumps. Land. Contam. Reclamat. **11**(2), 191–198 (2003). http://doi.org/10.2462/09670513.814

Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., Jessop, C.: Heat pumps as a tool for energy recovery from mining wastes. In: Giere, R., Stille, P. (Hrsg.) Energy, Waste and the Environment – a Geochemical Perspective, Bd 236. S. 499–513. Geological Society, London, Special Publication (2004)

Batchelor, T., Curtis, R., Ledingham, P., Law, R.: Country Update for the United Kingdom. Paper-ID: 01076. In: International Geothermal Association IGA (Hrsg.) Proc. of World Geothermal Congress 2015. Melbourne, 19–24. April 2015

Bauconzept 2015 – Bauconzept Dresden GmbH: Projekt: Geothermische Grubenwassernutzung in Freiberg. http://www.bauconzept-dresden.de/portfolio/geothermische-grubenwassernutzung-in-freiberg/. Zugegriffen: Dez. 2015

Beck, H. P., Schmidt, M.: Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. Abschlussbericht: BMU FKZ 0325074. Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal (2011)

Bernhard, M.: Die Silberstrasse und ihre Geschichte. Unter Mitarbeit von G. Graf. Sonderausg. Sachsenbuch, Leipzig (1992)

Bieg, M., Angerer, A., Martinelli, W., Hammer, S., Mottaghy, D.: Erkundung des geothermischen Potentials eines ehemaligen Untertagebaus. bbr Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau. **2013**(6), 46–53 (2013)

Bracke, R., Bussmann, G.: Heat-Storage in deep hard coal mining infrastructures. Paper-ID: 38002. In: International Geothermal Association IGA (Hrsg.) Proc. of World Geothermal Congress 2015. Melbourne/Australia, 19–24. April

Bracke, R., Ignacy, R., Eicker, T., Bussmann, G.: Geothermische Nachnutzung von Steinkohlebergwerken über geschlossene Wärmetauschersysteme. Sitzung AG Bergbauinfrastruktur und Grubenwasser, Bochum, 19.06.2015 (2015)

brgm : French National Geological Survey. Institut Carnot (2014)

Burtner, D., Cairns, H., Cash, C.: AMD Geothermal Project. John Wesley A.M.E. Zion Church. http://2009.treatminewater.com/images/CCashPittsburghGeothermal.pdf (2009). Zugegriffen: Nov. 2012

Bussmann, W.: Energiequelle Grubenwasser. Geothermische Vereinigung e.V., https://idw-online.de/de/news2637 (1998). Zugegriffen: Febr. 2016

Butolen, H.: Geothermal energy from mining sources in the Zasavje region. Pre-investment Study. Summary (2010)
Clauser, C., Heitfeld, M., Rosner, P., Sahl, H., Schetelig, K.: Nutzung von Erdwärme in aufgelassenen Bergwerken. Beispiel Aachener Steinkohlerevier. In: Beratende Ingenieure 2005 (Juni), S. 15–17. Köllen Druck + Verlag GmbH (2005)
Curtis, R., Roijen, E.: Question and Discussion. In: Faull, M.L. (Hrsg.) Heat-Pump Technology using Minewater, S. 26–31. National Coal Mining Museum for England (2011)
Debes, C.: Minewater geothermal energy in Europe – Pilots in ReSource and Remining LOWEX. In: Debes, C. (Hrsg.) 2. Workshop Minewater – Renewable Energy. ReSource – Turning Problems into Potentials. Ehem. Seite: Resource-ce.eu. Eisleben (2012a). Zugegriffen: Aug. 2012
Debes, C.: Übersicht über Pilotanlagen zur Gewinnung von Grubenwasser-Geothermie in Europa. in Betrieb, im Bau oder Investitionen gesichert. Ehem. Seite: Resource-ce.eu ReSource (2012b). Zugegriffen: Nov. 2015
Dillenardt, J., Kranz, K.: Geologisch-Hydrogeologische Kartierung im Alten Tiefen Fürstenstolln zur geothermischen Grubenwassernutzung im Schloss Freudenstein, Freiberg. Diplomkartierung. TU Bergakademie, Freiberg (2010)
Eikmeier, B., Wagner, H. J.: Seasonal Storage of Solar Heat in Underground Mines. In: ISES (Hrsg.): Proc. of Solar World Congress. Adelaide, Australia, 25–30 Nov., S. 1849–1854 (2001)
ENERGONPLAN s.r.o. : RESUME – Geothermal energy from mining sources. Study on geothermal energy and underground mining water usage in undermined territories of Sokolov region. Hg. v. Resource-ce.eu. http://www.central2013.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/outputlib/Resource_4.2.6_Pre-investment_study_geothermal_energy_PP7_Summary_EN_20110531.pdf?PHPSESSID=832c2007231d4ef0b9ff71d356cf847f (2011). Zugegriffen: Okt. 2010
Ernst, P., Hieblinger, J.: Aspekte der Nutzung geothermischer Energie. Erdöl Erdgas Zeitschrift. **95**, 412–420 (1979)
Evans, A. M.: Erzlagerstättenkunde. Enke Verlag, Stuttgart (1992)
Farr, G., Tucker, D.: Mine water as an Energy Source for Heat Pumps. a case study from the South Wales Coalfield. South West Regional Group of the Geological Society. Bristol, http://www.wdsgreenenergy.co.uk/awards/ (2015). Zugegriffen: Apr. 2015
Flynn, T., Trexler, D., Hendrix, J.: Geothermal Enhancement of Mineral Processing in Nevada. Final Report (DOE/SF/15603-1). Hg. v. National Technical Information Service. Divison of Earth Sciences Environmental Research Center University of Nevada (1986)
Frisch, C. M.: Wassergärten Reden. http://www.industriekultur-ansichten.com/orte/deutschland/154-garten-reden (2012). Zugegriffen: Okt. 2012
Gahlen, K.: Variationen zur geothermischen Nutzung der Infrastruktur von Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen. In: Der Geothermiekongress 2009. Bochum, 17.–19. Nov. Bundesverband Geothermie (2009)
Galinsky, G., Leistner, J., Scheuermann, G.: Kavernenkraftwerk Drei-Brüder-Schacht. Geschichte und Überlegungen zur Rekonstruktion, 2. Aufl. Saxonia, Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg (2001)
GeoExchange: Muncipal Building Park Hills, Missouri. http://www.geoexchange.org/pdf/cs-064.pdf (2002). Zugegriffen: Okt. 2012
Ghomshei, M.: Geothermal energy from Con Mine for Heating the City of Yellowknife, NWT: A concept study. Internal Report. The Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering (2007)
Ghoreishi Madiseh, S. A., Ghomshei, M. M., Hassani, F. P., Abbasy, F.: Sustainable heat extraction from abandoned mine tunnels: A numerical model. Journal of Renewable and Sustainable Energy. **4**(3), 033102 (2012). http://doi.org/10.1063/1.4712055
Grab, T., Storch, T., Gross, U., Kleutges, J., Grötzsch, S.: Geothermieanlage zur Grubenwassernutzung für Heizung (200 – max. 670 kW) und Kühlung (155 – max. 500 kW). In: GtV – Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.) Der Geothermiekongress 2010. Karlsruhe, Nov. 17–19 (2010)

Grasby, S. E., Allen, D. M., Bell, S., Chen, Z., Ferguson, G., Jessop, A. et al.: Geothermal energy resource potential of Canada. Geological Survey of Canada. Open File 6914, (19Nov. 2015) (2012)

GrEEN: GrubenwasserEnergie für das ENERGETICON. Sitzung AG Bergbauinfrastruktur und Grubenwasser, 19 Juni 2015

Griebler, C., Mösslacher, F.: Grundwasser-Ökologie. Facultas (UTB, 2111), Wien (2003)

Hall, A., Scott, J. A., Shang, H.: Geothermal energy recovery from underground mines. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **15**(2), 916–924 (2011). http//doi.org//10.1016/j.rser.2010.11.007

Halmo, J.: Nutzung der Thermal- und Grubenwässer im Bereich des Bergbauunternehmens Hornonitrianske bane, Slowakei. Bohrung S1-NB-II. Zeitschrift: Geothermische Energie **67**, S. 6–13 (2010)

Hassani, F., Koufos, K., Ghoreishi, A., Ghomshei, M. M.: A Study on the Extraction of Low Temperature Geothermal Energy from Mines in Canada. In: Liu, M. (Hrsg.) Proc. of Int. Conf. of WREC-Asia & SuDBE2011. Int. Conf. on Sustainable Development in Building and Environment. Chongqing, China, 28–31 Okt. 2011. World Renewable Energy Network (2011)

Heitfeld, M., Rosner, P., Schetelig, K., Sahl, H.: Nutzung aufgegebener Tagesschächte des Steinkohlebergbaus für die Gewinnung von Erdwärme. Glückauf. **142**(10), 432–438 (2006)

Hellawell, J. M.: Biological indicators of freshwater pollution and environment management. Pollution Monitoring Series. Elsevier Applied Sciences Publishers, London (1986)

Herteis, B.: Springhill Mine Water Geothermal. Proposed Springhill Surface Coal Recovery Project – Round Table Discussion, 12 Febr. 2015

Hoffman, M., Joppich, M.: Vorstellung der Geothermie-Anlage Röhrig-Schacht Wettelrode. Re-Source Project – Workshop. Zwickau, 16 Aug. 2012

Hoffmann, M. et al.: Energieeffiziente Fernwärmeversorgung unter Nutzung der Wärme aus Grubenwässern und anderen natürlichen Wärmequellen. FKZ: 0327481A, Westsächsische Hochschule Zwickau (2014)

Hölting, B., Coldewey, W. G.: Hydrogeologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2013)

Huber, G.: Energetische Nutzung von Grubenwässern. Dissertation. TU Bergakademie, Freiberg (1990)

IDoMA – Illinois Department of Military Affairs : Geothermal Retrofit of Illinois National Guard's State Headquarters Building. Final Technical Report. 27 Apr. 2015

Jardón, S., Ordónez, A., Álvarez, R., Cienfuegos, P., Loredo, J. (2013): Mine Water for Energy and Water Supply in the Central Coal Basin of Asturias (Spain). Mine Water and Enviroment. **32**(2), 139–151. http://doi.org/10.1007/s10230-013-0224-x

Jarvie-Eggart, Michelle E.: Responsible mining. Case studies in managing social and environmental risks in the developed world. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, CO (2015)

Jensen, E. B.: Mine Water Used to Heat Ventilation air at Henderson Molybdenium Mine. Mining Engineering. **35**(1),17–20 (1983)

Jessop, A.: Geothermal Energy from old Mines at Springhill, Nova Scotia, Canada. In: World Geothermal Congress. Firenze, Italy, May 18–31, S 463–468, 08 Okt. 2012

Jessop, A. M., MacDonald, J. K., Spence, H.: Clean Energy from Abandoned Mines at Springhill, Nova Scotia. Energy Sources. **17**(1), 93–106 (1995). http://doi.org/10.1080/00908319508946072

JISC – Joint Implementation Supervisory Committee: Low-Potential heat of abandoned coal mines water for heating needs of Novashaktinsk. Hg. v. Joint Implementation Supervisory Committee. http://ji.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/VB1T6B30ENIRDH5AZXLCO3MOXPYSND (2007). Zugegriffen: Okt. 2012

Johnson Controls: Hohe Heizkosten sind heilbar: Grubenwasser dient als Energiequelle für zweistufige Ammoniak-Wärmepumpe im Kreiskrankenhaus Freiberg. Fallstudie. http://www.

johnsoncontrols.com/de_de/-/media/jci/be/germany/solutions-by-industry/files/bts_case_study_hospital_freiberg_de.pdf. Zugegriffen: 20. Nov. 2017

Jones, P., Lang, W., Patterson, J., Geyer, P.: Smart Energy Regions. The Welsh School of Architecture, Cardiff University, Cardiff. http://www.smart-er.eu/sites/default/files/Smart%20Energy%20Regions.pdf (2014). Zugegriffen: 20. Nov. 2017

Kaltschmitt, M.: Energie aus Erdwärme. Geologie, Technik und Energiewirtschaft, Spektrum Verlag, Heidelberg (2009)

Kissing, H.: Thermische Nutzung des Grubenwassers der Schiefergruben der MAGOG GmbH & Co KG in Schmallenberg/ Ortsteil Bad Fredeburg. 5. NRW Energiekonferenz. Bochum, 17 Nov. 2009

KKH FG – Kreiskrankenhaus Freiberg : Energetische Optimierung: Silberbergwerk als energetische Goldgrube. http://www.kkh-freiberg.com/index.php?id=334 (2014). Zugegriffen: 17. Nov. 2017

Koch, L. (2012): Grubenwasser-Geothermie im Mansfelder Land. ReSource Turning Problems into Potentials. Freiberg, 15.06.2012

Konrad, C., Grund, K., Burghardt, D., Manke, T., Kluge, H., Beckert, A., Bachmann, S.: Geothermische Grundwassernutzung für den Standort Reiche Zeche in Freiberg, in Grubenwässer – Herausforderungen und Lösungen, (Hrsg.) Merkel und M. Schipek, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, S. 159–164 (2010)

Korb, M. C.: Minepool Geothermal in Pennsylvania. In: Department of Environmental Protection Pennsylvania (Hrsg.) 14th Conference on Abandoned Mine Reclamation: New Frontiers in Reclamation. Pennsylvania. Online verfügbar unter https://www.portal.state.pa.us/portal/server.pt/gateway/PTARGS_0_2_1391321_0_0_18/Mine_Pool_Geothermal_in_PA-2012.pdf (2012). Zugegriffen: Nov. 2015

Kremer, E., Neuhaus, P. U.: Bergrecht. Stuttgart [u.a.]: Kohlhammer (Kohlhammer Studienbücher. Rechtswissenschaft). (2001)

Kynoch, B.: Mining Heat. In: Canadian Conculting Engineer (May), S. 18–23. https://www.canadianconsultingengineer.com/digital-archives/may-2010/ (2010). Zugegriffen: Nov. 2015

la Touche, G. D., Preene, M.: The potential use of ground energy in the mining industry – exploration to closure. In: Rüde, R. T., Freund, A., Wolkersdorfer, C. (Hrsg.) 11th Int. Mine Water Association Congress. Mine Water – Managing the Challenges. Aachen, Germany. Int. Mine Water Association, S. 161–166. https://imwa.info/docs/imwa_2011/IMWA2011_DiggesLaTouche_259.pdf (2011). Zugegriffen: 17. Nov. 2017

Lagerpusch, K. H.: Stellenwert Bergbau – Geothermie in Sachsen. Workshop „Bergbau-Geothermie“ im Rahmen der ReSource-Arbeitsgruppe „Natürliche Potentiale“. Bad Schlema, 04 Febr. 2010

Lau, S.: Potentialanalyse der Grubenwasserstandorte unter dem Aspekt einer zukünftigen geothermischen Nutzung. Grubenwasser-Geothermie im ehemaligen Mansfelder Kupferbergbaurevier. Symposium Grubenwasser Geothermie. Lutherstadt Eisleben, 30 Aug. 2012

LfULG, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie : Abschlussbericht : Förderprogramm „Immissions- und Klimaschutz einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien“. Ergebnisse im Zeitraum 2000–2008. Hg. v. Freistaat Sachsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. (2012)

Lintker, S.: Energetische Nachnutzung ehemaliger Bergbaustandorte in NRW. Erneuerbare Energien im Bergbau in Chile. EnergieAgentur NRW. Essen, 24 Nov. 2014

Löffler, H.: Ein Anwendungsbeispiel für hydrochemische Auswerteverfahren im norddeutschen Raum mit dem Versuch einer Grundwassertypisierung. In: Guntau, M., Werner, P., Störr, M., Hartmann, O. (Hrsg.) Zur Geschichte der Geowissenschaften in der DDR – Teil II. Ostklüne: Verlag Störr (Schriftenreihe für Geowissenschaften, 18), S. 381–385 (2011)

Loredo, C., Roqueñí, N., Ordóñez, A.: Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. International Journal of Coal Geology (2016). http://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013

Loredo, J., Ordóñez, A., Jardón, S., Álvarez, R.: Mine water as geothermal resource in Asturian coal mining basins (NW Spain). In: Rüde, R. T., Freund, A., Wolkersdorfer, C. (Hrsg.) 11th Int. Mine Water Association Congress. Mine Water – Managing the Challenges. Aachen, Germany. Int. Mine Water Association, S. 177–181. https://www.imwa.info/docs/imwa_2011/IMWA2011_Loredo_314.pdf (2011)

Louie, E. P.: Writing a community guidebook for evaluating low-grade geothermal energy from flooded underground mines for heating and cooling buildings. Masterthesis. Michigan Technological University. https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1924&context=etds (2015). Zugegriffen: 17. Nov. 2017

MA – Mineralienatlas – Fossilienatlas. https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Deutschland/Sachsen/Erzgebirgskreis/Marienberg%2C%20Revier/Marienberg/Pobershau (2015). Zugegriffen: Nov. 2015

Malolepszy, Z.: Low Temperature Man-Made Geothermal Reservoirs in abandoned workings of underground Mines. In: Proc. of th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (2003)

Malolepszy, Z., Demollin-Schneiders, E., Bowers, D.: Potential Use of Geothermal Mine Waters in Europe. In: International Geothermal Association IGA (Hrsg.): Proc. of World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24.–29. April 2005, 20 Nov. 2015

Matthes, R., Schreyer, J.: Remediation of the old Wismut-Shaft 302 in Marienberg and Installation of a technical Plant for geothermic Mine Water Use (Ore Mountains, Germany). In: Cidu, R., Frau, F., International Mine Water Association (Hrsg.) Int. Mine Water Association Symposium. Water in Mining Environments. Cagliari/Italy, S. 227–231. https://imwa.info/docs/imwa_2007/IMWA2007_Matthes.pdf (2007a). Zugegriffen: Mai. 2015

Matthes, R., Schreyer, J.: Sanierung des WISMUT-Schachtes 302 in Marienberg und geothermische Nutzung des Grubenwassers. Fachbericht. In: Bergbau. **9**, 445–446 (2007b)

Merkel, B., Planer-Friedrich, B.: Grundwasserchemie. Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung, 2. Aufl. Springer, Berlin (2008)

MK – Mansfelder Kupferspuren (Hrsg.): Kupferspuren – [082] Mundloch Wiederstedter Stollen. http://kupferspuren.artwork-agentur.de/index.php?option=com_content&task=view&id=263&Itemid=58 (2012). Zugegriffen: Nov. 2012

minewater project : Mine water as a Renewable Energy Resource. An information guide based an the Minewater Project and the experiences at pilot locations in Midlothian and Heerlen. Hg. v. minewater project. http://skrconline.net/content/images/stories/documents/mine_water_renewable_energy_guide.pdf (2011). Zugegriffen: Nov. 2015

MSG – Mittelsächsischer Gesundheitsbote: Die beste Luft Freibergs gibt es im Krankenhaus. Freiberg. www.lmkgmbh.de/lmk/images/pdf-dateien/gesundheitsbote_0511.pdf (2011). Zugegriffen: 25. Mai 2011

Mühlenweg, U., Brasser, T., Hertes, U.: Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen. Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung. Hrsg. v. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GRS mbH. Braunschweig (1997)

Müller, B., Rottluff, F.: Ursachen der Durchflussminderung an der Wärmepumpenheizungsanlage in der Mittelschule Ehrenfriedersdorf. (unveröffentlichte Studie). Unter Mitarbeit von B. Müller und F. Rottluff. Hrsg. v. Verein Energiemodell Sachsen e.V. (2001)

Müller, B., Rottluff, F.: Abschlussbericht zu den Ergebnissen der Durchflussmessungen im März 2005 an der Grubenwasseranlage der Wärmepumpe der Mittelschule Ehrenfriedersdorf. unveröffentlichte Studie. Verein Energiemodell Sachsen e.V. Ehrenfriedersdorf (2005)

Münch, M.: Grubenwasserwärmenutzung. Heizwärme- und Kühlwasserbereitstellung durch geothermische Nutzung thermaler Grubenwässer. Seminar für kommunale Vertreter. Hg. v. igem.

Institut für geothermisches Ressourcenmanagment. http://www.tsb-energie.de/fileadmin/files/pdf/Publikationen/Vortraege/Muench_Grubenwasser_2009.pdf (2009). Zugegriffen: Nov. 2015

Münch, M., Himmel, J., Kill, T.: Thermische Grubenwassernutzung Grube Georg/Willroth. Nachnutzung eines gefluteten Grubengebäudes als saisonaler Wärmespeicher. Teil 2:Technisch-wirtschaftliche Machbarkeitsstudie. Hrsg. v. igem – Institut für geothermisches Ressourcenmanagement. https://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/.../Seeg/grubegeorgi.pdf (2010). Zugegriffen: Okt. 2012

Myslil, V., Frydrych, M. S. V.: Geothermal Energy Potential of Czech Republic. In: Proc. World Geothermal Congress (2005)

ncn KG :www.ncn.de: Heizen mit Grubenwasser. Hg. v. Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. Geothermische Vereinigung, http://www.geothermie.de/news-anzeigen/2012/09/07/heizen-mit-grubenwasser.html (2012). Zugegriffen: Nov. 2012

Niemann, A.: Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Anlagen des Steinkohlenbergbaus als Pumpspeicherwerke. 2. Int. Arbeitsgespräch Geothermie und Grundwasser. Essen. https://www.uni-due.de/imperia/md/content/wasserbau/30-11-niemann.pdf (2012). Zugegriffen: Nov. 2015

NRW – Landesinitiative Zukunftsenergien : Geothermie – Erdwärme für Nordrhein-Westfalen, (2004). Zugegriffen: Okt. 2012

Oelsner, C.: Grundlagen der Geothermik. Bergakademie Freiberg, Freiberg. https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/g/geothermie/geothermie_ea_nrw.pdf (1982)

Op't Veld, P.: Overview minewater projects in REMINING-lowex. ReSource, 30 Aug. 2012. Ehem. Seite: Remining-lowex.org. Zugegriffen: Nov. 2012

Ordonez, A., Andres, C., Alvarez, R., Jardon, S.: Harnessing groundwater as a water supply and energy resource. Sequridad y medio ambiente. **30**(118), 43–60 (2010)

ORNL – Oak Ridge National Laboratory (12. 2014): Case Study of the ARRA-Funded GSHP Demonstration at the Natural Sources Building, Montana Tech.

Ove, T.: Mine water plagued church, soon it will heat and cool it. Pittsburgh Post-Gazette, 01.11.2008. http://www.post-gazette.com/stories/local/neighborhoods-city/mine-water-plagued-church-soon-it-will-heat-and-cool-it-619206/ (2008). Zugegriffen: Nov. 2015

PKG – Personenkreis Geothermie der AD-HOC-Arbeitsgruppe Geologie, Staatlichen Geologischen Dienste: Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Information aus den Bund/Länderarbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. BGR, LIAG, SGD, BLA-GEO, BLAG-KliNa, LAWA. Wiesbaden. www.infogeo.de/dokumente/download_pool/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf (2011). Zugegriffen: Nov. 2015

Preene, M., Younger, P. L.: Review or critical Assessment. Can you take the heat? – Geothermal energy in mining. Mining Technology. **123**(2), 107–118 (2014). http://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058

RAG – Deutsche Steinkohle : Wasserhaltungen der RAG Deutsche Steinkohle. 2. Sitzung des AK „Bergbau Infrastruktur-Geothermische Fragen". Otto Uhl, Vortrag (2009)

Ramos, E. P., Breede, K., Falcone, G.: Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects. Environmental Earth Sciences. **73**(11), 6783–6795 (2015). http:/doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y

Ramos, E. P., Falcone, G.: Recovery of the geothermal energy stored in abandoned mines. In: Hou, M. Z., Xie, H., Were, P. (Hrsg.) Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion. Proc. of the 3rd Sino-German Conf. Underground Storage of CO2 and Energy", Goslar, Germany, 21-23 May 2013. Springer, Berlin (2013)

Raube, J.: Wärmenutzung aus Grubenwasser in Bochum-Werne. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. EnEFF : Stadt Forschung für die energieeffiziente Stadt. http://www.eneffstadt.info/fileadmin/media/Veranstaltungen/Dateien/Vortraege_Statusseminar_Dezentrale_

Energiesysteme_2012/09_Raube_Waermenutzung_Grubenwasser.pdf (2012). Zugegriffen: Nov. 2015

Raymond, J., Therrien, R.: Low-temperature geothermal potential of the flooded Gaspé Mines, Québec, Canada. Geothermics. **37**(2), 189–210 (2008). http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.10.001

Raymond, J., Therrien, R.: Optimizing the design of a geothermal district heating and cooling system located at a flooded mine in Canada. Hydrogeol J. **22**(1), 217–231. http://doi.org/10.1007/s10040-013-1063-3 (2014)

Raymond, J., Therrien, R., Hassani, F.: Overview of Geothermal Energy Resources in Quebec (Canada) Mining Enviroments. In: N. Rapantova und Z. Hrkal (Hrsg.): Proc. 10th Int. Mine Water Association Congress. Karlsbad, Czech Republic. Int. Mine Water Association, S. 99–111. http://www.imwa.info/docs/imwa_2008/IMWA2008_039_Raymond.pdf (2008)

Reden : Ausbau der Geothermie durch Nutzung von Grubenwasser Reden (2008). Zugegriffen: Okt. 2012

Remining Lowex : Remining Lowex – Review 2011. News from the Pilot Communities. http://www.remining-lowex.org/wp-content/uploads/2010/12/Remining_Lowex_Review_2011.pdf (2012). Zugegriffen: Nov. 2012

ReSource: Pre-investment study geothermal energy from mining sources. Exemplary region: Aue. Abschlussbericht. Hrsg. v. ReSource – Turning Problems into Potentials – New Groth from old mines – Exploring Post-mining potentials in Central Europe (2011) Zugegriffen: Nov. 2015

RKN – Rosenkreis Neunkirchen (Hrsg.): Der Wassergarten im Garten Reden. http://www.rosenkreis.de/index.php?id=1726. Zugegriffen: Okt. 2012

Röder, U.: Geothermie im Fokus der Nachnutzung von Bergbaufolgelandschaften am Beispiel des Zwickauer Steinkohlenreviers. Geothermische Nutzung von Flutungswässern. Vortrag, 30 Aug. 2012

Röder, U.: Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers. Stand und Zwischenergebnisse des Projektes, 08 Sept. 2015

Rodríguez, R., Diaz, M.B.: Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method. Renewable Energy. **34**(7), 1716–1725 (2009)

Roijen, E.: The use of an open-loop heat-pump system to heat social housing and an offical building throughout the town of heerlen, the Netherlands. In: Faull, M.L. (Hrsg.) Heat-pump technology using minewater, S. 15–25. National Coal Mining Museum for England Publications (2011)

Roijen, E., Op't Veld, P., Demollin-Schneiders, E.: The Minewaterproject Heerlen – low exergy heating and cooling in practice. In: 28th AIVC and 2nd Palenc Conference. Building Low Energy Cooling and Ventilation Technologies in the 21st Century. Crete, Greece, 27–29 Sept. 2007

Roschlau, H., Heintze, W.: Wissensspeicher Bergbautechnologie. Erzbergbau und Kalibergbau. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1975)

Rosner, P., Eßer, M., Heitfeld, M., Hofmann, T.: CAP und GrEEN – Nutzung von Erdwärme aus stillgelegten Bergewerken des Aachener Reviers im Rahmen der EuRegionale 2008. In: Der Geothermiekongress 2009. Bochum, 17–19 Nov. Bundesverband Geothermie (2009)

Rottluff, F.: Energiemodel Sachsen: Grubenwassernutzung im Erzgebirge. Geothermische Energie. Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e. V. **2**(5), 6–8 (1993)

Rottluff, F.: Neue Wärmepumpenanlage im Besucherbergwerk Zinngrube Ehrenfriedersdorf. Hg. v. Geothermische Energie 21. http://www.geothermie.de/uploads/media/Geothermische.Energie.Nr.21.pdf (1998). Zugegriffen: Jan. 2013

Rottluff, F.: Abschlussbericht zur Sanierung der Bohrungen zur Grubenwasserentnahme/-rückführung aus dem Nord-West-Feld (NWF) der ehemaligen Zinngrube Ehrenfriedersdorf. unveröffentlichte Studie. Hrsg. v. Verein Energiemodell Sachsen e.V. Ehrenfriedersdorf (2012)

Rottluff, F., Köckritz, V., Ewe, H.: Ehrenfriedersdorf : Grubenwärmenutzung in Betrieb genommen. Geothermische Energie. Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e. V. **3**(8), 4–6 (1994)

Schaberg, A.: Nutzung von gefluteten Grubenräumen zur Langzeit-Wärmespeicherung. Meßtechnische und numerische Untersuchung. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg (1998)

Schetelig, K., Heitfeld, M., Mainz, M., Hofmann, Th., Essers, M.: Geothermie aus Grubenwasser. regenerative Energie aus stillgelegten Steinkohlenbergwerk (2005)

Schneider, H., Hurtig, E., Schneider, D., Wormbs, J.: Forschung und Entwicklung für die Geothermie in Ostdeutschland. In: Guntau, M., Werner, P., Störr, M., Hartmann, O. (Hrsg.) Zur Geschichte der Geowissenschaften in der DDR – Teil II. Ostklüne: Verlag Störr (Schriftenreihe für Geowissenschaften, 18), S. 345–367 (2011)

Schneider, J., Eggeling, L., Hesshaus, A.: Tiefengrundwassercharakteristik und hydrochemische Untersuchung. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung, S. 559–591. Springer Spektrum, Berlin (2014)

SIB (16.10.2013), Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement: Medieninformation. Technische Universität Bergakademie Freiberg Geothermische Anlage zur Nutzung des Energiepotenzials des Rothschönberger Stolln geht in Betrieb. 63/2013.

Statista : Strompreise in ausgewählten Ländern weltweit im Jahr 2014. Hg. v. Statista. NUS Consulting. http://de.statista.com/statistik/daten/studie/13020/umfrage/strompreise-in-ausgewaehlten-laendern/ (2016). Zugegriffen: 20. Nov. 2017

Statistisches Bundesamt – Destatis: Preise. Daten zur Energiepreisentwicklung – Lange Reihen von Januar 2000 bis Februar 2016. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (5619001161024). https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile (2016). Zugegriffen: 24 März. 2016

Stüber, K.: Warmes Grubenwasser soll Energie liefern. In: Aachener-Zeitung, 14.10.2012. http://www.aachener-zeitung.de/artikel/2811701, (2012). Zugegriffen: Nov. 2012

Sunbeam – Sunbeam GmbH: Forschung für Energieeffizienz: Projekt: Geothermische Nutzung von Grubenwässern zur Nahwärmeversorgung. Hg. v. EnEFF : Stadt Forschung für die energieeffiziente Stadt. http://www.eneff-stadt.info/de/pdf/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/geothermische-nutzung-von-grubenwaessern-zur-nahwaermeversorgung/ (2013). Zugegriffen: Jan. 2013

Symmangk, R.: Bergbau- und Industriegeschichte. In: Hugenroth, P. (Hrsg.) Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. Böden ohne Grenzen – Allgemeiner Exkursionsführer, Bd. 111. Unter Mitarbeit von Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft – DBG. Dresden, 02.-09.09.2007 (DBG, 111), S. 87–99 (2008)

Thien, L.: Geothermal Re-use of Coal Mining Infrastructures and Mine Water in Hard Coal Mining in the Ruhr Area/Germany. Paper-ID: 28017. In: Int. Geothermal Association IGA (Hrsg.): Proc. of World Geothermal Congress 2015. Melbourne/Australia, 19.–24. Apr (2015)

Thornton, R.: Convection mechanisms for geothermal heat exchangers in a vertical mine shaft. In: 2013 Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Bd. 332, S. 4

Tichomirowa, M., Heidel, C., Junghans, M., Haubrich, F., Matschullat, J.: Sulfate and strontium water source identification by O, S and Sr isotopes and their temporal changes (1997–2008) in the region of Freiberg, central-eastern Germany. Chemical Geology. **276**(1–2), 104–118 (2010). http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.06.004

TKLN – Tourismus- und Kulturzentrale des Landkreises Neunkirchen: Ein Rundgang durch den Erlebnisort Reden. 2. Aufl. Tourismus- und Kulturzentrale des Landkreises Neunkirchen, Schiffweiler (2014)

Toth, A. N.: Geothermal Potential of an Abandoned Copper Mine. Sustainable green energy : Geothermal Resources Council 2011 annual meeting, October 23–26, San Diego, California, USA. Geothermal Resources Council Transactions. **35**, 139–142 (2011)

Toth, A. N., Bobok, E.: A Prospect Geothermal Potential of an Abandoned Copper Mine. Paper-ID: SGP-TR-183. In: Proc. of 32th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, 22.–24. Jan. Stanford University. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/IGAstandard/record_detail.php?id=5088 (2007). Zugegriffen: Mai. 2015

Ulbricht, S.: Wieder Pionierrolle für Freiberg. Projekt Energetische Optimierung im Kreiskrankenhaus Freibergnutzt Warmwasser des Supertunnels. Wochenspiegel – regional S. 3, 02. Jan. 2013

Vater, A.: Geothermie – Nutzung von Wärme aus der Erde. Seniorenkolleg an der TU Chemnitz. Bad Schlema, 30.10.2007. http://www.tu-chemnitz.de/seniorenkolleg/v5/archiv/Bewertg/071030-geothermie.pdf (2007). Zugegriffen: Nov. 2012

Vater, A.: Geothermische Nutzung von Grubenwasser aus der Grube Schlema-Alberoda. Arbeitsgruppe Geothermie und Grubenwassernutzung, 06 Sept. 2012

Verhoeven, R., Willems, E., Harcouet-Menou, V., Boever, E. de, Hiddes, L., Op't Veld, P., Demollin, E.: The EC REMINING-lowex project in Heerlen the Netherlands: development of a geothermal mine water pilot project to a full scale hybrid sustainable energy infrastructure Mine Water 2.0. In: Int. Geothermal Association IGA (Hrsg.) Proc. of European Geothermal Congress 2013. Pisa, Italy (2013)

Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., de Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. Op't, Demollin, E.: Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling. Energy Procedia. **46**, S. 58–67. http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158 (2014)

Vidrih, B., Medved, S., Vetršek, J., Roijen, E.: Standardized solutions for low exergy mine water systems configurations including solutions for high quality energy demand, Technical Guidebook, Work package 2, Concerto Initiative, EC 6th Framework (2011)

Volland, J.: Energieeinsparverordnung (EnEV). Mit ergänzenden Vorschriften, Schnelleinstieg, Chancen nutzen, Risiken vermeiden. 3., aktualisierte Aufl. Rehm, Heidelberg (2014)

Watzlaf, G. R., Ackman, T. E.: Underground Mine Water for Heating and Cooling using Geothermal Heat Pumpt Systems. Mine Water and Enviroment. **25**(1), 1–14 (2006)

Weller, B., Rexroth, S., Jakubetz, S.: Denkmal und Energie. Technologien und Systeminnovationen zur Energieversorgung und -einsparung bei Baudenkmalen. Abschlussbericht (AZ: 22814-25). Hrsg. v. Deutschen Bundesstiftung Umwelt und TU Dresden. Institut für Baukonstruktion – TU Dresden (2008)

Werner, T.: Ökologische Investments. Chancen und Risiken grüner Geldanlagen. Gabler, Wiesbaden (2009)

Wieber, G.: Studie zur Erfassung und Quantifizierung des Wärmeflusses aus gefluteten Grubenbauen des ehemaligen Erzbergbaus in Hamm/Sieg und Abschätzung der geothermischen Nutzungsmöglichkeiten. Endversion. Hrsg. v. Igem. https://www.waldrlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/projekte/downloads/110802_Potentialstudie_Endbericht.pdf (2010), Zugegriffen: Nov. 2012

Wieber, G., Münch, M., Himmel, J., Kill, T.: Thermische Grubenwassernutzung Grube Georg/Willroth. Nachnutzung eines gefluteten Grubengebäudes als saisonaler Wärmespeicher. Teil 1: geologische Potentialanalyse. Hg. v. igem – Institut für geothermisches Ressourcenmanagement (2010)

Wieber, G., Ofner, C.: Geothermische Potenziale gefluteter Bergwerke. bbr Jahresmagazin, 12/2008. http://www.fachzeitschriften-wvgw.de/fileadmin/PDF/bbr/12_2008/bbr_5912_72_77_Ofner_Wieber.pdf (2008). Zugegriffen: Nov. 2012

Wieber, G., Pohl, S.: Mine Water: A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif. In: Rapantova, N., Hrkal, Z. (Hrsg.) Proc. 10th Int. Mine Water Association Congress. Karlsbad, Czech Republic. Int. Mine Water Association, S. 113–116 (2008)

Wieber, G., Simon, R., Münch, M., Ofner, C.: Thermische Grubenwassernutzung zur Gebäudebeheizung am Neuhoffnungsstollen in Bad Ems. igem – Institut für geothermisches Ressourcenmanagement.http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/projekte/downloads/bademsi160608.pdf (2008), Zugegriffen: Apr. 2015

Wikipedia (Hrsg.): Wilkes-Barre, Pennsylvania – Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=522909565 (2012a). Zugegriffen: Nov. 2012

Wikipedia (Hrsg.): Butte, Montana – Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=523178605 (2012b). Zugegriffen: Nov. 2012

Willmes, J., Bücker, C.: Nutzung von Grubenwasser zur Wärmeerzeugung. Ein Projektbeispiel. bbr Sonderheft Geothermie. **2014**, 46–52 (2014)

Wismut – Wismut GmbH Geothermie in Bad Schlema. Projekt „Schillerschule“. Hg. v. Wismut GmbH, (2012) Zugegriffen: Nov. 2012

Wisotzky, F.: Angewandte Grundwasserchemie, Grundwasserbelastung und Aufbereitung. Chemische Grundlagen der anorganischen Wasserchemie (ch17:Kap. 2). Springer, Berlin (2011)

Wolf, P., Lagerpusch, K. H., Hofmann, K.: Zur geothermischen Nutzung von Grubenwässern in Sachsen. Sächsischer Geothermietag Spezial: Geothermie und Bergbau. Marienberg, 26 Nov. 2007

Wolkersdorfer, C.: Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. Fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment. Habilitationsschrift. TU Bergakademie Freiberg (2008)

Younger, P. L., Banwart, S. A., Hedin, R. S.: Mine water. Hydrology, pollution, remediation. Dordrecht [u.a.]: Kluwer Academic Publishers (Environmental pollution). http://swbplus.bsz-bw.de/bsz100169090cov.htm (2002). Zugegriffen: 20. Nov. 2017

Geophysikalische Bohrlochmessungen in Geothermiebohrungen und -sonden

18

Karl-Norbert Lux

Inhaltsverzeichnis

18.1 Einleitung 588
18.2 Bohrlochmesstechnische Kontrollen – Zielsetzung 589
18.3 Messtechnische Kontrollmöglichkeiten 590
18.3.1 Allgemeines 590
18.3.2 Nachweis der physischen Existenz von Abdichtungen 594
18.3.3 Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit von Abdichtungen 602
18.4 Optimierung der Kontrollmöglichkeiten 610
Literatur 611

Zusammenfassung

Beim Bau von Erdwärmesonden stellen zumeist nicht die darin eingebauten Installationen (z. B. U-Rohre u. a) sondern die Bohrung selbst das Problem dar. Das betrifft u. a. die aus Unkenntnis über den Untergrund und die durch dessen Eigenschaften bestimmte Bohrungsgeometrie falsch bemessenen und eingebauten Abdichtungen des Ringraumes, damit verbundene unerwünschte Kurzschlußströmungen und daraus resultierende Folgeschäden. Die Methoden der geophysikalischen Bohrlochmessungen und deren an den Bau von Erdwärmesonden gekoppelte Anwendung bieten die Möglichkeit der ausreichenden Voruntersuchung von Bohrung und Untergrund bis hin zur Überprüfung der Abdichtung der Sonde und deren Wirksamkeit.

Schlüsselwörter

Bohrlochmesstechnische Kontrollen · Kontrollmöglichkeiten · Brunnenbau · Sonden · hydraulische Wirksamkeit · Abdichtungen

Karl-Norbert Lux (✉)
GFL Dr. Lux - Geophysikalische Fachberatung GbR, Kleine Tabarzer Straße 6, 99894 Friedrichroda, Deutschland
e-mail: dr-lux@t-online.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_18

18.1 Einleitung

Die Gewinnung von Energie für Heiz- oder Kühlzwecke mithilfe der sog. Oberflächennahen Geothermie hat sich einerseits fest etabliert, andererseits gefährdet aber die oft ungenügende Ausführungsqualität der sehr häufig bis weit in den Untergrund und dort oft auch stockwerksübergreifend hineinreichenden Erdwärmesonden das Grundwasser.

Letzteres wird nicht nur an spektakulären Schadensfällen mit erheblichen Folgeschäden deutlich. Bei der Vielzahl flacher Erdwärmesonden (ca. 500.000–600.000 Bohrungen) ist es, neben den ordnungsgemäß errichteten Sonden, sehr wahrscheinlich, dass nicht immer die strengen Regeln des Grundwasserschutzes eingehalten worden sind und eine Schadensdunkelziffer zu vermuten ist.

Im Brunnenbau existiert mittlerweile ein umfängliches technisches Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW), in dem nicht nur allgemein verbindliche Regeln aufgestellt, sondern auch Kontrollmöglichkeiten aufgezeigt oder gefordert werden. Damit werden Brunnen oder Grundwassermessstellen von vornherein so behandelt, wie sie es verdienen – als sensible Bauwerke, mit deren Hilfe wir unser wichtigstes Lebensmittel, das Wasser, einerseits gewinnen, andererseits aber auch kontrollieren und schützen!

Bei Erdwärmesonden stehen wir diesbezüglich erst ganz am Anfang, und es tun sich historische Parallelen zum Bau von Brunnen auf, da auch dort bis in die 70er und z. T. 80er Jahre des letzten Jahrhunderts kaum Untersuchungen am Bauwerk stattfanden. Bei einer Vielzahl dieser in den weitgehend „überwachungsfreien“ Jahren hergestellten Altbrunnen sind daher Fremdwassereintritte, hydraulisch unwirksame Abdichtungen u. a. Schäden infolge unsachgemäßen Baus an der Tagesordnung.

Insofern ist es erfreulich, dass es in letzter Zeit zunehmend Forderungen und Bemühungen gibt, in Erdwärmebohrungen und -sonden die physische Existenz, die mechanische Stabilität und den ordnungsgemäßen Einbau von hydraulisch wirksamen, Fremdwassereinträge und Kurzschlussströmungen verhindernder Abdichtungen durch messtechnische Kontrollen zu überprüfen. Dies macht sie sicherer, es ist möglich, Schwachstellen zu erkennen und bei negativem Attest ggf. Nachbesserungen oder den Rückbau zu fordern.

Nachstehend sollen, ausgehend von der Praxis im Brunnenbau, die dafür geeigneten geophysikalischen Messmethoden hinsichtlich ihrer Aussagemöglichkeiten und -grenzen dargestellt und erläutert werden.

Hierbei gilt grundsätzlich, dass nicht das geschlossene und in der Regel mechanisch dichte Wärmetauschersystem der Erdwärmesonde, sondern der dazu notwendige Bohraufschluss selbst das Problem darstellt. Die Abb. 18.1 verdeutlicht den Sachverhalt.

Durch die Darlegungen sollen letztlich die entsprechenden Mess- und Kontrollmöglichkeiten einem breiteren Personenkreis bekannt gemacht werden, da die Erfahrungen aus dem Brunnenbau zeigen, dass immer dann, wenn derartige Kenntnisse vorhanden sind und entsprechende Kontrollen gefordert werden, die Ausführungsqualität der Baumaßnahme von vornherein deutlich höher ist.

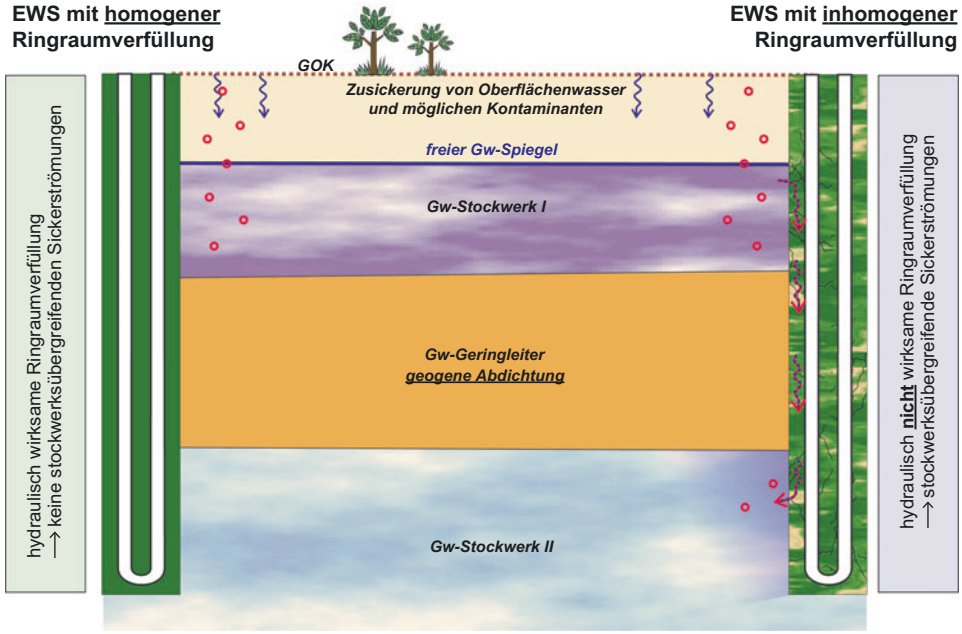


Abb. 18.1 Modell der geologischen Einbindung von Erdwärmesonden

18.2 Bohrlochmesstechnische Kontrollen – Zielsetzung

Die grundlegende Zielstellung von Kontrollmessungen in Erdwärmesonden besteht in

- einer Verbesserung der Ausführungsqualität der Abdichtung dieser Sonden gegenüber dem wasserführenden Gebirge und der Geländeoberkante durch die Möglichkeit entsprechender nachträglicher Überprüfungen
- und darin, im Schadensfall möglichst schnell dessen Ursache zu erkennen und, wenn das noch möglich sein sollte, eine Sanierungsstrategie festzulegen.
- Hierbei sind
- Vorhandensein und Verteilung der Abdichtung im Ringraum
- und hydraulische Vorgänge innerhalb dieses Verfüllguts bzw. im Übergangsbereich zwischen Ringraum und Gebirge

zu kontrollieren. Beides gehört zusammen, da erst die Korrelation der entsprechenden Messergebnisse sichere Rückschlüsse auf die Qualität der Bauausführung zulässt. Voraussetzung dafür ist in jedem Falle die freie Zugänglichkeit und Befahrbarkeit der Erdwärmesonde von über Tage. Überbaute, verschlossene Sonden sind nicht mehr überprüfbar. Ausgenommen sind Erdwärmesonden, in denen während des Baus Messsysteme

fest installiert wurden (z. B. Glasfasermesstechnik), wodurch noch partielle Kontrollmöglichkeiten vorhanden sind.

18.3 Messtechnische Kontrollmöglichkeiten

18.3.1 Allgemeines

Für den Nachweis der *physischen Existenz von Abdichtmaterialien* kommen im Brunnenbau die Messverfahren:

- Gamma-Ray-Log (GR),
- Dichtelog (GG.D),
- Neutron-Neutron-Log (NN),
- Suszeptibilitätslog (Magnetlog, MAL)

zur Anwendung (Lux 1996).

Diese Überprüfungen und letztlich das Vorhandensein ausreichenden und homogen im Brunnenringraum verteilten Abdichtmaterials sind jedoch nur die für dessen Oberflächenabdichtung *notwendige* Voraussetzung.

Der Nachweis eines sowohl in vertikaler als auch in lateraler Richtung *hinreichend* abgedichteten Ringraums ist demgegenüber erst dann erbracht, wenn die *hydraulische Wirksamkeit* dieser Abdichtung nachgewiesen werden kann.

Hierzu eignen sich in Brunnen

- Temperaturlogs einschließlich sog. Temperaturmonitorings (Temperaturwiederholungsmessungen bei zugeschalteter Pumpe)
- und Inertgastests (an der Filteroberkante Verpressen von z. B. Stickstoff über Packergestänge, Nachweis der bei Undichtheit auftretenden Migration des Gases mittels NN-Wiederholungsmessungen; nur in Brunnen ohne Sperrrohr möglich).

Die folgenden Abbildungen stellen entsprechende Beispiele aus der Praxis dar. Abb. 18.2 zeigt einen Soll-Ist-Vergleich zum Abdichtungsnachweis schlechthin, woraus deutlich wird, dass im *Ist* deutliche Unterschiede zum *Soll* auftreten können. Im vorliegenden Fall ist insbesondere die Hinterfüllungslücke ein wesentlicher Qualitätsmangel. Den teufenrichtigen Einbau einer magnetisch markierten Abdichtung (Material: Quellon HD) in den Ringraum eines Brunnens zeigt Abb. 18.3.

In Abb. 18.4 wird das Prinzip des o. g. Temperaturmonitorings erläutert (vgl. auch Lux und Scheffel 2002). Links werden Messkurven der Temperatur gezeigt, wie sie bei intakter Abdichtung entstehen – es tritt nur Wärmeleitung auf. In der rechten Darstellung bildet sich hingegen eine sickerwasserinduzierte Konvektionsströmung ab, die hier an der Durchbiegung nicht nur der Temperaturwiederholungsmessungen, sondern bereits in der

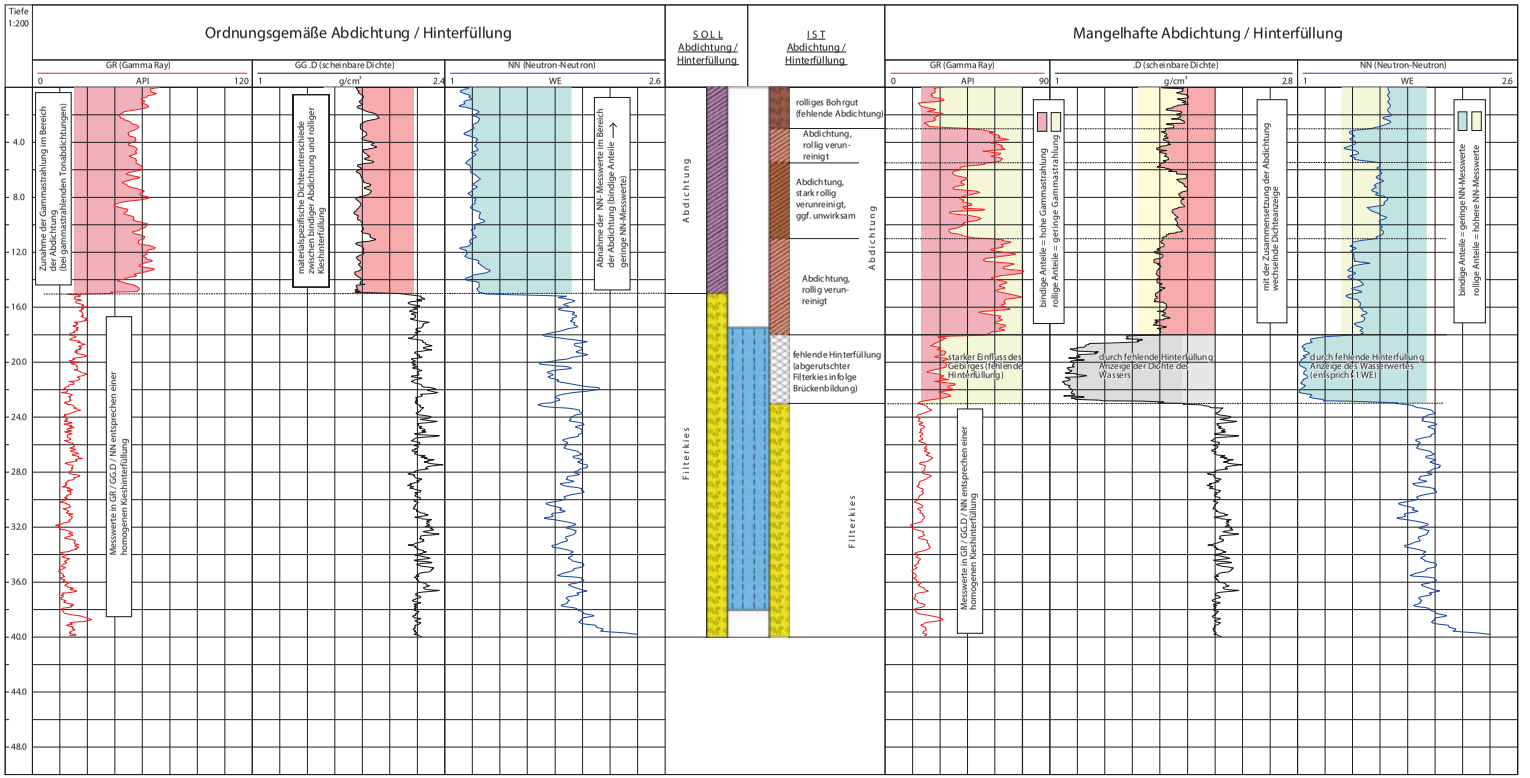


Abb. 18.2 Messtechnische Kontrollmöglichkeiten im Brunnenbau – Nachweis der Abdichtung mit radiometrischen Messverfahren

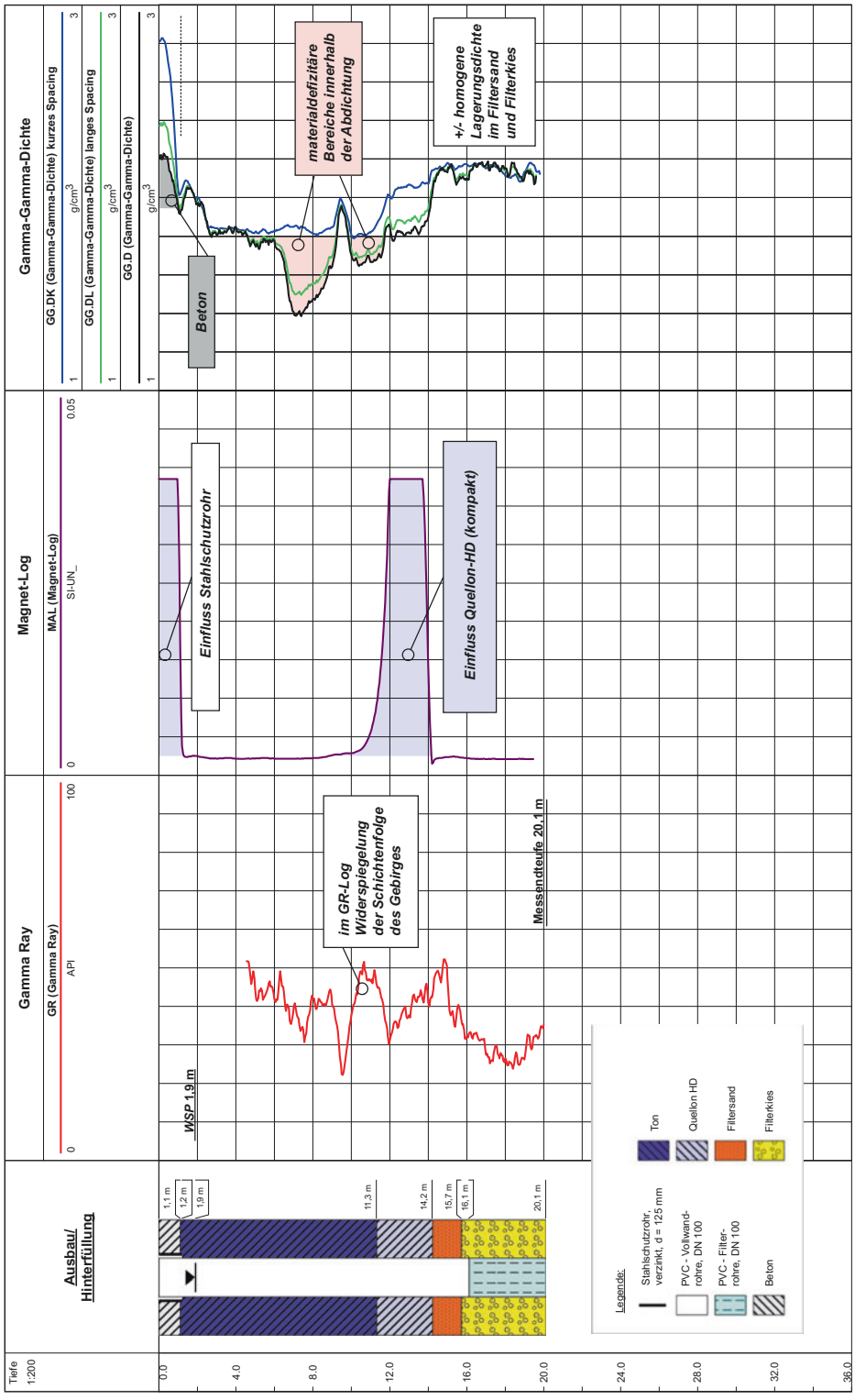


Abb. 18.3 Messtechnische Kontrollmöglichkeiten im Brunnenbau – Nachweis ferromagnetisch markierter Hinterfüllmaterialien mittels Magnetlog

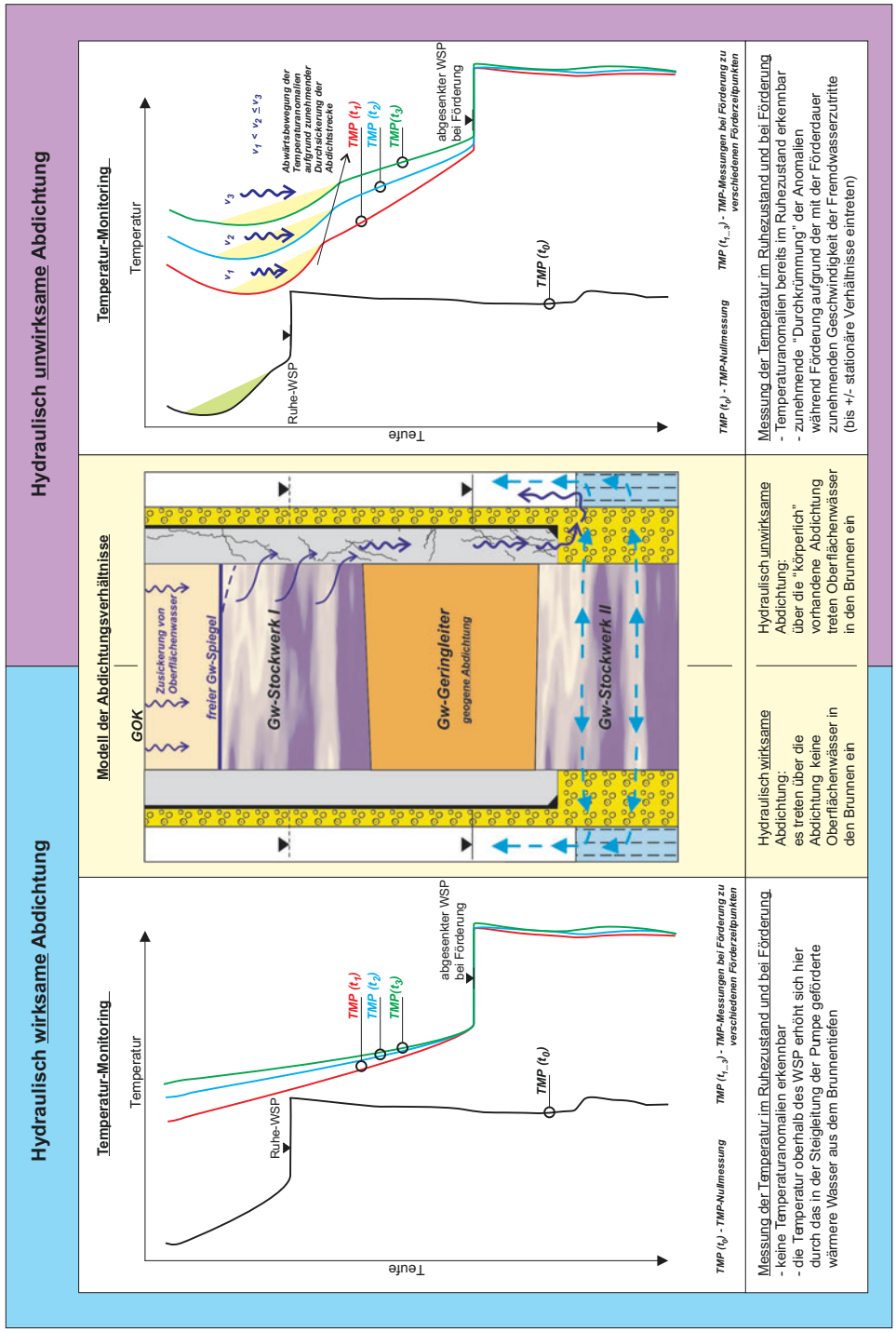


Abb. 18.4 Messtechnische Kontrollmöglichkeiten im Brunnenbau – Kontrolle der hydraulischen Wirksamkeit des Abdichtmaterials anhand von Temperaturmessungen

entsprechenden Nullmessung deutlich wird. Der sich dabei ausbildende Biegeradius ist ein Maß für die in der hier schadhaften Abdichtung auftretende Sickerströmung und wird quantitativ ausgewertet. Das Prinzipbild des Modells der Abdichtungsverhältnisse erklärt beide Situationen graphisch.

Unabhängig von ihrer Bauart (U-Sonden, Koaxial- oder Ringrohrsonden, s. u.) sind für die Untersuchung fertiggestellter Erdwärmesonden gemäß der eingangs genannten Aufgabenstellung alle bereits o. g. und im Brunnenbau eingesetzten radiometrischen, thermischen und magnetischen Messungen prinzipiell geeignet. Hinzu kommen faseroptische Messungen der Temperatur, Thermal-Response-Tests (TRT, z. B. in der Form von Kurzzeitversuchen (KTRT) nach Voelker und Voutta 2011, 2013) und in-situ-Messungen des Füllstandes magnetisch markierter Abdichtungssuspensionen einschließlich zeitlich gestaffelter Nachkontrollen (Wiederholungs-MAL-Logs). Ihnen liegen feststehende physikalische Prinzipien zugrunde und ihre Ergebnisse sind jederzeit reproduzierbar.

Als diesbezüglich unzureichend sind alle nicht reproduzierbaren Vorgehensweisen anzusehen. Hierzu gehören z. B.:

- ausschließlich volumetrische Vergleiche ohne messtechnische Kontrolle,
- die sog. „automatische Abdichtungskontrolle“ (Druckmessungen zur Füllstandskontrolle unter undefinierten Randbedingungen),
- oder eine „Vieraugenkontrolle“ durch Hinzuziehung unabhängiger Baubeobachter,

bei denen inhomogene Lagerungen des Verfüllgutes, Brücken- u. Pfropfenbildungen, sekundäre Hinterfüllungslücken, Fehlstellen und diesbezügliche nachträglich auftretende Veränderungen nicht erfasst werden.

Hinsichtlich der technischen Durchführbarkeit und Sinnhaftigkeit der durchzuführenden Messungen müssen die baulichen Besonderheiten der unterschiedlichen Arten von Erdwärmesonden beachtet werden.

18.3.2 Nachweis der physischen Existenz von Abdichtungen

18.3.2.1 Abdichtungsnachweise in U-Sonden

In ihrer überwiegenden Mehrzahl erfolgt die Gewinnung Oberflächennaher Erdwärme mithilfe sog. U-Sonden. In diesen Sonden ist die Anwendung der o. g. Methoden jedoch nur theoretisch immer möglich, da diesem Einsatz die teilweise erheblichen Befahrbarkeitsprobleme der U-Rohre gegenüberstehen.

Hervorgerufen wird das durch einen zumeist undefinierten, vielfach gebogenen Verlauf, ausgeprägte Biegeradien und die sehr kleinen Durchmesser der U-Rohre. Dadurch sind darin nur Messungen mit sehr kurzen, dünnen Messsonden möglich. Bei U-Rohr-Nennweiten von 26 mm sollte deren Durchmesser 15 mm nicht überschreiten. Starre Messgeräte mit größeren Längen als 25–30 cm können verklemmen, und selbst dann werden die Endteufen der Rohre oft nicht erreicht. Beispiele dieser Miniaturmesssonden zeigt Abb. 18.5.

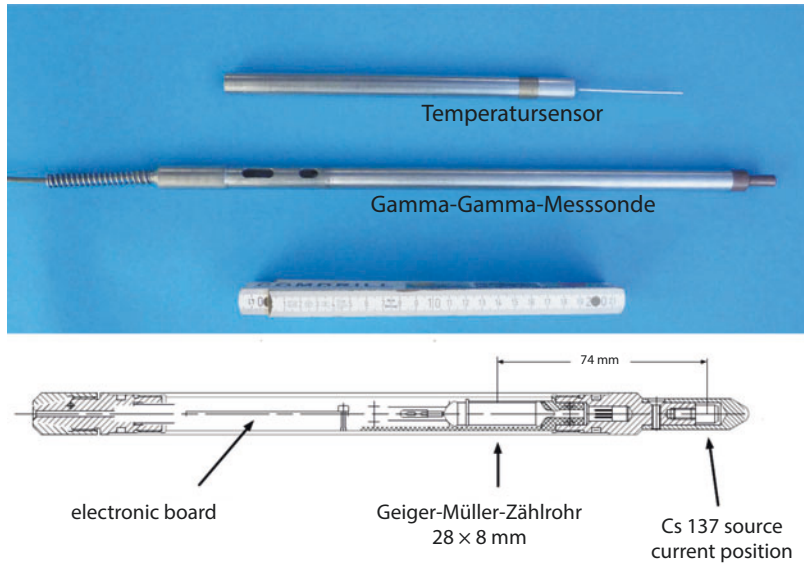


Abb. 18.5 Temperatur- und Gamma-Gamma-Miniatursonde (oben) sowie Bauweise einer Gamma-Gamma-Miniatursonde (unten)

Mit diesen geringen Abmessungen sind derzeit nur Temperatur-, Gamma-Ray- und Gamma-Gamma-Sonden sowie Messonden der magnetischen Suszeptibilität verfügbar. Bauartbedingt (technisch kompliziert, hohe Kosten der Quellen bzw. Generatoren) sind derart miniaturisierte Messgeräte für die Durchführung von Neutron-Neutron-Logs, die ein universelles Nachweisverfahren für bindige Abdichtungen aller Art darstellen, gegenwärtig nicht erhältlich.

Nachstehend soll daher das Augenmerk auf Gamma-Ray-, Gamma-Gamma- sowie Magnetlogs und deren Einbindung in den Bauablauf gelegt werden. Ihre Anwendung setzt voraus, dass entweder größere Dichteunterschiede infolge von Materialdefiziten im Ringraum vorhanden oder/und die Abdichtmaterialien radioaktiv oder magnetisch markiert sein müssen. Ein ausreichend hoher Kontrast zu den entsprechenden Parametern der von der Bohrung aufgeschlossenen Abfolge gewährleistet dann den zweifelsfreien Nachweis der Abdichtung oder die Detektion ggf. vorhandener Fehlstellen. Die o. g. Kontraste erfordern jedoch nicht nur eine hohe Konzentration der jeweiligen Markierungen, sondern bei weitgehend gleichmäßiger Verteilung auch ausreichend große Volumina der entsprechenden Substanz.

Eine zusätzliche Einschränkung der in den kleinkalibrigen U-Sonden anwendbaren Methoden ergibt sich hinsichtlich der Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit Messungen in weiteren Erdwärmesonden, da die Detektoren der Miniaturmesssonden nur schwer bis gar nicht in quantitativen Einheiten kalibrierbar sind. Das betrifft vor allem die Dichte und die magnetische Suszeptibilität, die diese lediglich als Impulsmessungen oder hinsichtlich ihrer relativen Änderungen registriert werden können.

Messung der natürlichen Gammastrahlung, GR-Log

GR-Logs sollten immer nur für den Nachweis gammastrahlungsaktiv markierter Verfüll- bzw. Verpressgüter eingesetzt werden (z. B. bei Markierung mit Monazitsand o. ä. oder Verwendung von gammastrahlende Tonen und Dämmern). Selbst dabei kann es bei hohem Gammastrahlungshintergrund des Gebirges vorkommen, dass infolge der sich in diesem Falle überlagernden Strahlungen beider Einflussfaktoren das Ergebnis nicht eindeutig ist, was durch Abb. 18.6 für einen Brunnen demonstriert wird.

Im hier ausgeprägt bindig überprägten Teufenabschnitt des Gebirges zwischen ca. 12–14 m und 24 m ist der hinterfüllte Abdichtton kaum bis gar nicht vom Gebirgseinfluss zu unterscheiden. Oberhalb von 12 m Teufe ergibt sich demgegenüber ein diesbezüglich eindeutiges Resultat. Das wird hier jedoch nur durch den Vergleich mit einem in der unverrohrten Aufschlussbohrung bzw. einem vor Einbringung des Abdichtgutes durchgeführtem GR-Log deutlich.

In der Praxis ist bei Erdwärmesonden diese Vorgehensweise nur selten realisierbar, da vor dem Einbau der U-Rohre so gut wie keine Messungen im offenen Bohrloch erfolgen. Die Folge sind diesbezüglich unscharfe Aussagen.

Gamma-Gamma-Messung, GG-Log

Für die o. g. Gamma-Gamma-Miniatursonden in Erdwärme-U-Rohren (vgl. auch Abb. 18.5) besteht angesichts zu geringen Abstandes zwischen Quelle und Detektor kein quantitativ sicher auswertbarer Zusammenhang zwischen den Messwerten und der Dichte. Beide sind bei dieser Messgeometrie jedoch zueinander direkt proportional, und die registrierten Impulse können Dichteänderungen qualitativ sicher zugeordnet werden. Quantitative Angaben zu den realen in-situ-Dichten wie beim Einsatz entsprechender konventioneller Messsonden (vgl. Abb. 18.2) ergeben sich nicht.

Für die betreffende U-Sonde sind diese Messwerte jedoch insofern repräsentativ, als dass sie die Situation zum Zeitpunkt der Messdurchführung widerspiegeln. In Abb. 18.7 wird ein derartiges Ergebnis der daraus resultierenden Modellvorstellung gegenübergestellt.

Zwischen 7 und 22 m Teufe wird dort durch deutlich verminderte Impulsraten ein vermutliches Materialdefizit im Ringraum der Erdwärmesonde angezeigt. Oberhalb davon sowie bis in eine Teufe von ca. 44 m unterhalb davon treten z. T. ebenfalls etwas verminderte Messwerte auf. Das deutet hier jeweils auf abschnittsweise gering materialdefizitäre Zonen hin. Vorstellbar ist ansonsten, dass sich oberflächennah ein ausgehärteter Pfropfen des Hinterfüllguts ausgebildet hat, der dort durch seine Mantelreibung festgehalten wird. Unmittelbar darunter ist das Abdichtmaterial in einem noch nicht ausgehärteten Zustand abgerutscht und hat einen vermutlich kavernösen Abschnitt aufgefüllt. Belastbar ist diese Interpretation nicht. Dazu hätte es zumindest des Nachweises der Kaverne mithilfe eines Kaliberlogs im offenen Bohrloch bedurft. Gleichermaßen wäre auch hier der Vergleich mit einer Gamma-Gamma-Nullmessung vor Einbau der Abdichtung hilfreich gewesen.

Für weitere Vergleiche und spätere Überprüfungen sind derartig unkalibrierte Messungen in Impulsen je Sekunde (cps) nicht verwertbar. Sie sind mehrdeutig, vom verwendeten Messsondenexemplar und der aktuellen Stärke der eingesetzten Strahlungsquelle

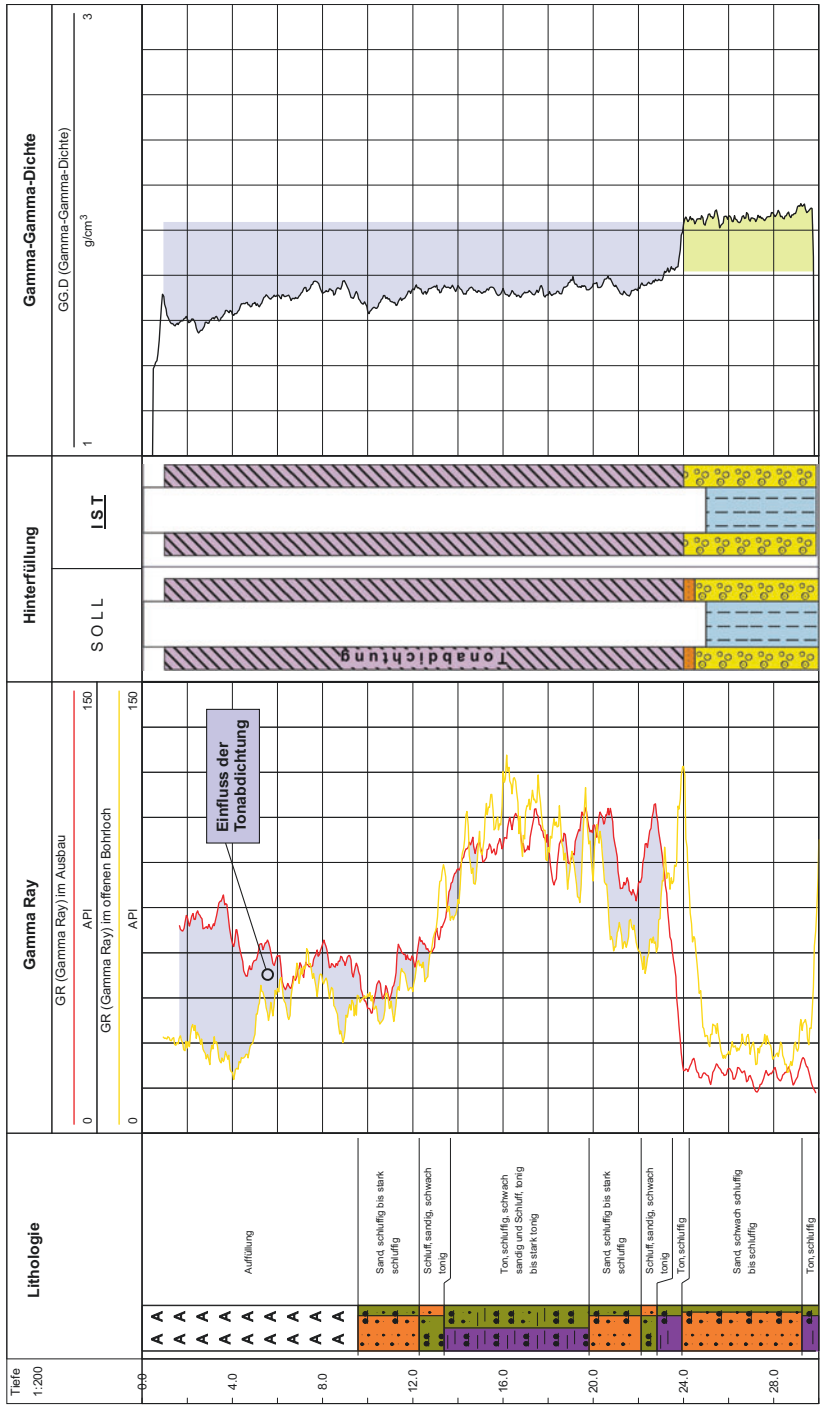


Abb. 18.6 Beispiel Abdichtungskontrolle – Messung der natürlichen Gammastrahlung

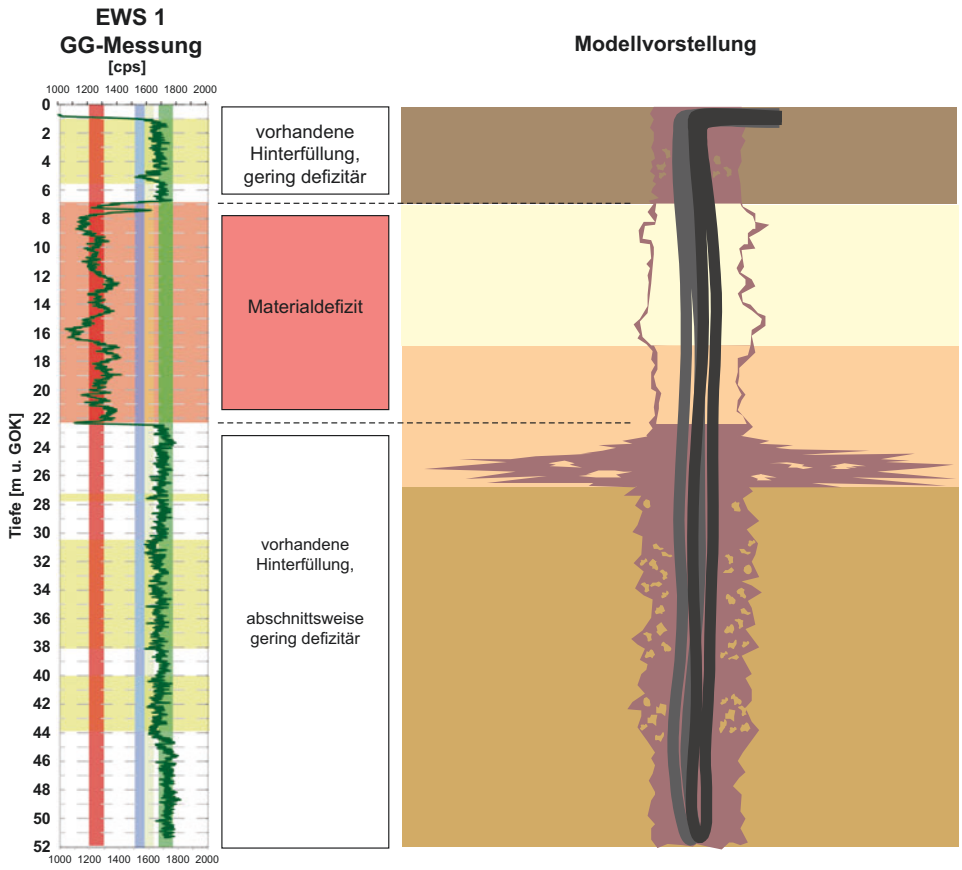


Abb. 18.7 Hinterfüllungskontrolle in einer U-Sonde mit Gamma-Gamma-Messung nach Voelker u. Voutta

abhängig, darüber hinaus nicht zwischen einzelnen Erdwärmesonden vergleichbar und quantitativ nicht auswertbar. Für ein Screening des „ersten Anscheins“ sind sie durchaus tauglich und oft auch unverzichtbar.

Messung der magnetischen Suszeptibilität, MAL-Log

Neben den bereits für Brunnenabdichtungen verwendeten, mit Magnetit versetzten Abdichttonen sind in letzter Zeit weitere magnetisch dotierte und speziell für die Abdichtung von Erdwärmesonden verwendbare Materialien entwickelt worden. Der Nachweis dieser Materialien ist entsprechend einfach und zudem sehr eindeutig mithilfe von Suszeptibilitätsmessungen möglich. Voraussetzung dafür ist auch hier die Realisierung eines ausreichend großen Verfüllvolumens (Triller 2016).

Das Beispiel der Abb. 18.8 zeigt eine derartige Messung in einer U-Sonde in Gegenüberstellung zu den hier nur wenig aufgelösten Messungen des Gamma-Gamma- und

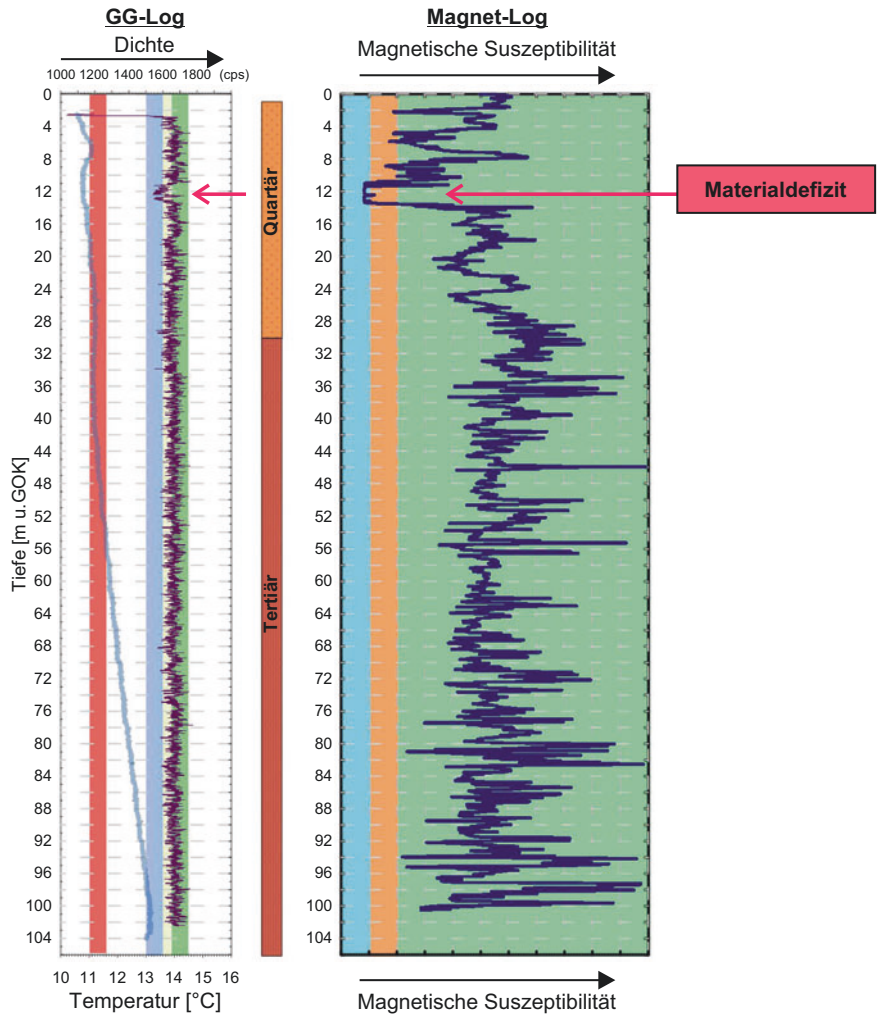


Abb. 18.8 Hinterfüllungskontrolle – Nachweis magnetisch markierter Hinterfüllungen

eines Temperaturlogs. Stark herabgesetzte magnetische Suszeptibilitäten um 12 m Teufe verweisen auf einen hier im Ringraum auftretenden materialdefizitären Bereich.

Angesichts dieser eindeutigen Nachweismöglichkeit bietet es sich an, den Verfüllvorgang des Ringraums der U-Rohre mithilfe derartiger Messungen in situ zu überwachen.

Abb. 18.9 zeigt dazu ein Beispiel, bei dem die Magnet-Log-Sonde in größerer Teufe im Ringraum positioniert worden war (hier bei 60 m). Danach wurde mit dem Verfüllvorgang begonnen, wobei dieser so lange fortgesetzt wurde, bis der Magnetsensor reagierte. Danach wurden der Sensor in eine flachere Teufe versetzt (hier zunächst 55 m) und weiter verfüllt, bis wiederum eine Indikation entstand. Diese Verfahrensweise setzte sich bis zur Erreichung der Geländeoberkante fort. Gleichzeitig dazu werden Injektionsrate und

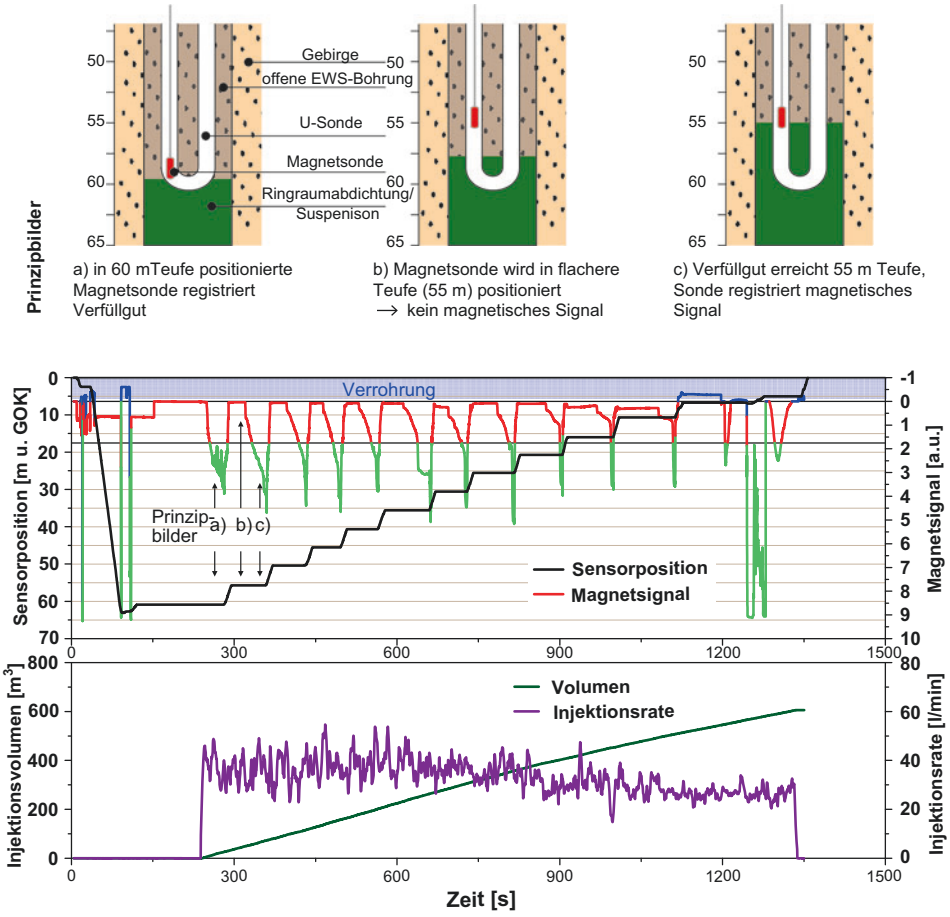


Abb. 18.9 Kontrolle der magnetisch markierten Abdichtungen während Verfüllung

Verfüllvolumen mithilfe eines magnetisch induktiven Durchflussmessers registriert. Nach abgeschlossenem Verfüllvorgang sollte sofort oder/und wenige Tage später eine nochmalige Kontrollmessung der Verfüllung erfolgen, um Setzungen, Pfropfenbildungen u. ä. zu dokumentieren oder auszuschließen.

Das Beispiel zeigt den weitgehend problemlosen Nachweis des im Ringraum aufsteigenden magnetisch markierten Abdichtmaterials. Es resultieren gut aufgelöste und bereits auf der Baustelle auswertbare Messergebnisse, die gewissermaßen in „Echtzeit“ zeigen, inwieweit die Verfüllung des Ringraums gelungen ist oder nicht.

Plausibilität der Messergebnisse

Erfahrungsgemäß entstehen Zweifel an der Qualität der Erdwärmesondenanlage zumeist erst bei auftretenden Problemen, Funktionsstörungen oder zu hohem Energieverbrauch;

d. h., in der Regel nach deren Fertigstellung. Die Überprüfungs- und Reparaturmöglichkeiten sind dann oft eingeschränkt bzw. bei Überbauung gar nicht mehr möglich.

Bei noch bestehender Zugänglichkeit können die U-Sonden durchaus noch messtechnisch kontrolliert werden. Sinnvoll ist zuvor der Austausch des Kältemittels gegen Wasser. Die Praxis zeigt dabei jedoch, dass die Sonden zumeist mit unmarkierten Suspensionen verfüllt worden sind. Es existieren in der Regel auch keine Nullmessungen in der offenen Erdwärmebohrung bzw. in den U-Rohren vor Einbringung der Suspension, die zu Vergleichszwecken herangezogen werden könnten.

Angesichts dessen sind die gewinnbaren Überprüfungsresultate oft mehrdeutig und von nur geringer bis gar keiner Beweiskraft. Das gilt vor allem auch deshalb, als dass für die genannten Messungen grundsätzlich die Lage der Messsonde im System aus U-Rohren und Abdichtgut bestimmend ist und dadurch die sehr hohe Sensitivität der Verfahren gegenüber Änderungen der Messgeometrie oft zu nicht von vornherein erklärbaren Anomalien im jeweiligen Messkurvenverlauf führt. Die Messergebnisse verlieren dabei zusätzlich an Aussagekraft.

Die Abb. 18.10 zeigt diese in der Praxis übliche Situation wechselnder Messgeometrie und die dabei von den MAL-, GR-und GG.D-Logs erfassten Bereiche im Unterschied zur ideal senkrecht eingebauten und allseitig homogen vom Abdichtgut umgebenen U-Rohr-Installation. Es entstehen materialdefizitäre Bereiche bis hin zu Hinterfüllungslücken, in denen die Restvolumina selbst intensiv markierter Abdichtmaterialien nicht mehr

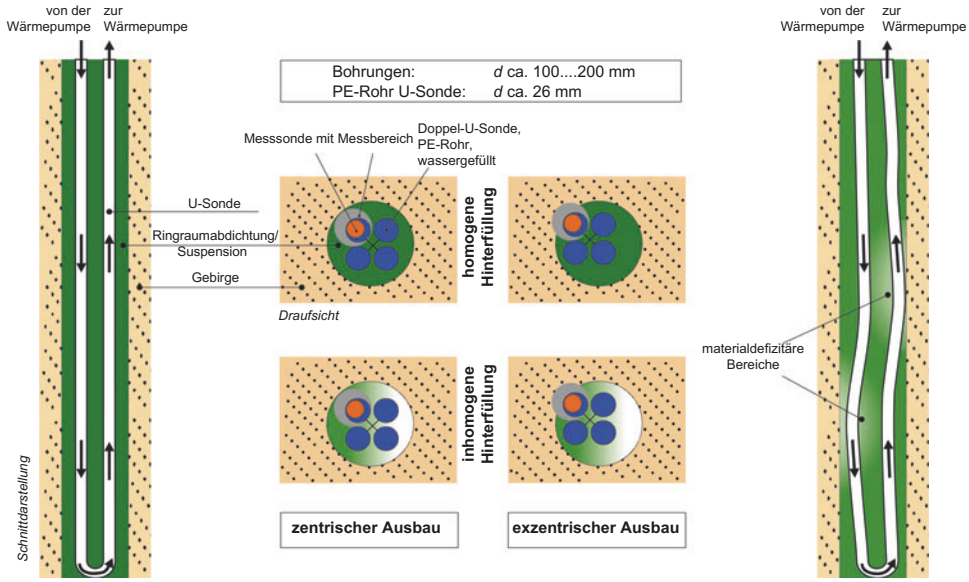


Abb. 18.10 Einflüsse der Erdwärmesonden-Bauweise (U-Sonde) auf die Messgeometrie

nachweisbar sind. Die Plausibilität der unter diesen Randbedingungen in U-Sonden gewonnenen Kontrollmessergebnisse ist angesichts dieses nahezu generellen Sachverhalts immer mehr oder minder eingeschränkt. Der nachträgliche Nachweis des Abdichtmaterials im Ringraum von Erdwärmesonden ist dadurch nicht immer zweifelsfrei. Zusätzlicher Erkenntnisgewinn kann sich dabei jedoch durch ergänzende Untersuchungen mithilfe spezieller Temperaturmessmethoden (s. u.) ergeben.

18.3.2.2 Abdichtungsnachweise für alternative Bauweisen

Alternativ zu den U-Rohrsonden können Erdwärmeanlagen als Ringrohrsonden- oder/und Koaxialsondensysteme errichtet werden. Plausibilitätsprobleme der o.g. Art treten dann nicht mehr oder nur noch sehr selten auf.

Da es trotz unterschiedlicher Bauart in diesen Fällen infolge größerer Ausbaudurchmesser immer möglich ist, geophysikalische Kontrollmessungen durchzuführen, ohne dass dabei Sonderausrüstungen verwendet werden müssen, vergrößert sich das Spektrum der Kontrollmöglichkeiten erheblich. Es können alle bereits o. g. im Brunnenbau üblichen Methoden angewandt werden. Auf ihre gegenüber dem Einsatz miniaturisierter Messsonden generell besseren Aussagemöglichkeiten sei hier nochmals nachdrücklich hingewiesen.

Die entsprechenden Ergebnisse sind sehr viel stärker als die in U-Sonden ermittelten Resultate belastbar und in der Regel weitgehend zweifelsfrei. Sie erfolgen unter definierten Randbedingungen und sind durch Wiederholungsmessungen jederzeit reproduzierbar.

Hierbei können diese Kontrollen sowohl in den neu errichteten Erdwärmesonden als auch im laufenden Betrieb (bei Koaxialsonden nach vorhergehendem Ausbau des Innenrohres), beispielsweise im Rahmen eines Überwachungsmonitorings, durchgeführt werden. Voraussetzung dafür ist die dauerhafte Zugänglichkeit der Sondenanlagen.

In Abb. 18.11 werden diese Alternativen zu den U-Sonden und die erfassten Messquerschnitte nochmals exemplarisch dargestellt.

18.3.3 Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit von Abdichtungen

Der Nachweis des ausreichenden und fehlstellenfreien Vorhandenseins von Abdichtmaterial im Ringraum von Erdwärmesonden ist ein erster, notwendiger Schritt der messtechnischen Kontrolle – hinreichend ist das jedoch in keinem Falle.

Hierzu muss man sich eines Messverfahrens bedienen, das sowohl durch die eingebauten Rohre „hindurchsieht“ als auch so sensitiv ist, dass auch noch geringste Strömungen in seinem Messergebnis sichtbar werden. Temperaturmessungen haben diese Eigenschaften.

Nachstehend soll daher anhand der speziellen Nutzung und Auswertung von Messungen der Temperatur gezeigt werden, wie zusätzlich zu den o. g. notwendigen Nachweisen und im Kontext dazu auch der letztendlich hinreichende Nachweis der hydraulischen Dichtheit der Ringraumabdichtung erbracht werden kann.

Grundlage der entsprechenden Messungen, deren mehr oder minder stark ausgeprägte Indikationen sich im Sinne der Aufgabenstellung hydrodynamisch und zudem oft auch

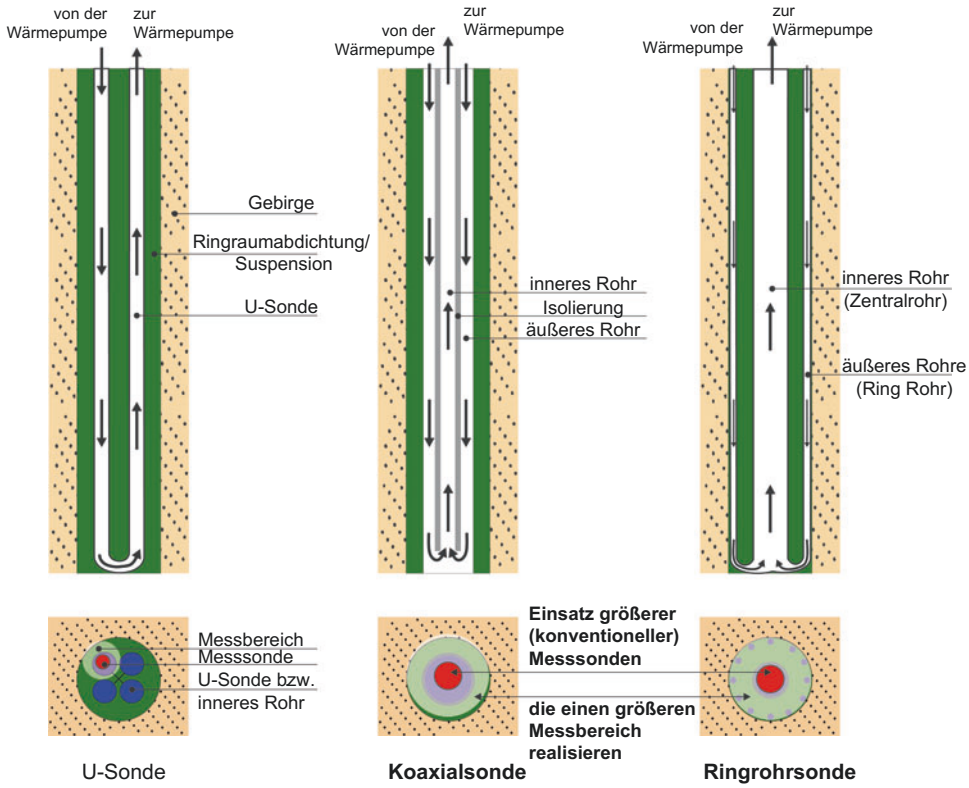


Abb. 18.11 Messgeometrie bei Verwendung alternativer Bauweisen

quantitativ auswerten lassen, sind die durch Fluidbewegungen innerhalb des Abdichtgutes entstehenden Störungen des Temperaturgradienten.

Hierfür sind

- Temperatur-Einzel-Logs (TMP-Logs, TMP-Monitorings),
- (kurzzeitige) Thermal-Response-Tests (K-TRT)
- und festinstallierte faseroptische TMP-Messsysteme

geeignete Messmethoden, die im Folgenden an einigen Beispielen erläutert werden sollen.

18.3.3.1 Nachweis frei zirkulierender Fluide

Das Auftreten frei beweglicher Wässer im Ringraum von Erdwärmesonden kann unaufwendig und qualitativ bereits anhand einer Temperaturmessung und ihrer Indikationen festgestellt werden. Insbesondere wird das daran deutlich, dass sich die registrierten Messwerte innerhalb größerer Teufenabschnitte nicht bzw. kaum ändern und dadurch stark vom ungestörten Temperaturgradienten abweichen. Das ist in der Regel ein Anzeichen

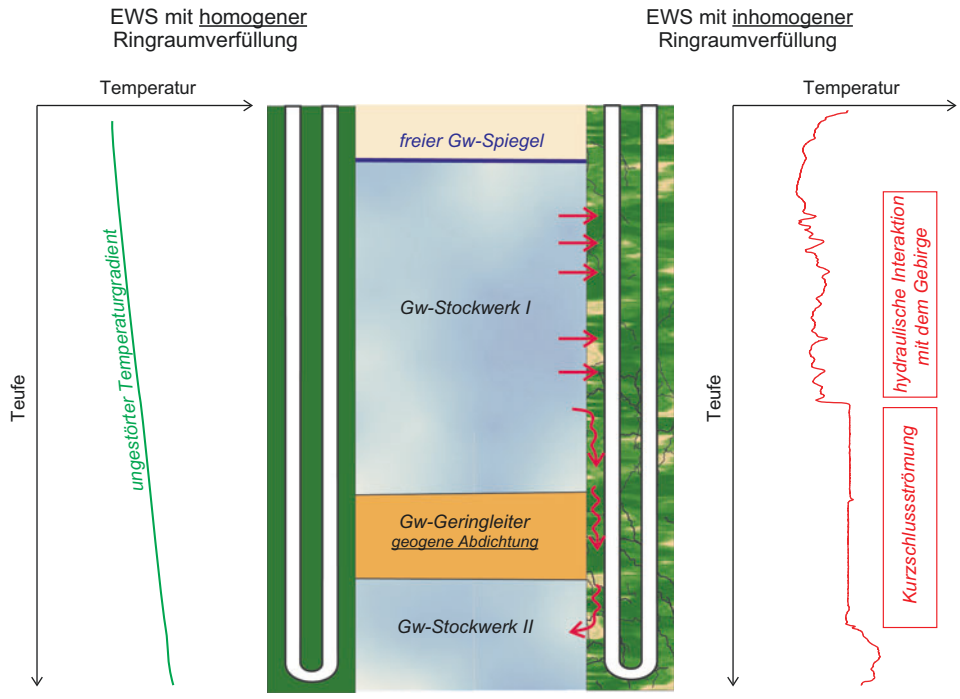


Abb. 18.12 Schematische Temperaturverläufe in homogen und inhomogen verfüllten Erdwärmesonden-Ringräumen

dafür, dass die Qualität zufließenden Wassers mit einer Kurzschlussströmung über die Teufe verschleppt wird. Zusätzliche Messindikationen verweisen auf dortige hydraulische Kopplung zwischen dem wasserführenden Gebirge und ggf. vorhandenen Fehlstellen der Abdichtung (vgl. Abb. 18.12).

Ein weiterer und zumeist signifikanter Nachweis von Undichtheiten im Hinterfüllgut von Erdwärmesonden ergibt sich aus sog. Kurz-Thermal-Response-Tests (KTRT). Dabei wird im Anschluss an eine Temperaturmessung im unbeeinflussten Ruhezustand der Erdwärmesonde deren Hinterfüllung durch einen vergleichsweise kurzzeitigen Energieeintrag von ca. 2 Std. aufgeheizt und durch parallel dazu durchgeführte Temperaturlogs überwacht. In der sich an das Aufheizen anschließenden Abkühlphase werden über 3–4 Std. ebenfalls Temperaturmessungen durchgeführt und das Wiederangleichen der Temperaturen an die geogene Umgebung beobachtet (Abb. 18.13). Alle diese Messergebnisse werden in einen Kontext gestellt, wodurch die Bewegung freier Fluide (z. B. keine Anzeichen von Erwärmung beim Aufheizen) im nicht bzw. ungenügend abgedichteten Ringraum, ggf. aufgetretener Suspensionsmehrverbrauch u. a. auf Fehlstellen der Abdichtung verweisende Temperaturanomalien sichtbar werden (Voelker und Voutta 2011, 2013). Abb. 18.14 zeigt dazu entsprechende Beispiele.

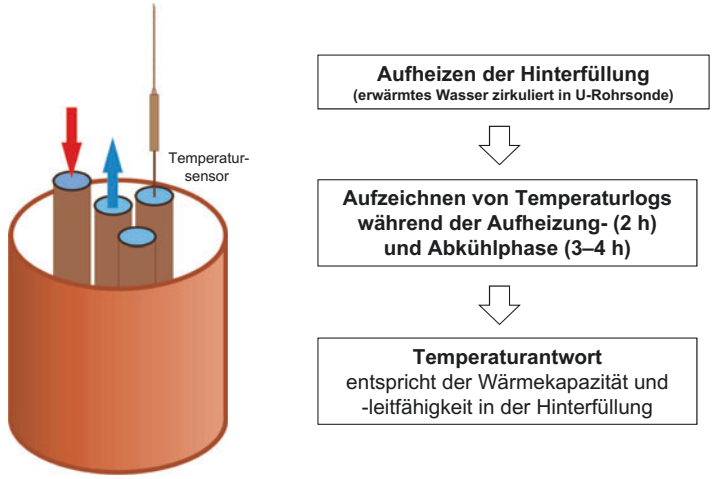


Abb. 18.13 Prinzip von Kurz-Thermal-Response-Test (KTRT)

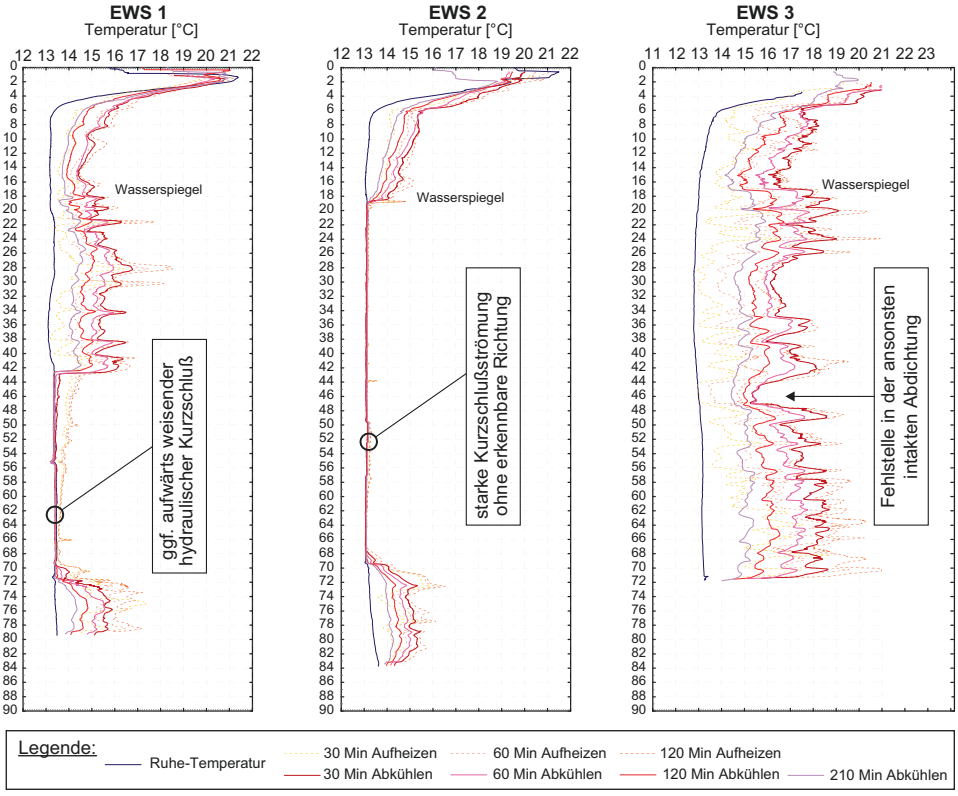


Abb. 18.14 Ergebnisse von Kurz-Thermal-Response-Tests

18.3.3.2 Nachweis von Diffusions- und Konvektionsströmungen in Abdichtungen

Zusätzlich zu den o. g. Nachweismethoden von in aller Regel weitgehend ungehindert und dadurch schnell vonstatten gehender Wasserbewegungen innerhalb lückenhafter Abdichtungen ist es oft erforderlich, sehr langsame, durch Diffusion und/oder Konvektion hervorgerufene Strömungen zu detektieren, die ebenfalls, wenngleich auch zeitverzögert, Abdichtungen negativ beeinflussen.

Für die Untersuchung des sog. *leaky aquifers* (Grundwassergeringleiter, vgl. Abb. 18.15) wurde ein Verfahren entwickelt, das die vertikale, stationäre und nichtisotherme Strömung eines Fluids in einer geringdurchlässigen Schicht berücksichtigt. Es findet angesichts der Analogie der Verhältnisse zu Oberflächenabdichtungen von Brunnen und Messstellen zwischenzeitlich breite Anwendung bei der Überprüfung von deren hydraulischer Wirksamkeit (Lux und Scheffel 2002) und kann aus gleichem Grund auch auf Abdichtungen von Erdwärmesonden übertragen werden.

Den innerhalb dieser Abdichtungen gleichzeitig auftretenden Wärme- und Fluidtransport beschreiben Bredenhoeft und Papadopulos (1965) durch ein Randwertproblem, dessen Lösung zu der in Abb. 18.16 dargestellten Typkurvenschar (T_D dimensionslose Temperatur, z_D dimensionslose Teufe) führt.

Die Krümmung dieser Kurven ist ein Maß für den Betrag der Geschwindigkeit v_Z des Fluids und zeigt gleichzeitig durch das Vorzeichen des Kurvenparameters $1/\Theta$ deren Richtung innerhalb der gering durchlässigen Schicht bzw. innerhalb der Abdichtung an. Negative Vorzeichen verweisen auf eine Strömung vom Liegenden zum Hangenden,

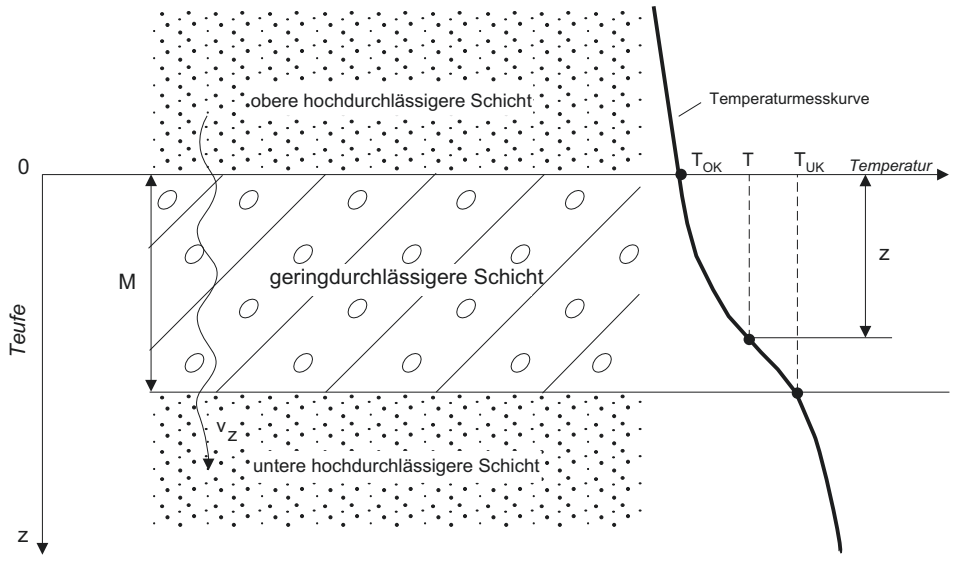


Abb. 18.15 Konvektionsströmung in Grundwassergeringleitern und ihre Abbildung in Temperaturmessungen (schematisch)

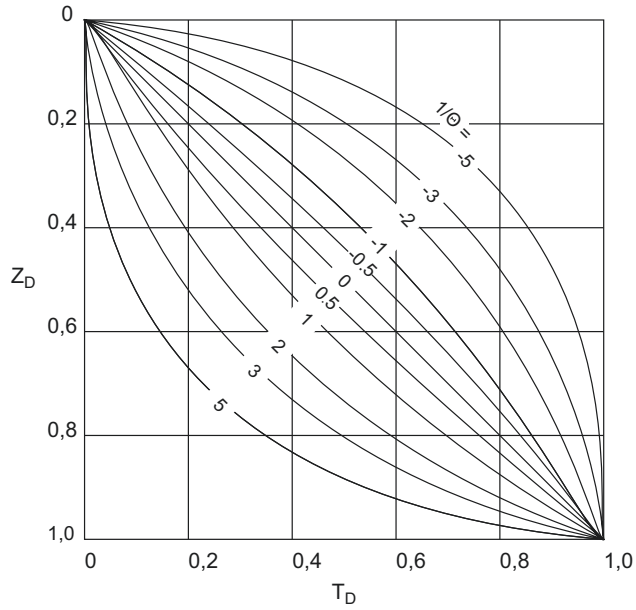


Abb. 18.16 Typkurven zur Ermittlung der Geschwindigkeit vertikaler Strömungen in Grundwassergeringleitern. (Nach Bredenhoeft und Papadopulos 1965)

positive Vorzeichen zeigen die umgekehrte Richtung an. Der Wert $1/\Theta = 0$ bedeutet, dass keine Strömung auftritt – der Bereich ist hydraulisch dicht.

Für den interessierenden Untersuchungsabschnitt wird aus dem gemessenen Temperaturverlauf der Parameter $1/\Theta$ mithilfe der o. g. Typkurven ermittelt und daraus die Geschwindigkeit des Fluids in z-Richtung unter Berücksichtigung jeweils zutreffender Stoffkenngrößen (Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität des Wassers, vgl. Häfner und Vogt 1983) berechnet.

Für die derart nachgewiesene Strömung parallel zur Teufenachse ist es unerheblich, durch welche Ursachen sie zustande kommt – ihr Vorhandensein in einer bestimmten Größenordnung und ab- oder aufwärts weisender Richtung ist alleiniges Merkmal für die hydraulische Unwirksamkeit einer Abdichtung.

Ist eine solche Strömung nicht vorhanden, so kann das entsprechende Hinterfüllgut im Ringraum als vollkommen hydraulisch dicht angesehen werden. Das gilt in der Praxis näherungsweise auch noch dann, wenn die Geschwindigkeit einer dennoch nachweisbaren Strömung unterhalb eines festzulegenden Schwellenwertes liegt. Für praktische Belange können z. B. die Schwellenwerte aus Tab. 18.1 angenommen werden.

Die für eine Erdwärmesonde und deren Abdichtung gerade noch zulässige Geschwindigkeit v_z wird durch die örtlichen Anforderungen an das Bauwerk, die Länge der Abdichtstrecke und die vertikale Durchlässigkeit im Gebirge bestimmt. Ihr Schwellenwert ist ein Entscheidungskriterium für den ggf. nötigen Rückbau der Sonde, soweit

Tab. 18.1 Schwellenwerte der Strömungsgeschwindigkeit für die Praxis

Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	Strömungsgeschwindigkeit [m/a]	Durchlässigkeit
$v_z \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s	<0,03 m/a	Annähernd dicht
$1 \cdot 10^{-9}$ m/s $\leq v_z \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s	0,03–0,30 m/a	Gering durchlässig
$v_z \geq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s	>0,30 m/a	Weitgehend durchlässig
$v_z \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s	>3,30 m/a	Durchlässig

das möglich sein sollte. Erfolgt kein Rückbau, ergibt sich angesichts der geringen Sickerwassergeschwindigkeiten ein in der Regel lang anhaltendes Gefährdungspotential.

Temperaturmessungen und ihre Auswertung in der o. g. Weise sind sowohl in U-Sonden mit entsprechend gering dimensionierten Messgeräten als auch in Koaxial- und Ringrohrsondensystemen mithilfe herkömmlicher Temperaturlogs durchführbar. Hierbei ist es in den beiden letztgenannten alternativen Bauweisen von Erdwärmesonden infolge ihres größeren Ausbaudurchmessers möglich, im Anschluss an eine Nullmessung der Temperatur über einen längeren Zeitraum ein sog. Temperaturmonitoring durchzuführen und mit dieser Nullmessung zu vergleichen. Gegenüber Einzelmessungen in den U-Rohrsonden ergibt sich dabei eine höhere Aussagesicherheit. Darüber hinaus zeigen die zeitlich gestaffelten Temperaturmesskurven im Beobachtungszeitraum oft teufenkonstant auftretende Anomalien, die bei lückenhafter Abdichtung auf eine hydraulische Interaktion mit dem umgebenden Gebirge verweisen.

Das folgende Beispiel zeigt, dass die Methode dieses Monitorings auch auf Messungen mit festinstallierten Glasfaserkabeln angewendet werden kann.

Im Bereich einer Wohnanlage mit einer Vielzahl von Erdwärmesonden wurden in den beiden Sonden A und B Glasfaserkabel fest installiert und die damit registrierten Temperaturen eines dreijährigen Beobachtungszeitraums ausgewertet. Die Messungen wurden in diskreten Abständen im Frühjahr, Herbst und Winter durchgeführt. Hierbei erfolgte die Nullmessung im Dezember 2007, weitere Registrierungen liegen für Mai und November 2010 und für Januar 2011 vor. Für die Sonde A werden die entsprechenden Messergebnisse in Abb. 18.17 dargestellt.

Die quantitative Auswertung der Messkurven ergibt für den Anfangszustand über das gesamte Teufenintervall zwischen ca. 10 m und 100 m eine Geschwindigkeit der im vorliegenden Fall vom Hangenden zum Liegenden gerichteten Konvektionsströmung von $v_z = 6,4 \cdot 10^{-9}$ m/ s (ca. 0,5 mm/d), was mit dem entsprechenden Wert der Strömung in der hier nicht mit dargestellten Nachbarsonde B völlig identisch ist. In den Folgebeobachtungen ändert sich v_z in Sonde B nicht, das lässt angesichts der o. g. Identität in beiden Fällen auf eine geogene Ursache dieser Strömung schließen.

Auf die hier gezeigte Sonde A trifft das nicht bzw. nur auf die Teufenabschnitte unterhalb von 50 m zu. Oberhalb davon können demgegenüber deutliche Veränderungen beobachtet werden. Mit $v_z = 2,3 \cdot 10^{-8}$m/s ist dort im Mai 2010 die Sickergeschwindigkeit um mehr als eine Größenordnung höher als noch im Dezember 2007. Das ist

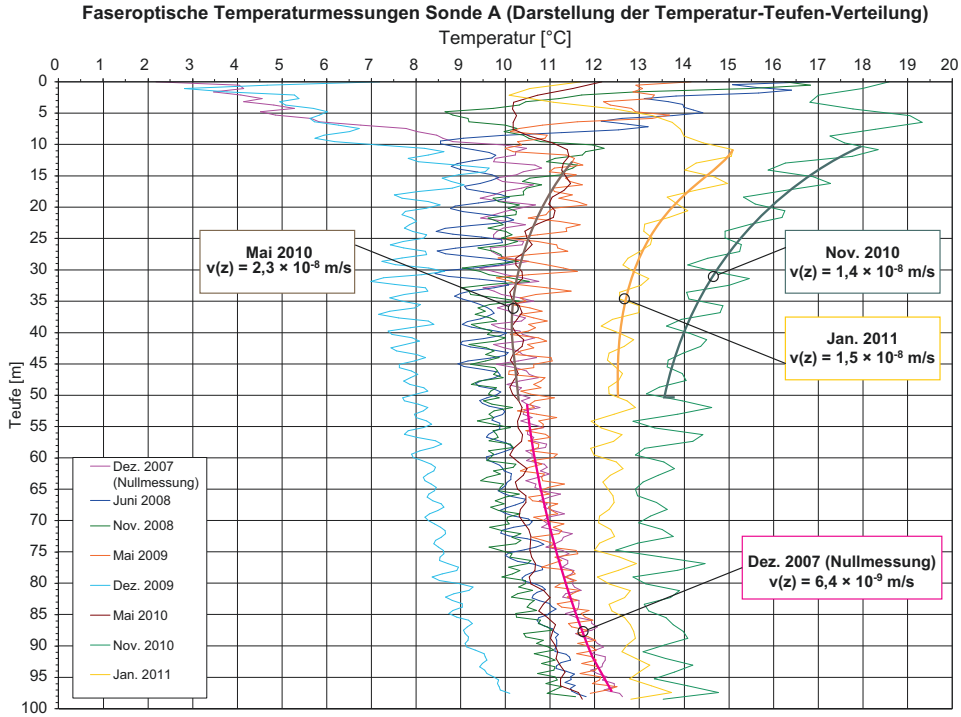


Abb. 18.17 Auswertung von mehrjährigen Temperaturmessungen einer EWS-Anlage mittels fest installiertem Glasfaserkabel

sowohl auf die Ausbildung einer Konvektionsströmung als auch, aber nur teilweise, auf den Messtermin zurückzuführen, der mit dem Ende der Grundwasserneubildungsperiode korrespondiert. Gleichermaßen tritt unterhalb von ca. 10 m Teufe eine Erwärmung auf. Beides deutet auf die zwischenzeitliche Ausbildung von Leckagen in der Abdichtung hin.

Bis in den Herbst 2010 wächst die o. g. Erwärmung im tagesnahen Bereich auf bis zu 8 °C an. D. h., es ist hier eine Aufsättigung innerhalb dieses Teufenabschnitts mit wärmerem Wasser des Sommers erfolgt, dessen Versickerung mit dem nunmehrigen Beginn der Neubildungsperiode in verstärktem Maße einsetzt. Dies und die Abnahme der Sickerwassergeschwindigkeit auf $v_z = 1,4 \cdot 10^{-8}$m/s im November 2010 infolge des vorangegangenen Trockenwetters können als weiterere Hinweise auf Konvektion in der sondennahen Umgebung gedeutet werden.

Die erneute leichte Zunahme dieser Geschwindigkeit auf $v_z = 1,5 \cdot 10^{-8}$m/s im Januar 2011 und die jetzt geringeren Temperaturen des versickernden Wassers verstärken diesen Eindruck. Die nachweisliche Korrespondenz der Sickerwassergeschwindigkeiten innerhalb des Ringraums der Sonde A mit der jahreszeitlich wechselnden Grundwasserneubildung und den damit verbundenen Niederschlagsereignissen ist damit als deutliches Anzeichen für die hydraulische Unwirksamkeit der dort eingebauten Abdichtung zu werten.

18.4 Optimierung der Kontrollmöglichkeiten

Mit Blick auf die oft fehlende Plausibilität der Ergebnisse des Nachweises von abdichtendem Material und dessen Verteilung im Ringraum von Erdwärmesonden sollten diesbezügliche ordnungsgemäße messtechnische Kontrollen bereits im offenen Bohrloch beginnen, um sich sowohl nach dem Einbau der Rohre als auch daran anschließend nach Einbringung des abdichtenden Materials fortzusetzen. Das gilt für die kleinkalibrigen U-Sonden und die alternativ dazu errichteten Ringrohr- und Koaxialsonden gleichermaßen.

Im offenen Bohrloch gehören hierzu die Ermittlung und Überprüfung des gebohrten Durchmessers und des untertägigen Bohrlochverlaufs, da für einen verwindungsfreien Einbau der Sondenkonstruktion sowohl ein möglichst lotrechter Verlauf der Bohrung als auch ausreichend große Ringräume zur Verfügung stehen sollten. Die Kenntnis des Durchmessers ist zudem für die Berechnung der nötigen Suspensionsmenge und entsprechende Bilanzbetrachtungen wichtig. D. h., im Bohraufschluss der Erdwärmesonde sollten ein Kaliberlog und Messungen von Richtung und Neigung durchgeführt werden, wobei die Kenntnis des untertägigen Verlaufs des Bohrlochs für den ggf. späteren Rückbau der Sonde wichtig ist.

Mithilfe von Messungen der natürlichen Gammastrahlung und des spezifischen elektrischen Gebirgswiderstandes werden die erbohrte Abfolge und deren Schichtgrenzen ermittelt, was vor allem in Spülbohrungen zur exakten Abgrenzung rolliger und bindiger Schichten dient. Auch diese Messungen sollten in der offenen Bohrung erfolgen.

Grundsätzlich vor Einbringung des gammaaktiv oder magnetisch markierten Abdichtmaterials in den Sondenringraum sollten Nullmessungen des jeweils für dessen Nachweis erforderlichen Messverfahrens durchgeführt werden. In den U-Sonden erfolgt das mithilfe der vorgestellten kleinkalibrigen Messsonden (GR- bzw. MAL-Log). Die Durchführung einer Gamma-Gamma-Messung in diesem Nullzustand ist bei diesen angesichts des starken Einflusses der Messgeometrie auf die Ergebnisse dieses Verfahrens ebenso nötig wie hilfreich.

In Ringrohr- und Koaxialsonden können für den Nachweis der Existenz des Abdichtgutes in Abhängigkeit von dessen Eigenschaften sowohl das allein auf dessen bindigen Charakter reagierende Neutron-Neutron-Log oder das für die jeweilige Markierungssubstanz geeignete Messverfahren eingesetzt werden.

Nach erfolgtem Einbau der Abdichtung sind deren Vorhandensein und Homogenität mithilfe exakt den jeweils gleichen Messungen wie vor Einbringung des Hinterfüllguts zu überprüfen. Die entsprechende Auswertung muss dabei im Kontext zu den Nullmessungen erfolgen.

Abschließende Kontrollmessungen stellen Temperaturlogs und Kurz-Thermal-Response-Tests dar, die sinnvollerweise in Korrelation mit Gamma-Gamma-Logs zur Überprüfung der hydraulischen Wirksamkeit und des lückenlosen Vorhandenseins der Erdwärmesondenabdichtung durchgeführt werden sollten.

Mit dieser komplexen Herangehensweise wäre es möglich, die eingangs bemängelte Qualität von Erdwärmegewinnungsanlagen grundlegend und jederzeit überprüfbar zu verbessern, wobei Letzteres die möglichst dauerhafte Zugänglichkeit der Sonden von über Tage voraussetzt.

Literatur

Bredenhoeft, J. D., Papadopulos, I. S.: Rates of vertical groundwater movement estimated from earth's thermal profile. Water Resources Res. Washington **1**(2), 325–328 (1965)

Lux, K. N.: Bohrlochgeophysik in Wassergewinnung und Wasserwirtschaft. In: DVGW Lehr- u. Handbuch der Wasserversorgung Bd. 1. Wassergewinnung und Wasserwirtschaft, S. 307–370. R. Oldenbourg Verlag, München (1996)

Lux, K.-N., Scheffel, I.: Temperaturmonitoring – Ein Verfahren zur Kontrolle der hydraulischen Wirksamkeit von Abdichtstrecken in Brunnen und Grundwassermeßstellen. In: bbr Wasser und Rohrbau, Heft 6.Verlagsges. Rudolf Müller, Köln (2002)

Triller, F.: Nachweis magnetisch markierter Baustoffe im Ringraum von Erdwärmesonden – Möglichkeiten und Grenzen des Magnetik-Logs. In: bbr Fachmagazin für Wasser und Leitungsbau, Heft 02, 2016. wvgw Wirtschafts- u S. 44–51. Verlagsgesellschaft Gas u. Wasser mbH, Bonn (2016)

Voelker, H., Voutta, A.: Erdwärmesonden: Nachweis der abdichtenden Wirkung der Ringraumhinterfüllung. In: bbr Fachmagazin für Wasser und Leitungsbau, Heft 12. wvgw Wirtschafts- u, S. 46–53. Verlagsgesellschaft Gas u. Wasser mbH, Bonn (2011)

Voelker, H., Voutta, A.: Überprüfung der Wirksamkeit einer Erdwärmesondensanierung. In: bbr Fachmagazin für Wasser und Leitungsbau, Heft 02. wvgw Wirtschafts- u, S. 30–35. Verlagsgesellschaft Gas u. Wasser mbH, Bonn(2013)

Vogt, H.-D., Häfner, F.: Grundlagen des Stoff- und Wärmetransportes in porösen Schichten. In: Z. f. angew. Geologie. Berlin **29**(9). 419–434 (1983)

Geothermische Messungen für die oberflächennahe Geothermie

19

Jens-Uwe Kühl und Clemens Lehr

Inhaltsverzeichnis

19.1 (Geo-)Thermal Response Test (GRT/TRT) 614
19.1.1 Was ist ein GRT/TRT? 614
19.1.2 Messtechnik/Apparatur 615
19.1.3 Vorbereitung/Voraussetzungen 616
19.1.4 Messdurchführung 617
19.1.5 Auswertung der Messdaten 619
19.1.6 Ergebnisdarstellung/-Verwendung 625
19.2 Spezial-GRT/TRT 626
19.2.1 Enhanced (Geo-)Thermal Response Test (EGRT, ETRT) 626
19.2.2 GRT/TRT für Energiepfähle 628
19.2.3 GRT/TRT für horizontale Erdwärmekollektoren 630
19.3 Temperaturprofilmessungen 631
19.3.1 Allgemeines 631
19.3.2 Messtechnik 631
19.3.3 Verwendung und Interpretation der Ergebnisse 632
Literatur 634

Zusammenfassung

Die Ergebnisse eines Response Tests lassen Rückschlüsse auf das geothermische Standortpotential zu und sind maßgebende Parameter einer softwaregestützten

Jens-Uwe Kühl (✉)
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH, H.S.W. Ingenieurbüro, Gerhart-Hauptmann-Str. 19, 18055 Rostock, Deutschland
e-mail: juk@hsw-rostock.de

Clemens Lehr
Am Taubenbaum 25a, 61231 Bad Nauheim, Deutschland
e-mail: c.lehr@geotechnik-lehr.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_19

Dimensionierung von Erdwärmeanlagen bzw. bilden die Grundvoraussetzung für die Berechnung des geothermischen Nutzungspotentials. Tiefendiskrete Temperaturmessungen haben sich im Rahmen der Durchführung von Response Tests etabliert und sind mittlerweile fester Bestandteil der In-situ-Bestimmung bemessungsrelevanter thermophysikalischer Untergrundparameter. Der Einsatz spezifischer Messtechnik und die nachfolgende Messdatenauswertung liefern Aussagen zu den thermophysikalischen Gebirgseigenschaften und können zur Qualitätskontrolle von Erdwärmanlagen genutzt werden.

Schlüsselwörter

Thermal Response Test · Temperaturmessungen · Messtechnik · Messdatenauswertung

19.1 (Geo-)Thermal Response Test (GRT/TRT)

19.1.1 Was ist ein GRT/TRT?

Unterschiede des sogenannten geothermischen Standortpotentials resultieren im Wesentlichen aus der ortsspezifischen Geologie und den damit verbundenen unterschiedlichen thermophysikalischen und thermohydrodynamischen Eigenschaften vorhandener Grundwasserleiter (Sande, Kiese, Klüfte) bzw. Grundwassergeringleiter (bindige Horizonte, Festgestein).

Für die Planung und Leistungsberechnung – insbesondere von mittleren bis großen Anlagen zur Nutzung der Oberflächennahen Geothermie – sind möglichst exakte Kenntnisse dieser Untergrundeigenschaften erforderlich.

Der Geothermal Response Test (GRT), auch Thermal Response Test (TRT), ist ein anerkanntes Verfahren zum In-situ-Nachweis bestimmter thermophysikalischer Untergrundparameter – insbesondere der „effektiven" (wirksamen) Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) der am Messstandort anstehenden geologischen Schichten. Der ermittelte Parameter wird als „effektiv" bezeichnet, da sowohl der konduktive als auch der advektive Wärmetransport in das Messergebnis einfließen.

Neben der effektiven Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) lässt sich im Rahmen eines GRT/TRT die mittlere Untergrundtemperatur (T_u) und der thermische Bohrlochwiderstand von Erdwärmesonden (R_b) bzw. der thermische Pfahlwiderstand von Energiepfählen $\left(R_p\right)$ ermitteln. Anhand der nachweisbaren Widerstände kann u. a. die Güte und Ausbauqualität der jeweiligen Erdwärmeübertrager abgeleitet werden.

Beim Response Test wird im Regelfall eine konstante Wärmemenge über einen Wärmeübertrager in den Untergrund eingetragen bzw. in seltenen Fällen auch Wärme entzogen und die „Temperaturantwort" (engl. *response*) gemessen.

Die Vorteile eines GRT/TRT im Vergleich zu Laboruntersuchungen an Bodenproben ist, dass die Messung bei quasi ungestörten Untergrundverhältnissen über die gesamte

Wärmeübertragerlänge durchgeführt wird und konstruktive Eigenschaften des Wärmeübertragers sowie geologische Besonderheiten mit in die Messung eingehen.

Im Allgemeinen kann nach Durchführung eines GRT/TRT auf Sicherheitszuschläge bei der Dimensionierung von Erdwärmeanlagen nach Literaturwerten verzichtet werden, was wiederum zu einem optimal auf das Versorgungskonzept abgestimmten Umfang der geothermischen Quellenanlage führt und somit ggf. Investitionskosten reduziert werden können. Andererseits ermöglicht der Geothermal Response Test eine Absicherung der in der Vorplanung abgeschätzten Bemessungsparameter.

Zunehmend wird ein Geothermal Response Tests von Seiten der zuständigen Genehmigungsbehörden im Zuge des wasserrechtlichen Antragsverfahrens gefordert, um bereits im frühen Planungsprozess einen wasserwirtschaftlich akzeptierten und nachhaltig effizienten Betrieb der Geothermieanlage sicherzustellen.

Bei der Durchführung dieser Messung muss aber das Verhältnis der Kosten des GRT zu den Kosten der geplanten Geothermieanlage gesehen werden. So sind die Kosten für den GRT bei kleineren Anlagen mit 10…30 kW nur schwierig als Teilplanungsleistung zu rechtfertigen. Anders wäre dies aber, wenn eine Erdwärmeanlage mit geringer Leistung aber mit langen Laufzeiten (z.B. als Grundlastanlage mit bis zu 3000 Vollbenutzungsstunden oder als IT-Kühlung ganzjährig) betrieben wird. Dann wird dem Untergrund trotz einer vielleicht geringen Leistung (kW) sehr viel Energie (kWh) entzogen bzw. injiziert. Auch bei kleineren Leistungen, aber komplexen Erdwärmesondenfeldern ist ein Response Test zu befürworten.

Empfehlenswert ist die Durchführung eines TRT/GRT ab einer Heiz-/Kühlleistung von 30 kW oder bei einer Heiz-/Kühlleistung zwischen 20 und 30 kW und mehr als 2400 Vollbenutzungsstunden oder bei einem Erdwärmesondenfeld von mehr als 6 Erdwärmesonden.

Die Anzahl der in Deutschland zurückliegend durchgeführten Response-Test-Messungen ist aufgrund der Vielzahl der Anbieter schwer zu schätzen, wird aber mit mehreren tausend Stück vermutet.

19.1.2 Messtechnik/Apparatur

Die Qualität der Messung und die Repräsentativität der daraus abgeleiteten Ergebnisse hängen maßgeblich von der verwendeten Messtechnik und dem Aufbau des Response-Test-Messgerätes ab. Die im Regelfall genutzte Messtechnik besteht aus mehreren Temperaturfühlern und mindestens einer Volumenstrommessung. Sämtliche Messeinrichtungen sollten fortlaufend kalibriert und messtechnisch rückgeführt werden.

Des Weiteren gehören zur Standardausrüstung einer Testeinheit unter anderem Heizaggregate in verschiedenen Leistungsbereichen, eine Umwälzpumpe, Volumenstromregler und ein Datenlogger. Hilfreich sind zusätzliche MSR-Einrichtungen zur Leistungsregelung sowie die Möglichkeit der Datenfernübertragung.

Der prinzipielle, schematische Aufbau einer Response-Testeinheit mit dem Anschluss an eine Test-Erdwärmesonde ist der Abb. 19.1 zu entnehmen.

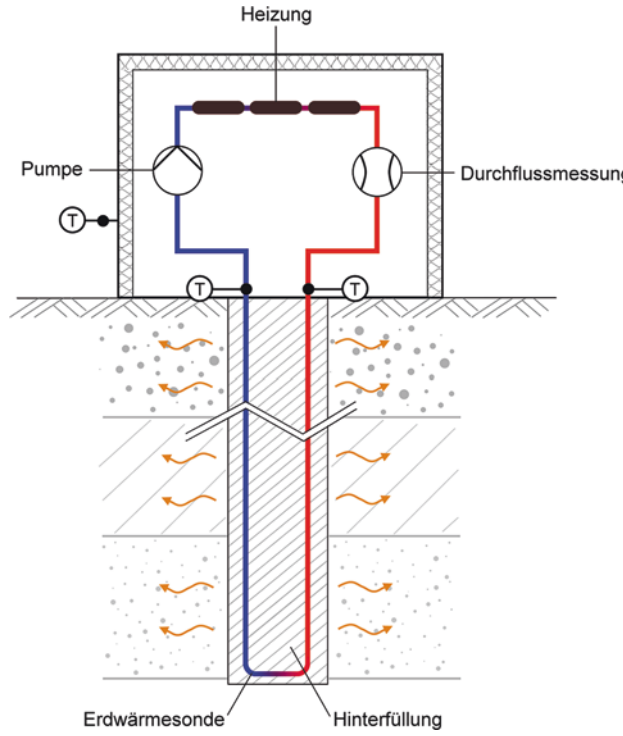


Abb. 19.1 Schematischer Aufbau einer GRT/TRT-Testapparatur

Im Rahmen der durchgeführten Messung sind grundsätzlich die Aufzeichnung von Vor- und Rücklauftemperatur (möglichst bodengleich), Volumenstrom, Lufttemperatur sowie Datum und Uhrzeit erforderlich.

Messstandorte befinden sich oft in schwer zugänglichen Bereichen ohne befahrbare Zuwegung, wie z. B. in Baugruben. Daher sind für die Messdurchführung tragbare Messeinheiten von Vorteil. Im Normalfall ist aber auch der Einsatz von mobilen Response-Test-Containern auf PKW-Anhängern möglich.

Die gesamte Messapparatur (inklusive der hydraulischen Anschlüsse an den zu vermessenden Wärmeübertrager) sollte vor äußeren Störeinflüssen (u. a. Lufttemperatur, Solarstrahlung, Wind, Starkregenereignisse und Schnee) soweit geschützt sein, dass eine klimatisch unbeeinflusste Messung möglich ist.

19.1.3 Vorbereitung/Voraussetzungen

Voraussetzung für die Durchführung eines konventionellen GRT/TRT ist das Vorhandensein eines Wärmeübertragers/Wärmeübertragersystems, welches als modellhaftes Abbild einer Linie bzw. auch eines Zylinders gelten kann.

Entsprechend der allgemeinen Marktsituation werden zumeist (Test-)Erdwärmesonden als Einfach- oder Doppel-U-Ausführung mit Tiefen zwischen 50 m und 200 m vermessen.

Die U-Rohre sind hierbei in Bohrungen mit Durchmessern von ca. 120 mm bis ca. 200 mm eingebaut. Gelegentlich werden auch Messungen an Koaxialerdwärmesonden und thermisch aktivierten Gründungspfählen (Energiepfählen), aber auch an Sonderbauformen von Erdwärmetauschern durchgeführt.

Bei Erdwärmesonden kommen zur thermischen Anbindung an das Gebirge und zur hydraulischen Abdichtung des Bohrlochringraumes üblicherweise zementgebundene Verfüllbaustoffe zum Einsatz. Je nach Zusammensetzung und Zementanteil des verwendeten Verfüllmaterials entsteht durch exotherme Reaktion Hydratationswärme. Damit diese freigesetzte Energie den Response Test möglichst nicht beeinflusst, sollte zwischen Fertigstellung der Erdwärmesonde und Beginn des GRT/TRT eine Stand-/Ruhezeit von mehreren Tagen eingehalten werden. Beim Response Test an einem Energiepfahl wird aufgrund der Masse des verwendeten Betons eine Stand-/Ruhezeit von bis zu mehreren Wochen empfohlen.

Als Wärmeträgermedium kommt im Normalfall Wasser zum Einsatz. Die vollständige Befüllung des Wärmeübertragers ist rechtzeitig vor dem Messbeginn vorzunehmen, bestenfalls im Zuge der Sondenfertigstellung, um eine vollständige Temperaturangleichung des Messmediums an die Erdreichumgebung sicherzustellen.

Die Vorlage der Bohr- und Ausbaudokumentation des Fachbohrunternehmens (u. a. mit Druck-, Durchfluss- und Verfüllprotokollen, dem aufgenommenen Bohrprofil, Angaben bohrtechnischer sowie geologischer Gegeben-/Besonderheiten) ist zur Vorbereitung eines GRT/TRT unabdingbar.

19.1.4 Messdurchführung

Die Messdurchführung gliedert sich in folgende allgemeingültige Arbeitsschritte:

- *Anfahrt/Inaugenscheinnahme des Testkörpers*
  Vor dem Beginn der Testarbeiten ist der zu vermessende Wärmeübertrager auf äußere Unversehrtheit zu prüfen. Der vorgefundene Zustand sowie besondere Gegebenheiten des Testumfeldes sind zu dokumentieren.
- *Temperaturprofilmessung vor dem GRT/TRT*
  Eine Temperaturprofilmessung im Wärmeübertrager ermöglicht eine schichtenspezifische Aufnahme der Gebirgstemperatur bis zur Erschließungstiefe (siehe auch Abschn. 19.3).
- Aufbau der Messapparatur
  - Das Messgerät ist möglichst direkt über den zu vermessenden Wärmeübertrager zu stellen. Lange hydraulische Anschlussleitungen sind zu vermeiden.
  - Eine vollständige Entlüftung des geschlossenen Systems ist sicherzustellen.
  - Der elektrische Anschluss an das Stromnetz sollte über die gesamte Messdauer unterbrechungsfrei zur Verfügung stehen. Ein abgebrochener bzw. unterbrochener Test kann im schlimmsten Fall nicht verwertet werden bzw. geht zulasten der Genauigkeit des Messergebnisses.

- Vor dem Verlassen der Baustelle kann ein zusätzlicher Schutz der gesamten Messeinheit (zusätzliche thermische Isolierung, Abdeckung mit reflektierendem Material) zur Minimierung von Umwelteinflüssen beitragen.

- *Programmierung/Einstellung der Messparameter*
  - Die „Heizleistung“ sollte auf Basis der vorliegenden Kenntnisse zum Wärmeübertrager, zur Standortgeologie und zur Untergrundtemperatur so gewählt werden, dass sich ein signifikanter gerichteter Wärmestrom vom Testobjekt zum Erdreich einstellen kann.
  - Der Volumenstrom ist in Abhängigkeit von der gewählten Heizleistung mit einer Spreizung (Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf) im Bereich <4 K zu wählen, wobei der Durchfluss turbulent sein sollte (Reynold-Zahl >2300).
- *Umwälzphase*
  Vor Beginn der Temperatureinspeisung ist eine Phase der ausschließlichen Umwälzung des Fluids von ca. 10–60 min zur Durchmischung des Wärmeträgermittels bis zur Temperaturkonstanz sinnvoll. Aus den aufgezeichneten Fluidtemperaturen dieser Umwälzphase lässt sich u. a. auch die mittlere Untergrundtemperatur über die gesamte Erschließungstiefe des Wärmeübertragers ableiten und mit den Ergebnissen der Temperaturprofilmessung vergleichen.
- *Wärmeeinspeisung*
  Der Zeitraum der Wärmeinspeisung ist so zu wählen, dass über einen ausreichenden Zeitraum eine konstante Wärmeableitung im Messverlauf ersichtlich ist. Bei Erdwärmesonden haben sich Testzeiträume von >48 h durchgesetzt. Einen typischen Messverlauf über 72 h zeigt die Abb. 19.2.
  Die Dauer der Messung an Energiepfählen kann durchaus mehr als eine Woche betragen. Allgemein kann festgestellt werden, dass eine Verlängerung der Messdauer den Einfluss von Störfaktoren statistisch minimiert und somit die Genauigkeit der Messergebnisse erhöht. Die Entscheidung zur Gesamtdauer einer Messung sollte in Abhängigkeit vom Messverlauf getroffen werden. Daher ist eine Datenfernauslese der

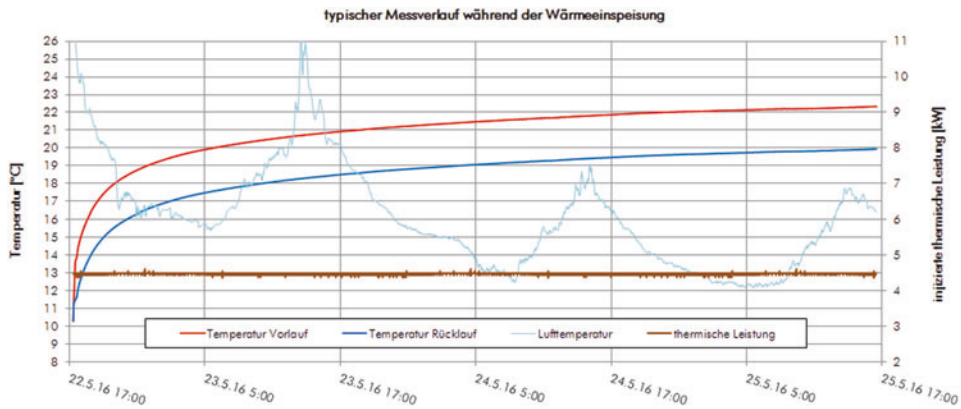


Abb. 19.2 Typischer Messverlauf eines Response-Tests über 72 h

GRT/TRT-Testeinheit mit der Möglichkeit eines permanenten Monitorings von großem Vorteil.

- *Temperaturprofilmessung nach dem GRT*
  Eine bzw. mehrere Temperaturprofilmessungen nach dem Rückbau des GRT/TRT-Gerätes, ermöglichen die Interpretation ggf. vorhandener unterschiedlicher Temperaturangleichungen an die natürliche Gebirgstemperatur, z. B. infolge von Grundwassereinflüssen oder auch heterogener Substrateigenschaften – siehe dazu auch Abschn. 19.3.
- *Sicherung des Wärmeübertragers/Abfahrt*
  Um eine spätere Nachnutzung der Test-Erdwärmesonde bzw. des Test-Energiepfahls zu ermöglichen, ist diese vor möglichen Beschädigungen im Baustellenbetrieb zu schützen. Die Rohrenden sind zu verschließen und obertägige Rohrabschnitte kenntlich zu machen. Im Winter ist ein teilweises Ausblasen des Wassers bzw. ein Rückbau der Rohrenden unter Gelände zu empfehlen.

19.1.5 Auswertung der Messdaten

Das derzeit im Regelfall angewandte Auswerteverfahren entspringt der Linienquellentheorie und basiert auf einem homogen wirkenden, radialen Wärmefluss vom Wärmeübertrager zum Untergrund.

In Abhängigkeit von dem Verhältnis der Wärmeübertragerlänge zu dem Wärmeübertragerdurchmesser ist eine Auswertung nach der Zylinderquellentheorie zu empfehlen, da hier sowohl der radiale als auch der axiale Wärmestrom vom Wärmeübertrager zum Gebirge Berücksichtigung finden. Zudem ermöglicht dieses Verfahren auch repräsentative Ergebnisse von Messungen an zylindrischen thermisch aktivierten Bauteilen (z. B. Energiepfähle, Erdwärmekörbe).

Abb. 19.3 zeigt die Randbedingungen, die das Ergebnis einer GRT-Messung beeinflussen. Die Einflüsse vom Sondenausbau, des Gesteins und des Grundwassers finden sich summarisch in der Responsekurve wieder. Die Eindringtiefe der Temperaturfront ist eine Funktion der Heizdauer. Je länger der Untergrund aufgeheizt wird, desto weiter reicht der vom GRT/TRT beeinflusste und damit gemessene Bereich. Durch die folgend beschriebenen Auswertungsverfahren können die geophysikalischen Parameter des Umfelds der Sonde berechnet werden.

Dies sind:

- die effektive thermische Leitfähigkeit (sie beschreibt, wie „gut“ der Untergrund die Wärme von der Sonde weg (Kühlen) oder zu der Sonde hin (Heizen) leitet), und zusätzlich – je nach Auswertungsverfahren
- die effektive volumetrische Wärmekapazität (sie beschreibt das Speichervermögen bzw. wie viel thermische Energie in einen Kubikmeter Gestein eingespeist bzw. diesem entzogen werden müssen, um 1 K Temperaturdifferenz zum Vorzustand zu erzeugen).

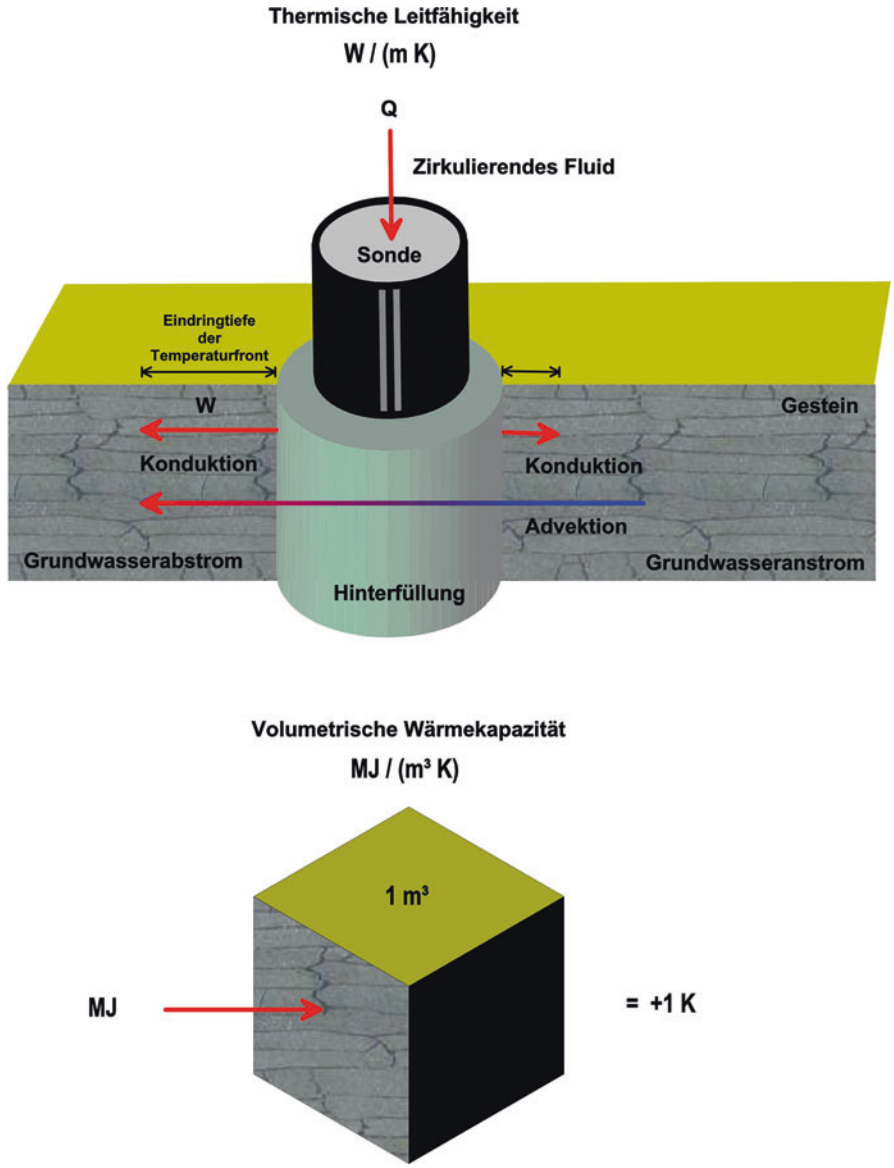


Abb. 19.3 Randbedingungen, welche das GRT/TRT-Messergebnis beeinflussen

19.1.5.1 Die Linienquellentheorie nach Kelvin

Die Linienquellentheorie wird Lord Kelvin (1856/80) zugeschrieben. Er entwickelte mathematische Ansätze, um die Temperatur innerhalb von Strom führenden Kabeln und deren Umfeld zu berechnen. Die wachsende Elektrifizierung und die Möglichkeit

der Datenübertragung (Telegraph) mittels elektrischem Strom machten solche Berechnungen notwendig. Tatsächlich ist in seinen Schriften nur die Punktquelle ausformuliert. Die Formulierung der Linienquelle mit Exponentialintegralfunktion erfolgte erst durch Carslaw und Jaeger (1959).

$$T(r,t) = \frac{\dot{Q}_H}{4\pi \cdot \lambda} \mathrm{Ei}\left(\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right)$$

$T(r, t)$ = Untergrundtemperatur im Abstand r zum Zeitpunkt t (K)
$\dot{Q}_H$ = konstante spezifische Heizleistung (Wm)
λ = Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))
r = Entfernung des Beobachtungspunktes von der Linienquelle als Mittelpunkt (m)
α = Thermische Diffusivität (m^2/s)
t = Zeit (s)
Ei = Exponentialintegralfunktion

Aufgrund der Geometrie einer Erdwärmesonde (große Länge in Relation zu einem kleinen Durchmesser) verwendeten Ingersoll und Plass (1948) den Linienquellenansatz, um das thermische Verhalten einer Erdwärmesonde zu prognostizieren. Da für das Exponentialintegral des Linienquellenansatzes keine diskrete Lösung existiert und für die Berechnung keine leistungsfähigen Computer zur Verfügung standen, arbeiteten Ingersoll und Plass mit einer analytischen Näherung.

Ausgehend von der Linienquellentheorie ersetzten sie die Integralfunktion Ei durch nachfolgende Näherung:

$$Ei\left(\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right) = \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r^2}\right) - \gamma$$

- γ = Euler-Mascheroni-Konstante 0,57722

$$T(r,t) = \frac{\dot{Q}_H}{4\pi \cdot \lambda}\left[\ln\left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r^2}\right) - \gamma\right]$$

Eskilson (1987) vereinfachte den Ansatz weiter zum Geradlinien-Verfahren. Bei fortlaufender Dauer eines Response Tests mit gleichbleibenden Randbedingungen stellt sich ein konstanter Temperaturanstieg ein. Im Ergebnis einer Auftragung der Messwerte auf eine logarithmische Zeitachse kann die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes aus der Steigung der sich ergebenden Geraden ermittelt werden. Der Anstieg wird durch eine Regressionsanalyse bestimmt.

$$\lambda = \frac{\dot{Q}_H}{4\pi \cdot \phi}$$

- ϕ = Steigung der Regressionsgeraden

Weil für die Auswertung nach der Linienquellentheorie nur der Messzeitraum mit gleichbleibender Steigung ausgewertet werden kann, bleibt der Anfangszeitraum einer GRT/TRT-Messung unberücksichtigt. Welcher Messzeitraum zu Beginn der Response-Funktion für die Auswertung nicht herangezogen werden sollte, wird nach Eskilson (1987) durch die Berechnung von $t_{\min}$ (Mindestzeitkriterium) bestimmt.

$$t_{\min} = \frac{5r^2}{\alpha}$$

Da die Geometrie einer Erdwärmesonde nicht jener einer mathematischen Linie entspricht (s. a. Zylinderquelle), müssen die realen Randbedingungen auf das mathematische Modell durch Messwerte und vereinfachende Annahmen übertragen werden:

Die ungestörte Bodentemperatur T_0 wird in situ bestimmt.
Die Messentfernung wird dem Bohrlochradius ($r = r_B$) gleichgesetzt.
Der thermische Übergangswiderstand R_B zwischen Fluid und Bohrlochwand wird berücksichtigt.
Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} wird als gemittelter Wert akzeptiert. Dementsprechend wird die effektive thermische Diffusivität α_{eff} bestimmt.

19.1.5.2 Die Zylinderquellentheorie

Die Linienquellentheorie setzt voraus, dass die Grenzflächen am Kopf und am Fuß der Sonde als nicht wärmeleitend (adiabatisch) definiert sind. Dies ist unter natürlichen Bedingungen nicht der Fall und technisch nicht beeinflussbar. Es findet immer ein axialer thermischer Fluss statt, der, um der Linienquellentheorie zu entsprechen, nicht existent sein darf.

Der axiale Wärmefluss sollte daher bei der Response-Test-Auswertung Berücksichtigung finden. Der Einfluss des Wärmestroms über die axialen Grenzflächen auf die Messung hängt im Wesentlichen vom Verhältnis der Länge zum Durchmesser des Wärmeübertragers ab. Ebenso beeinflussen die geologischen und hydrogeologischen ubiquitären Randbedingungen den axialen Wärmefluss entscheidend.

Das Auswerteverfahren nach der Zylinderquelle kann den axialen und radialen thermischen Fluss bei der Auswertung berücksichtigen. Der zeitabhängige Verlauf der Temperatur variiert in weiten Bereichen, wenn sich das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser einer Erdwärmesonde ändert. Der Verlauf nach der Berechnung mittels der Linienquellentheorie ist bei keinem Verhältnis dieser Parameter über den gesamten Verlauf dem mit der Zylinderquellentheorie ermittelten Ergebnis gleich. Erst bei einem Verhältnis von Durchmesser zu Länge von 1:1000 oder darüber folgt der Verlauf der Linienquellentemperaturfunktion sehr nah dem der Zylinderquellenfunktion. Daraus folgt, dass das Response-Test-Ergebnis bei einem zunehmenden Anteil axialer thermischer Wärmeleitung

mit einem wachsenden Fehler behaftet ist. Der Zylinderquellenansatz ist im Gegensatz zur Linienquelle für jedes Verhältnis von Durchmesser zu Länge und über die gesamte Laufzeit des Tests gültig (radialsymmetrische Geometrie).

Unter Verwendung der Besselschen Zylinderfunktionen kann eine zur Auswertung von GRT/TRT-Daten geeignete Form der Zylindergeometrie dargestellt werden:

$$\Delta\upsilon\,(R, 0 = z, t) = \frac{\dot{Q}_H}{2\pi \cdot \lambda} \int\limits_{\sqrt{\frac{R^2}{2 \cdot \alpha \cdot t}}}^{\infty} du \cdot \frac{e^{-u^2}}{u} \cdot I_0(u^2) \cdot \mathrm{erf}\left(\frac{H}{R} \cdot \frac{u}{\sqrt{2}}\right)$$

$\Delta\upsilon$ = Temperaturdifferenz (K)
R = Radius des Zylinders (m)
z = kartesische Raumkoordinate
t = Zeit (s)
$\dot{Q}_H$ = spezifische Heizleistung (W/m)
λ = Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))
α = thermische Diffusivität (m^2/s)
u = Integrationsvariable
$I_0(x)$ = Zylinderfunktion nach Bessel
erf = Gaussian Error Function
H = Höhe des Zylinders (m)

Für beide Auswertungsverfahren – Linien- und Zylinderquelle – ist ein Response Test mit unterbrechungsfreier Wärmeeinspeisung und konstanter Heizleistung die Voraussetzung. Eine Auswertung fehlerbehafteter Messungen ist mittels zeitgebundener Superposition oder numerisch möglich.

19.1.5.3 Der thermische Bohrlochwiderstand

Der thermische Bohrlochwiderstand ist ein Maß für die Temperaturdifferenz, die infolge des Wärmestroms vom Gebirge zum Wärmeträgerfluid in der Sonde bzw. umgekehrt entsteht. Das bedeutet, dass bei einem Bohrlochwiderstand von 0 K/(W/m) alle Energie übertragen werden könnte.

Der Bohrlochwiderstand ist keine Materialkonstante. Er setzt sich aus Kontakt-, Übergangs- und Durchgangswiderständen zusammen.

Die thermische Energie wird über ein Wärmeträgermedium übertragen. Das Wärmeträgermedium koppelt die Wärmepumpe an den Erdwärmeübertrager und damit an den Untergrund. Als Wärmeträgermedium fungiert i. d. R. Wasser oder ein Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch, das in der Erdwärmesonde zirkuliert. Die Energie wird aus dem Fluid über die Sonde und deren Umgebung an das Gestein abgegeben bzw. aus dem Gestein entnommen. Zwischen Fluid und Gestein liegen die Kontakt-, Übergangs- und Durchgangswiderstände. Daher sind die Temperaturen im Fluid und an der Bohrlochwand im Betrieb zu keiner Zeit identisch (Abb. 19.4).

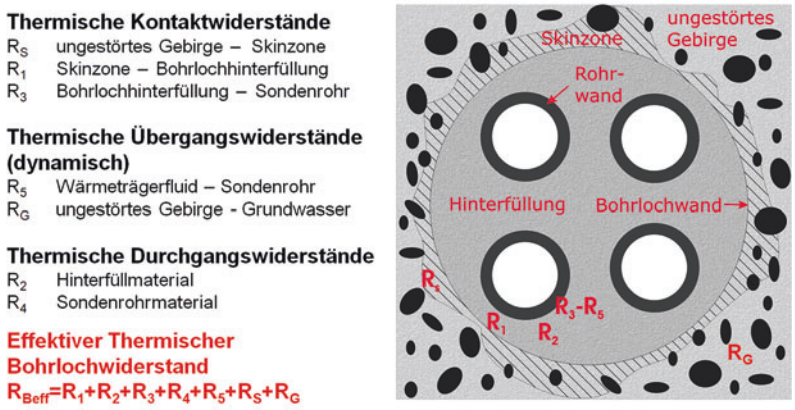


Abb. 19.4 Schematischer Schnitt durch eine Erdwärmesonde mit Kennzeichnung der Material- und Übergangswiderstände. (Nach Lehr und Sass 2014)

Der Temperaturgradient zwischen dem aufwärts und abwärts strömenden Fluid einer Sonde führt zu einer internen Wärmeübertragung und somit zu thermischen Verlusten, welche von der Spreizung und der Sondenlänge abhängig sind. Diese thermische Beeinflussung von Vor- und Rücklauf kann als „interner Widerstand" bezeichnet werden.

Bei einem Response Test wird die Summe der thermischen Einzelwiderstände des Gesamtsystems ermittelt. Der ermittelte thermische Bohrlochwiderstand zeigt die Auswirkungen aller Einbauten im Bohrloch inklusive Skinzone. Dieser Übertragungswiderstand erzeugt ein Temperaturgefälle zwischen dem in der Sonde zirkulierenden Fluid und der umgebenden Geologie. Hinzu kommt der bereits erwähnte interne Wärmeübergang zwischen Vor- und Rücklauf.

Um den Gesamtwiderstand mathematisch zu berechnen, gibt es unterschiedliche Ansätze. Die Berechnungsansätze gehen von Annahmen (z. B. geschätzte volumetrische Wärmekapazität und mittlerer Bohrlochradius) bei idealer Geometrie (z. B. parallel verlaufende Sondenschenkel gleichbleibenden Abstands) aus. Daher ist das Ergebnis des thermischen Bohrlochwiderstandes mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Bisher haben sich die Berechnungsansätze (z. B. *multipole method*, (Claesson und Hellström 2011) Elektro-Analog-Modell (Huber 2015)) in der Praxis als hinreichend genau erwiesen.

Im Rahmen der Durchführung eines GRT/TRT kann der Bohrlochwiderstand direkt aus den Messwerten ermittelt werden. Aus der Kenntnis der Fluidtemperaturen und der eingespeisten Leistung kann bereits nach der ersten Zirkulation des Fluids der Wärmeübergangswiderstand berechnet werden (Wärmeübertrager-Hauptgleichung). Dieser Wert entspricht dem tatsächlichen Übergangswiderstand des gemessenen Bauwerks inklusive der internen Verluste (Marek und Nitsche 2015; DGG und DGGT 2015)

Für Übertrager, deren innere Übertragungsfläche kleiner ist als die äußere (z. B. Rohrgeometrie), sollte die logarithmische Mitteltemperatur verwendet werden. Dies gilt auch

für die Auswertung der Response-Funktion zur Bestimmung der gesteinsphysikalischen Parameter.

$$\Delta\upsilon = \frac{\upsilon_{in} - \upsilon_{out}}{\ln \frac{\upsilon_{in} - \upsilon_0}{\upsilon_{out} - \upsilon_0}}$$

$$R_{Beff} = \frac{2\pi}{\dot{Q}_H} \cdot \frac{\upsilon_{in} - \upsilon_{out}}{\ln \frac{\upsilon_{in} - \upsilon_0}{\upsilon_{out} - \upsilon_0}}$$

υ_{in} = Vorlauftemperatur [°C]
υ_{out} = Rücklauftemperatur [°C]
υ_0 = Mittlere ungestörte Bodentemperatu [°C}
R_{Beff} = Effektiver Bohrlochwiderstand [m K/W]
$\dot{Q}_H$ = Spezifische Heizleistung [W/m]

Die Gleichung zeigt eine Möglichkeit, den thermischen Übergangswiderstand $R_{B,eff}$ aus der logarithmischen Mitteltemperatur in Relation zur eingespeisten Heizleistung zu bestimmen. Die für diesen Berechnungsansatz benötigten Eingangsparameter werden bei einer Response-Test-Messung direkt ermittelt.

Der aus dem GRT/TRT-Auswerteverfahren bestimmte effektive thermische Durchgangswiderstand ist nur für die Randbedingungen der spezifischen Messung repräsentativ! Angaben in Baustoff-Datenblättern sind exemplarisch aus den Durchgangswiderständen abgeleitet oder beschreiben nur einen Betriebszustand. Sie haben daher nur orientierenden Charakter.

19.1.6 Ergebnisdarstellung/-Verwendung

Eine umfangreiche und aussagekräftige Dokumentation zur verwendeten Messtechnik, zur Response-Test-Durchführung, zur Messdatenauswertung sowie zur Ergebnisbeurteilung ist Voraussetzung für die Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Arbeiten. Des Weiteren sollte die Darstellung von möglichen Messfehlern bzw. Messungenauigkeiten eine objektive Einschätzung der Messergebnisse ermöglichen.

Die Ergebnisse eines Response Tests lassen im Allgemeinen Rückschlüsse auf das geothermische Standortpotential zu und sind maßgebende Parameter einer softwaregestützten Dimensionierung von Erdwärmeanlagen bzw. bilden die Grundvoraussetzung für die Berechnung des geothermischen Nutzungspotentials. Das Nutzungspotential ist im Rahmen einer Simulation wiederum abhängig von vielen weiteren Faktoren – siehe Abb. 19.5 (beispielhaft für Erdwärmesonden). Ein direkter Rückschluss der GRT/TRT-Messergebnisse auf z. B. die spezifische Entzugsleistung bzw. die spezifische Entzugsarbeit ist nicht möglich (Sauer et al. 2008).

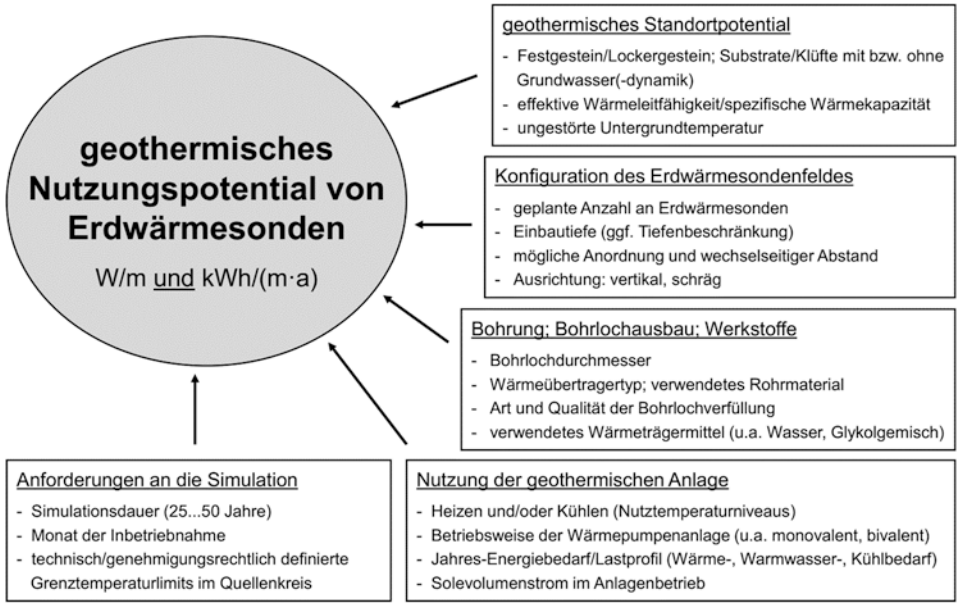


Abb. 19.5 Einflussfaktoren auf das geothermische Nutzungspotential

Neben der eigentlichen projektbezogenen Ergebnisverwendung sind die in situ nachgewiesenen Untergrundparameter wichtige Informationen für die geologischen Dienste der Bundesländer im Rahmen der geologischen Landesaufnahme. Entsprechend dem Lagerstättengesetz §3 besteht gegenüber den betreffenden Behörden eine Mitteilungspflicht entsprechender Untersuchungsergebnisse. Auf Basis der übergebenen, ausgewerteten und interpretierten Daten können u. a. geothermische Potentialkarten erstellt werden, welche eine vereinfachte und öffentlich zugängliche Darstellung von standortbezogenen Voraussetzungen zur Nutzung oberflächennaher Geothermie ermöglichen.

19.2 Spezial-GRT/TRT

19.2.1 Enhanced (Geo-)Thermal Response Test (EGRT, ETRT)

Neben dem zuvor beschriebenen üblichen/konventionellen Messverfahren finden zunehmend auch spezielle, erweiterte Messungen Anwendung. Der Begriff „Enhanced (Geo-)Thermal Response Test“ steht dabei für verschiedene Möglichkeiten, zusätzliche Informationen aus der Messung zu gewinnen. Vordergründig wird dabei eine tiefenspezifische Aufnahme von Temperaturen vorgenommen und daraus ein Rückschluss auf Unterschiede der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Bohrprofil gezogen. Als EGRT/ETRT werden u. a. Verfahren mittels Glasfaser/Hybridkabel angewandt.

Mittels einer Glasfaser (DTS, *distributed temperature sensing*) oder einer Messkette können tiefenaufgelöste Temperaturdaten gewonnen werden. Die Sensorik sendet ortsbezogene Temperaturdaten an einen Datenspeicher. Beide Messverfahren können während eines konventionellen GRT/TRT durchgeführt werden. Hierfür wird die Glasfaser oder Messkette in einen Sondenstrang einer Doppel-U-Erdwärmesonde eingeführt und i. d. R. nach der Messung wieder entfernt. Aus den tiefenbezogenen Temperaturdaten können einige Rückschlüsse gezogen werden (siehe auch Abschn. 19.3). So ist u. a. auch eine näherungsweise Interpretation der thermischen Leitfähigkeit des umgebenden Gesteins möglich.

Da der Wärmestrom aus der Sonde in der jeweiligen Tiefe bei den vorgenannten Verfahren nicht genau bekannt ist, kann die Auswertung der schichtendiskreten gesteinsphysikalischen Parameter fehlerbehaftet sein. Für diese Anwendung steht der EGRT/ETRT mittels Glasfaser/Hybridkabel zur Verfügung. Der EGRT mittels Glasfaser/Hybridkabel ist eine Weiterentwicklung des integralen Response Tests zur in-situ-Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (Ingersoll und Plass 1948). Während beim GRT lediglich gemittelte Werte über die gesamte Erdwärmesondenlänge oder Abschnitte bestimmt werden, liefert der EGRT jeweils Tiefenprofile der Temperatur und der Wärmeleitfähigkeit. Dabei kann ein Temperatur- bzw. Leitfähigkeitswert je 0,5 m aufgelöst werden. In der Regel wird mit einer Auflösung von 1 m gemessen. Das beim EGRT verwendete faseroptische Temperaturmessverfahren (*distributed temperature sensing*, DTS) kann *mittels optical time domain reflectometry* (OTDR; Dornstädter und Heidinger 2009, Heidinger et al. 2004a, b) oder *optical frequency domain reflectometry* (OFDR; Lehr und Sass 2014) ausgeführt werden.

Bei einem EGRT mittels Glasfaser/Hybridkabel wird ein elektrischer Leiter (z. B. Kupferaderkabel) und eine Glasfaser parallel in einem Mantel eingebracht. Das Kabel wird in der Regel im Rahmen der Pilotbohrung entlang der Erdwärmesonde in das Bohrloch eingebaut.

Die Kupferader wird als Heizdraht verwendet. Sie wird an eine Konstantstromquelle angeschlossen. Die vom Kupferkabel an die Umgebung abgegebene Wärme ist damit über die gesamte Länge des Kabels pro Längenabschnitt gleich und konstant. Dies ist wichtig, um zur Parameterbestimmung die in der jeweiligen Tiefe definiert abgegebene Heizleistung zu kennen.

Mit der Glasfaserader kann während der gesamten Versuchsdauer an jedem Messpunkt des Kabels die Temperatur gemessen werden.

Aus der Heizleistung und der ortsbezogenen individuellen Temperaturkurve kann unter Anwendung der Linien- bzw. Zylinderquellentheorie die Verteilung der thermischen Materialparameter (Hinterfüllung) und die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds entlang des Hybridmesskabels als Funktion der Tiefe bestimmt werden (Abb. 19.6). Der Peak an der tiefsten Stelle (Sondenfuß) zeigt die erhöhte Wärmeableitung durch radialen und axialen Wärmefluss.

Das Verfahren bietet somit gegenüber dem GRT/TRT eine deutlich höhere Informationsdichte. Beim EGRT-Verfahren stehen für jeden Tiefenabschnitt geophysikalische

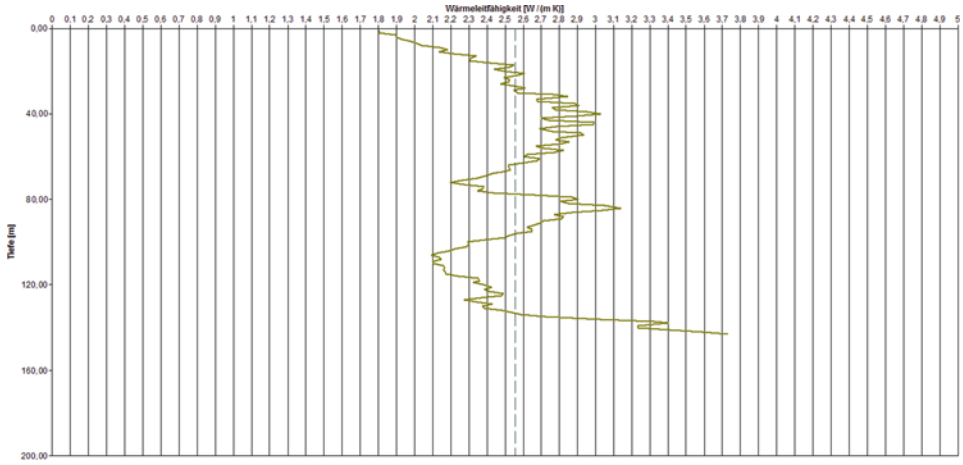


Abb. 19.6 Variation der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe

Kennwerte zur Verfügung. Das ermöglicht optimierte Planungen hinsichtlich der zu wählenden Erschließungstiefe.

Da die exakte Lage des Messkabels im Bohrloch nicht bekannt ist, zum anderen das Kabel außerhalb des Fluides liegt und damit Teilwiderstände nicht erfasst werden, kann allerdings der thermische Bohrlochwiderstand lediglich als ortsbezogener Fitting-Parameter ermittelt werden.

19.2.2 GRT/TRT für Energiepfähle

Als eine kostengünstige Möglichkeit zur Erfassung thermophysikalischer Untergrundparameter mit begrenzter Tiefe bietet sich die sogenannte „geothermische Messrammsonde“ an. Das Verfahren entspricht der geotechnischen „Schweren Rammsondierung“ in Kombination mit geothermischen Erkundungsmethoden. So wird neben der Ermittlung baugrundmechanischer Kennwerte (u. a. Lagerungsdichte, Spitzendruck und Mantelreibung) auch eine Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie der Untergrundtemperatur ermöglicht.

Die in den Boden eingerammte, eingedrückte oder einvibrierte 40- bis 45-mm-Stahl-Messsonde wird dabei als Wärmübertrager genutzt und durch entsprechend konstruktive Maßnahmen ein Wärmeübertrager zur Durchführung eines Response Tests geschaffen. Das Sondiergestänge ist beim modularen Einbau abzudichten und nachträglich ein Innenrohr bis auf Endtiefe zu setzen. Der hydraulische Anschluss des nunmehr hergestellten koaxialen Wärmetauschers erfolgt unmittelbar an der Geländeoberfläche gemäß Prinzipskizze Abb. 19.7.

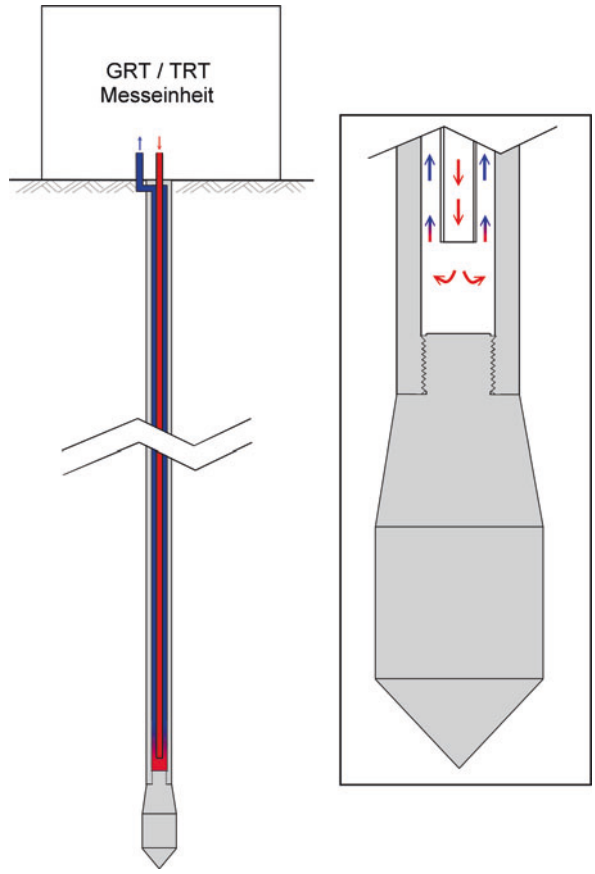


Abb. 19.7 Prinzipieller Aufbau der geothermischen Messrammsonde

Die geothermische Messrammsonde ist ideal für die Parametererfassung im Rahmen der Vorplanung bzw. dem Entwurf von thermisch aktivierten Tiefgründungen, Schlitzwänden, Bohrpfahlwänden usw. geeignet.

Die sonst erforderliche kosten- und zeitintensive Herstellung einer Test-Erdwärmesonde bzw. eines Test-Energiepfahls kann durch die Verwendung der geothermischen Messrammsonde entfallen. Die Stahlsonde wird nach Testdurchführung wieder entfernt.

Die geothermische Messrammsonde unterliegt nicht der Genehmigungspflicht, wodurch ein weiterer Zeitvorteil gegenüber herkömmlichen Testverfahren realisiert werden kann.

Um den Einfluss und die Massespeichereffekte des Bohrpfahls mit zu erfassen, kann auch ein konventioneller GRT/TRT an einem Pfahl durchgeführt werden. Hierbei sind aufgrund der Masse des Pfahls lange Laufzeiten der Response-Test-Messung notwendig (>5 Tage). Die Auswertung folgt i. d. R. der Zylinderquelle.

19.2.3 GRT/TRT für horizontale Erdwärmekollektoren

Die „Stichnadelsonde“ bzw. englisch *thermal needle system* ermöglicht die Vor-Ort-Messung der Wärmeleitfähigkeit in oberflächennahen Erdschichten bis zu einer für horizontale Erdwärmekollektoren typischen Verlegetiefe von ca. 1,2–1,5 m. Die Ausführung einer Messung im Erdwärmekollektorfeld zeigt Abb. 19.8.

Das Funktionsprinzip der Stichnadelsonde gleicht dabei im Grundsatz dem konventionellen Response Test und liefert notwendige Erdreichkennwerte (Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bodenschichten und Untergrundtemperatur) für die Bemessung/Planung von mittleren und großen Erdwärmekollektoren.

Aufgrund der relativ kurzen Messdauer von wenigen Minuten ist eine Vielzahl von Messungen in einem Erdwärmekollektorfeld möglich, sodass mit geringem Zeitaufwand schichten- und flächenspezifische Kennwerte erfasst und anschließend in ein vereinfachtes Untergrundmodell übertragen werden können.

Neben dem Response Test im Feld sind auch Stichnadelmessungen an Bodenproben möglich.

Abb. 19.8 Stichnadelsonde während der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in der Verlegeebene der Erdwärmekollektorleitungen

19.3 Temperaturprofilmessungen

19.3.1 Allgemeines

Tiefendiskrete Temperaturmessungen haben sich im Rahmen der Durchführung von Response Tests etabliert und sind mittlerweile fester Bestandteil der In-situ-Bestimmung bemessungsrelevanter thermophysikalischer Untergrundparameter. Die gleichzeitige Durchführung eines Response Tests mit permanenter oder zyklischer Messung von Temperaturprofilen entspricht einem EGRT/ETRT (siehe auch Abschn. 19.2.1).

Zunehmend wird auch bei kleineren geothermischen Anlagen die natürliche Untergrundtemperatur ohne Durchführung eines Geothermal Response Tests gemessen.

Neben dem eigentlichen Nachweis der standortspezifischen mittleren Untergrundtemperatur bis zur Erschließungstiefe des installierten Messsystems (z. B. Erdwärmesonde, Temperaturmessstelle) ist die konkrete Aufschlüsselung und Interpretation schichtenbezogener Temperaturen und ggf. Temperaturanomalien möglich. So lässt die Temperaturprofilmessung je nach Datenlage und Messdurchführung z. B. folgende Rückschlüsse zu:

- Tiefenbezogene Abgrenzung der Solarspeicherzone, des geosolaren Bereiches und der terrestrischen Zone mit Ableitung des standortspezifischen geothermischen Gradienten (Messung an einem ungestörten und ausreichend tiefen Wärmeübertrager).
- Nachweis urbaner Wärmeinseln in zentralstädtischen Lagen und Belegung langjähriger Klimaveränderungen im ländlichen Raum (Messung an einem ungestörten und ausreichend tiefen Wärmeübertrager).
- Plausibilität von unerwarteten GRT/TRT-Messergebnissen infolge von grundwasserführenden Lockergesteinsschichten oder Klüften bzw. durch Wasserzutritte und Wasserumläufigkeiten im Bohrlochringraum (Temperaturmessung während und/oder unmittelbar nach einem GRT/TRT).
- Hydratationswärmeentwicklung von zementgebundenen Verfüllbaustoffen (Messung während und unmittelbar nach dem Verfüllvorgang).
- Temperaturveränderungen im Untergrund im Einflussbereich geothermischer Nutzungen (zyklische Messung in Temperaturmessstellen).

19.3.2 Messtechnik

Die zu verwendende Messtechnik für Temperaturprofilmessungen richtet sich vordergründig nach der Bauart des erdseitig installierten Systems, in dem gemessen werden soll. Durch die Messung in üblichen Erdwärmesonden mit Rohrinnendurchmessern von ca. 26 mm wird die Auswahl an zur Verfügung stehender Messtechnik eingeschränkt. Von großer Bedeutung ist die Adaptionszeit der Temperatursensoren. Je nach Ausführung kann es bis zu mehrere Minuten dauern, bis sich der Messfühler der Umgebungstemperatur angepasst hat. Die Geschwindigkeit der Messfahrt ist dementsprechend anzupassen.

Allgemein kann zwischen kabellosen (Seil- oder Sink-Logger) und kabelgebundenen Messfühlern unterschieden werden.

Die kabellosen Messeinrichtungen müssen neben der Temperatur auch den Wasserdruck in der Erdwärmesonde aufnehmen und die Messwerte abspeichern. Je nach Sinkgeschwindigkeit des Datenloggers und Häufigkeit der Datenerfassung kann somit die Wechselbeziehung von Temperatur und Tiefe grafisch abgebildet werden. Der Einsatz der kabellosen Minidatenlogger ist nur an vollständig durchgängigen und rückspülbaren U-Rohren möglich, sodass eine Bergung nach erfolgter Messung problemlos durchführbar ist. Nachteilig ist hierbei, dass das Temperaturprofil durch den Spülvorgang massiv gestört wird, sodass Serienprofile (mehrere aufgenommene Temperaturprofile im kurzen zeitlichen Abstand) nur mit entsprechender Anzahl an Minidatenloggern messbar sind.

Kabelgebundene Temperaturprofilmessungen erfolgen im Regelfall durch langsames herablassen des Messfühlers mit manueller Aufnahme von Tiefe und Temperatur. Es werden aber auch seilgebundene Datenlogger mit der Möglichkeit des einfachen Bergens eingesetzt. Je nach Ziel und Verwendung der Messergebnisse sollte dabei eine meterweise Aufnahme der Messdaten nicht überschritten werden. Bei seilgebundenen Temperatur-Tiefen-Loggern sind ebenso wie bei kabelgebundenen Temperaturmessfühlern Serienprofile ohne Weiteres mit entsprechenden zeitlichen Abständen aufnehmbar.

Im Rahmen der Erfassung von Temperaturprofilmessungen im Langzeit-Monitoring sind Temperaturmessketten in Kombination mit Datenloggersystemen prädestiniert. Diese lassen sich in wassergefüllten Einrohrsystemen (Temperaturmesspegel) aber auch in U-Rohren (Erdwärmesonden) installieren und bei Bedarf per Datenfernübertragung auslesen bzw. auf eine vorhandene Gebäudeleittechnik aufschalten. Die Anzahl und der Abstand der Temperaturfühler bestimmt dabei die Qualität des hier gemessenen Temperaturprofils.

Auch faseroptische Messungen mittels Glasfaserkabeln sind für die Erfassung von Temperaturprofilen einsetzbar. Dabei werden die Glasfaserkabel im Regelfall dauerhaft in ein erdgebundenes System (Erdwärmesonde, Temperaturmessstelle) mit eingebaut. Bei der faseroptischen Messung ist eine kontinuierliche, ortsgenaue Temperaturmessung mit hoher Auflösung möglich.

19.3.3 Verwendung und Interpretation der Ergebnisse

Genauso wie die allgemeine Datenerhebung zum geologischen Aufbau der Erdoberfläche sind thermophysikalische Untergrundparameter wie die effektive Wärmeleitfähigkeit, aber auch die Untergrundtemperatur, Bestandteil der möglichst flächendeckenden geologischen Landesaufnahme. Natürliche Gegebenheiten und unnatürliche Veränderungen der Temperaturen im Erdreich können erfasst, interpretiert und bewertet werden.

Aus der Vielzahl durchgeführter Temperaturprofilmessungen in Deutschland ließen sich somit eindeutige Hinweise auf anthropogen beeinflusste Bereiche mit erhöhten Untergrundtemperaturen in zentralstädtischen Lagen ableiten. Diese „urbanen Wärmeinseln“ zeigen eindeutige Rückschlüsse des menschlich verursachten Wärmeeintrages in den

oberflächennahen Untergrund. Dieser ist bedingt durch an das Erdreich gebundene Wärme abgebende Bauwerke (u. a. Ver- und Entsorgungsleitungen, Keller, U-Bahn) und durch versiegelte Flächen (Hochbauten, Straßen und Wege), welche eine Reflexion der solaren Strahlung verringern und somit zu einer Absorption der thermischen Energie führen. In Großstädten ist ein daraus abzuleitender Wärmestrom von der Erdoberfläche zur Tiefe hin, welcher dem natürlichen geothermischen Wärmestrom aus dem Erdinneren entgegensteht, bis zu Tiefen von >100 m zu beobachten.

Andererseits ist auch der Klimawandel im Untergrund nachweisbar. In abgelegenen, ländlichen Räumen lässt sich häufig eine erhöhte Untergrundtemperatur bis weit unterhalb des saisonal beeinflussten Tiefenbereiches feststellen, was bei Ausschluss von geologischen Ursachen auf eine langjährige Zunahme der mittleren Lufttemperatur zurückgeführt werden kann.

Die Ergebnisse von Temperaturprofilmessungen dienen aber weniger der allgemeinen Datenerhebung, als dass sie vordergründig projektbezogen ermittelt werden, um als Grundlagenparameter in eine fachgerechte Planung einzufließen. So hat die ungestörte Untergrundtemperatur entscheidenden Einfluss auf das Potential bzw. die Betriebscharakteristik der geothermischen Gesamtanlage. Sie definiert im Rahmen der Dimensionierung der geothermischen Quellenanlage mit spezieller Geosoftware den Ausgangswert für technisch und wasserrechtlich definierte zulässige Temperaturveränderungen (siehe auch Abb. 19.5 im Abschn. 19.1.6).

Temperaturprofilmessungen können aber auch als ein zusätzliches Instrument zur Nachweisführung einer vollständigen Bohrlochverfüllung von Erdwärmesonden herangezogen werden. Im Regelfall werden zementgebundene Verfüllbaustoffe eingesetzt, bei denen nach Wasserzugabe und dem Anmischen der Verfüllsuspension Hydratationswärme freigesetzt wird. Diese Wärmeentwicklung lässt sich in der Erdwärmesonde schichtendiskret messen und zur Interpretation der Verfüllqualität heranziehen. Der temporäre Temperaturanstieg zeigt an, an welchen Stellen die Hinterfüllung vorhanden ist und ob es Fehlstellen gibt (z. B. durch Abfließen der Hinterfüllsuspension in Klüfte oder Ausspülen durch Grundwasserströmung). Dieses Verfahren wurde bereits bei einigen Feldtests erprobt, stellt aber auch entsprechende Anforderungen an die Zusammensetzung des Verfüllmaterials und setzt Kenntnisse über die Standortgeologie und über den Temperatureintrag während des Bohrverfahrens voraus. Idealerweise sollten hierbei Messketten bzw. faseroptische Messungen mit Datenloggersystem zu Einsatz kommen, andererseits wären Handmessungen in regelmäßigen Abständen durchzuführen. Beim Nachweisen der Hydratationswärmeentwicklung in den Feldtests hat sich gezeigt, dass bei typischen zementgebundenen Verfüllmaterialien selbst nach mehr als 10 Tagen nach der Bohrlochverfüllung noch keine vollständige Angleichung der Temperaturen in der Sonde an die natürliche Untergrundtemperatur gegeben war. Dieses Erkenntnis ist insbesondere für die Dauer der Stand-/Ruhezeit der Erdwärmesonde vor Beginn eines GRT/TRT beachtenswert.

Werden mehrere Temperaturprofilmessungen unmittelbar nach Beendigung eines Response Tests durchführt, lässt die Temperaturwiederangleichung an die natürliche

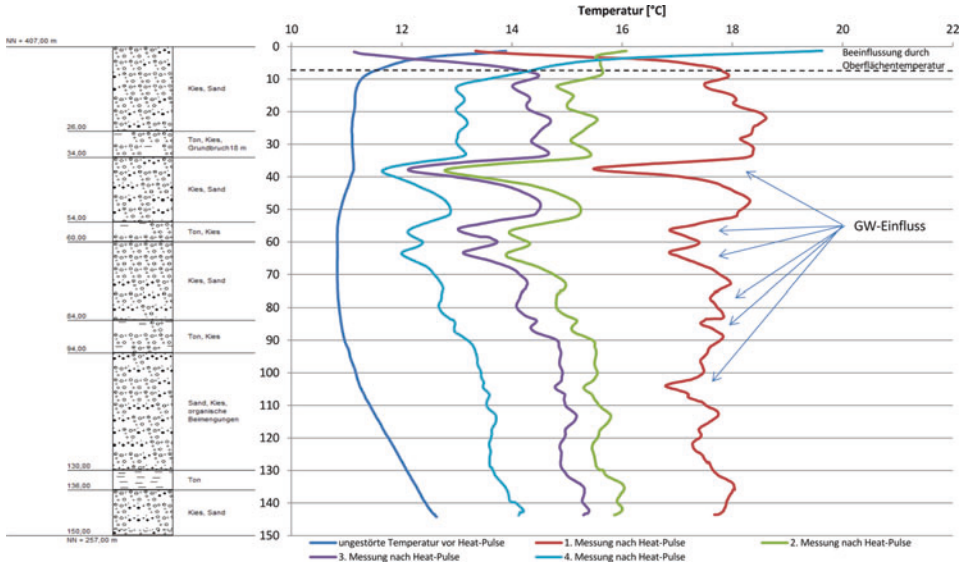


Abb. 19.9 Temperaturprofile vor und nach Durchführung eines GRT/TRT mit vorherrschender Grundwasserdynamik

Untergrundtemperatur einen direkten Rückschluss auf Unterschiede der thermischen Leitfähigkeit des anstehenden Gesteins bzw. der geologischen Schichten zu. Aus den Werten der thermischen Leitfähigkeit und Serienprofilen der Abkühlungsphase (Relaxationsphase) können zudem Grundwasser führende Abschnitte (in denen konvektive Wärmeleitung bedeutsam ist (Arslan und Huber 2014)) gegenüber den dominant konduktiv wärmeleitenden Abschnitten abgegrenzt werden – siehe auch das Beispiel einer Messung in Abb. 19.9. Eine hohe Datendichte erlaubt es, hydrogeologische Kennwerte wie z. B. die Darcy-Geschwindigkeit abzuleiten, mit der die Sonde während der Messung angeströmt wurde. Für diese Betrachtung ist ein qualifiziertes Bohrprofil unabdingbar, um Schichtenwechsel mit den thermischen Befunden abgleichen zu können.

Die Ergebnisse von Temperaturprofilmessungen haben somit für die geothermische und für die hydrogeologische Bewertung eine große Bedeutung. Darüber hinaus können gegebenenfalls genehmigungsrechtliche Belange (z. B. Qualitätssicherung der Hinterfüllung) erfüllt werden.

Literatur

Arslan, U., Huber, H.: Untersuchungen zum Wärmetransportverhalten oberflächennaher durchströmter Böden. In: Geothermie, Bohr- und Brunnentechnik, S. 24–28. Ernst & Sohn Special, Berlin (2014)

Carslaw, H. S., Jaeger, J. C.: Conduction of heat in solids, second edition. Oxford University Press, Great Britain (1959)

Claesson, J., Hellström, G.: Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger. HVAC & R Research **17**(6), 895–911 (2011)

DGG und DGGT 2015, Arbeitskreis „Geothermie" der Fachsektion Hydrogeologie (FH-DGG) und Fachsektion Ingenieurgeologie (FI-DGGT/DGG): Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. (DGG) und Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin (2015)

Dornstädter, F., Heidinger, P.: Enhanced Geothermal Response Test (EGRT): Erfahrungen aus der Praxis und Vergleiche mit dem klassischen Thermal Response Test (TRT). Symposium 10 Jahre Thermal Response Test in Deutschland, Göttingen (2009)

Eskilson, P.: Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Lund-MPh-87/13. Dept. Of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden (1987)

Heidinger, G., Dornstädter, J., Fabritius, A.,Welter, M., Wahl, G., Zurek: EGRT – Enhanced Geothermal Response Test. Proc. 8. Geothermische Fachtagung, 316–323 (2004b)

Heidinger, P., Dornstädter J., Fabritius A., Welter M., Wahl G., Zurek: EGRT – Enhanced Geothermal Response Tests, in: Die neue Rolle der Geothermie, Tagungsband GTV, 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau i.d.Pf. 10. -12.11.04 (2004a)

Huber, A.: Handbuch EWS, CH-8032 Zürich (2015)

Ingersoll, L. R., Plass H. J.: Theory of Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. ASHVE Transactions 47:339-348, Chicago (1948)

Kuntz, D.: Hat ein klassischer Thermal Response Test eine Tiefenbegrenzung? In: Fachmagazin bbr, 05/2016, S. 64–69 (2016)

Lehr, C., Sass, I.: Thermo-optical parameter acquisition and characterization of geologic properties: a 400-m deep BHE in a karstic alpine marble aquifer. Environmental Earth Sciences, (2014). (DOI)10.1007/s12665-014-3310-x.

Loose, P.: Erdwärmenutzung – Versorgungstechnische Planung und Berechnung, C.F. Müller Verlag, Heidelberg (2007)

Lord Kelvin: Compendium of the Fourier Mathematics for the conduction of heat in solids, and the mathematically allied physical subjects of diffusion of fluids and transmission of electrical signals through submarine cabels. Quarterly Journal of Mathematics **1**, (1856/1880)

Marek R., Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung. Carl Hanser Verlag, Leipzig (2015)

Sauer, M., Mands, E., Sanner, B.: Wichtige Einflussfaktoren bei der Bemessung größerer Erdwärmesondenanlagen. In: Fachmagazin bbr, 04/2008, S. 72–79 (2008)

Messmethoden für Monitoring, Qualitätskontrolle und Beweissicherung bei Erdwärmesonden

20

Johannes Gottlieb, Marc-Alexander Tilg, Daniel Fischer, Roman Zorn und Simeon Meier

Inhaltsverzeichnis

20.1 Einleitung 638
20.2 Schadensvermeidung im Rahmen der geologischen Bewertung und EWS-Planung 639
20.3 Komponenten der Qualitätssicherung während und nach EWS-Installation 641
20.3.1 Erfassung geometrischer Parameter der EWS 641
20.3.2 Qualitätsprüfung der Zementierung 642
20.3.3 Ermittlung von Temperatur und Entzugsleistung 643
20.4 Methoden der Informationsgewinnung 645
20.4.1 Messsonden 645
20.4.2 Messmolche und Messkugeln 648
20.4.3 Langzeitmonitoring und erweiterter Thermal Response Test mit Messkugeln als neue Qualitätssicherungskonzepte 650
Literatur 651

Johannes Gottlieb (✉) · Marc-Alexander Tilg
Montanes Explorationsgesellschaft mbH, Karlsruhe, Kriegsstraße 39, 76133 Karlsruhe, Deutschland
e-mail: gottlieb@montanes.de; tilg@montanes.de

Daniel Fischer
Terratec Geophysical Services, Schillerstrasse 3, 79423 Heitersheim, Deutschland
e-mail: Fischer@terratec-geoservices.com

Roman Zorn
Europäisches Institut für Energieforschung, Karlsruhe, Emmy-Noether-Str. 11, 76131, Karlsruhe, Deutschland
e-mail: Roman.Zorn@eifer.uni-karlsruhe.de

Simeon Meier
enOware GmbH, Karlsruhe, Emmy-Noether-Str. 17, 76131 Karlsruhe, Deutschland
e-mail: sim@enoware.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_20

Zusammenfassung

Der Artikel befasst sich mit Methoden der Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden, insbesondere im Hinblick auf neueste Messmethoden und deren Einsatz bei der Überprüfung fachgemäßer Ausführung des Bauwerks Erdwärmesonde, sowohl in der Planungsphase, beim Bau, bei Fertigstellung oder einer Langzeitüberwachung im Betrieb. Komponenten der Qualitätssicherung, die betrachtet werden, sind geometrische Parameter von Erdwärmesonden, die Qualität der Zementierung, die Ermittlung von Temperaturen und Entzugsleistungen. Zum Einsatz kommen dabei Messsonden mit kabelgestützter Datenerfassung sowie kabellose Messmolche mit autarker Energieversorgung, Datenspeicherung bzw. berührungsloser Datenübertragung. In der Planungsphase können geologische und anthropogene Gefährdungspotentiale mit innovativen Remote-Sensing-Verfahren untersucht werden.

Schlüsselwörter

Messmethoden · Erdwärmesonden · Qualitätssicherung · Messkugel · Messmolch · Messsonde

20.1 Einleitung

Mit dem Bau von Erdwärmesonden (EWS) wird ein unterirdisches Bauwerk erstellt, das Jahrzehnte lang seine Aufgabe erfüllen soll, aber in dieser Zeit in der Regel weder für Kunden noch für den Bauausführenden direkt zugänglich ist. Daher stellt sich – über eine eingehende Analyse der geologischen Gegebenheiten zur Vermeidung von Bohrrisiken hinausgehend – sowohl der Bau- bzw. Bohrfirma als auch im Sinne der Qualitätskontrolle dem Bauherren in besonderer Weise die Frage nach der Qualitätssicherung beim und nach dem EWS-Ausbau. Zu bewertende Aspekte sind unter anderem:

- Ist das Bauwerk EWS in der Weise hergestellt worden, wie es in Auftrag gegeben wurde? Dieser Punkt betrifft insbesondere Tiefe, die ordnungsgemäße Verlegung der Rohre in der Bohrung und die Qualität der Zementierung.
- Wird die kalkulierte Entzugsleistung tatsächlich erreicht? Wenn ja, steht sie auch über längere Zeiträume stabil zur Verfügung?
- Ist sichergestellt, dass keine hydraulische Kommunikation zwischen verschiedenen Aquiferen entsteht und damit die Gefahr einer Grundwasserverunreinigung oder Schäden durch unkontrollierte und schädliche Wasserzirkulation ausgeschlossen sind?

Zur Beantwortung dieser Fragen steht eine Reihe an Maßnahmen zur Verfügung. Unterschiedliche Messmethoden sind hierfür entwickelt worden, insbesondere speziell an die EWS angepasste geophysikalische Messtechniken, bei denen Messkugeln eine vergleichsweise unkomplizierte neue Lösung darstellen.

Im Idealfall erstellen die Fachfirmen eine zertifizierte EWS, die den Kunden eine hohe Qualität garantiert. Diese schließt die Protokollierung des Bohrprozesses bis hin zu einer

automatischen Verpressüberwachung ein, die Komponenten einer solchen Zertifizierung sein können.

Darüber hinaus sollte es auch für den Bauherrn geeignete Instrumentarien geben, eigenständig die Qualität des Bauwerks „EWS“ zu überprüfen. Letzteres ist insbesondere von Bedeutung, sollte es zu inhaltlichen oder sogar rechtlichen Auseinandersetzungen mit den Fachfirmen kommen. Somit gibt es für beide Parteien auch die Frage nach Methoden der Beweissicherung, z. B. bei zu geringer Entzugsleistung oder bei Schadensfällen. Ebenso könnte eine unabhängige Beweissicherung im Auftrag eines Gerichts anstehen.

Die hierzu zur Verfügung stehenden Instrumentarien sollen in diesem Beitrag erläutert werden.

Der Begriff der Sonde wird in verschiedenen Disziplinen unterschiedlich verwendet. Als solche werden zum einen Erdwärmesonden – zur Erdwärmenutzung ausgebaute Bohrungen – bezeichnet, aber auch Messsonden aus dem geophysikalischen Fachgebiet, also geophysikalische Systeme, die zum Zwecke von Messungen in die Bohrungen bzw. die Zirkulationsrohre der EWS eingeführt werden, um an verschiedenen Positionen tiefenabhängige Daten zu erfassen. Der Leser wird dem jeweiligen Zusammenhang entnehmen können, welche Art von Sonden gemeint ist. Vorsorglich verwenden wir für die Erdwärmesonde die Abkürzung EWS.

20.2 Schadensvermeidung im Rahmen der geologischen Bewertung und EWS-Planung

Bei Planung, Platzierung, Auslegung und Ausführung der Bohrungen und des Ausbaus als EWS muss berücksichtigt werden, dass Schadensfälle unter Umständen noch vor der Errichtung der EWS, nämlich bereits beim Bohrprozess auftreten können. Neben den in der Einleitung erwähnten Fragestellungen ist daher wie bei jeglichem Eingriff in den Untergrund im Vorfeld eine umfangreiche Analyse der Geologie und Hydrologie vor Ort durchzuführen, beispielsweise im Hinblick auf Störungszonen oder quellfähige Minerale (vgl. hierzu z. B. Jäger 2014). Neben geologisch bedingten Gefahrenbereichen können an manchen Standorten jedoch auch Altbergbau oder andere anthropogene Anomalien für Erdwärmeprojekte Schwierigkeiten verursachen oder sogar das Aus bedeuten. Wird diese Aufgabe qualitätsgerecht durchgeführt, ist schon ein erster wesentlicher Schritt zu einem erfolgreichen Projekt getan.

Geophysikalische Untersuchungen wie Seismik, Geoelektrik u. a. zur Ortung von möglichen Anomalien sind bei kleineren EWS-Projekten oft zu teuer. Diese Verfahren sind gut bekannt und sollen hier nicht weiter erörtert werden. Doch neben den klassischen Verfahren stehen hierfür in der Zwischenzeit auch moderne innovative Remote-Sensing-Verfahren zur Verfügung. Diese auch als Reservoir-Resonanz-Techniken bezeichneten Methoden können in tiefere Bereiche des Erdreiches eindringen. Sie liefern im Gegensatz zur klassischen Geophysik direkte Informationen beispielsweise zur Lokalisierung von Grundwasser oder von Dichteanomalien, wie Hohlräumen. Dies gibt wichtige Hinweise sowohl für das Bohren und die Ausführung der Sondeninstallationen als auch bei einer Schadensbewertung.

Die als GeoScan Systems (GSS) bezeichnete Technologie, die von der Firma Montanes Explorationsgesellschaft mbH angeboten wird, ist ein Verfahren, das in den letzten Jahren in Deutschland entwickelt und inzwischen auf allen Kontinenten getestet wurde. Das Verfahren basiert auf einer geophysikalischen Spektralanalytik. Durch ein erweitertes, frequenzbezogenes Resonanzverständnis ist man mit der GSS in der Lage, wesentlich tiefer als bei sonst üblichen Verfahren das Erdreich zu durchdringen und dieses zu vermessen. Dadurch kann diese Methode angewandt werden, um etwaige Risiken bei der EWS-Erstellung bereits im Vorfeld zu erkennen.

Vergleichbare Methoden sind auch aus anderen Ländern bekannt, insbesondere Ukraine und Russland. Die Qualität der Verfahren fällt jedoch sehr unterschiedlich aus.

Abb. 20.1 zeigt als Beispiel eine Standortanalyse mit dem Verfahren von Geoscan Systems zu einem aufgetretenen Schadensfall während des Abteufens einer Erdwärmebohrung in Form einer lokalen Bodenabsenkung beträchtlichen Ausmaßes. Nachgewiesen werden konnte anhand von Satellitendaten, die etwa ein Jahr vor dem Schadensereignis aufgenommen worden sind, dass dieser Schaden im Zusammenhang mit untertägigen Dichteanomalien steht. Die ermittelten Strukturen können nun einer fokussierten Untersuchung unterzogen werden. Da sich die Strukturen unter einer Wohnsiedlung über größere Bereiche ausdehnen, können damit geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um weitere Schäden zu verhindern.

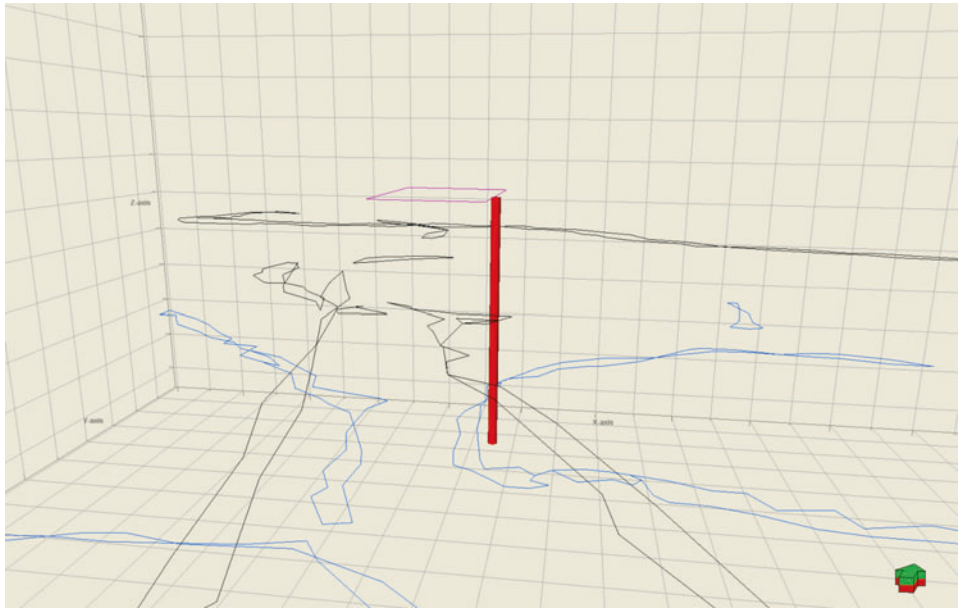


Abb. 20.1 Erdwärmebohrung (rot) mit Senkungsbereich (pinkes Viereck, ca. 1,5 m Tiefe) und darunterliegenden Dichteanomalien (6–8 m unter Gelände). Die blau markierten Bereiche sind bevorzugte Grundwasserzirkulationspfade (in ca. 24–28 m Tiefe unter Gelände)

20.3 Komponenten der Qualitätssicherung während und nach EWS-Installation

20.3.1 Erfassung geometrischer Parameter der EWS

Der Verlauf der Bohrungen und der Zirkulationsrohre innerhalb der Bohrungen weicht meist stark von der idealen Lage ab (Abb. 20.2). Eine Bohrung verläuft nicht immer vertikal und gerade. Eine Bohrung, die bis zu einer Teufe von 100 m unter der Oberfläche geplant ist, kann durchaus horizontale Abweichungen von 8–10 m in der Tiefe aufweisen. Die Länge der Bohrung (gekennzeichnet als b in Abb. 20.3) ist daher nicht

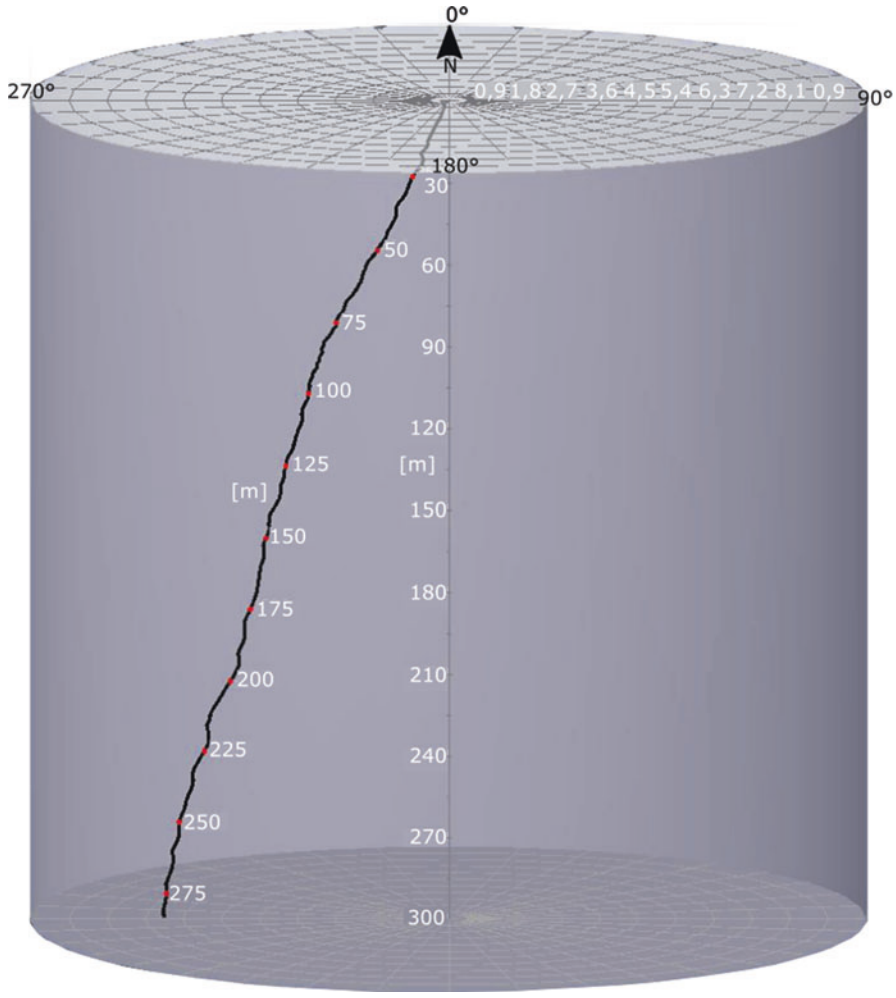


Abb. 20.2 Abweichung einer EWS von der Vertikalen

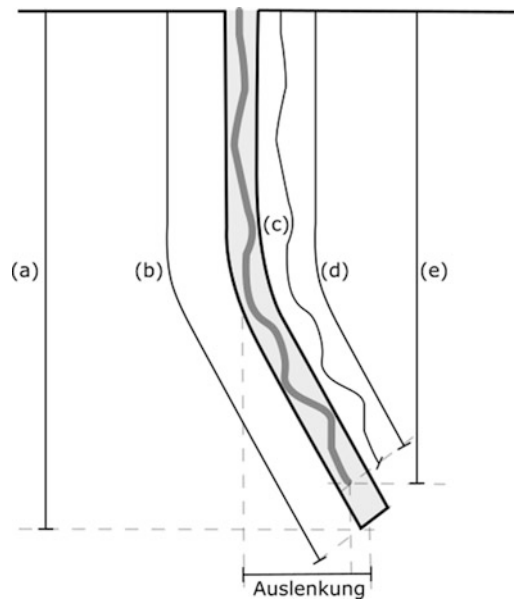


Abb. 20.3 Tiefe und Auslenkung von EWS-Bohrungen (**a**) Vertikale Tiefe, (**b**) Gemessene Tiefe des Bohrlochs, (**c**) Gemessene Tiefe oder Länge des EWS-Rohrs, (**d**) Bohrlochlänge bis EWS-Ende, (**e**) Tatsächliche Tiefe des Sondenendes. (Nach Badoux et al. 2016)

notwendigerweise identisch mit der tatsächlich erreichten Tiefe (a in Abb. 20.3). Horizontale Abweichungen sind insbesondere dann von Bedeutung, wenn sich die Bohrung nahe an einer Grundstücksgrenze oder innerhalb eines Sondenfeldes mit dicht gesetzten Bohrungen befindet, wo sich die Sonden gegenseitig beeinflussen. Dort können gegebenenfalls Entzugsleistungen sinken sowie die Vereisungsgefahr steigen. Zudem verlaufen die relativ dünnen PE-Rohre in der Bohrung meist nicht gerade, sondern z. B. gewunden oder verdrillt (c in Abb. 20.3), sodass sie unter Umständen nicht immer die Bohrlochsohle erreichen (b und d in Abb. 20.3). Starke Verbiegung erhöht die Gefahr der Beschädigung von Rohr und Bohrlochwand. Zudem können geringe Krümmungsradien der Rohre mit bestimmten Messsonden nicht mehr befahren werden (siehe Abschn. 20.4.1.3).

20.3.2 Qualitätsprüfung der Zementierung

Sind die Zirkulationsrohre, die in der Regel aus Polyethylen bestehen, in das offene Bohrloch eingebaut, werden sie durch eine Zementierung geschützt. Zur Verpressung werden im Allgemeinen Ton-Zement-Suspensionen verwendet, die den Raum zwischen den Sondenrohren und dem umgebenden Gebirge möglichst vollständig ausfüllen sollen. Dieser Spezialzementmischung werden häufig weitere Stoffe, beispielsweise als physikalische Marker oder zur Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit, zugegeben. Weitere wichtige Funktionen der Zementierung sind die Stabilisierung des Bohrlochs, die Verhinderung hydraulischer Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Wasserstockwerken und die Wärmeübertragung vom Gebirge zu den Zirkulationsrohren. Hin und wieder ist jedoch zu

beobachten, dass eine Bohrung nicht mit einer sachgemäßen Zementierung, sondern mit Bohrklein gefüllt wird, oder dass die Zementierung an einigen Stellen nicht vollständig ist, sodass Hohlräume verbleiben. Letzteres kann zu einer mechanischen Beanspruchung und sogar Beschädigung der Sonde führen, insbesondere in Zusammenhang mit einem Frost-Tau-Wechsel. Auch kann es zu Absackungen oder aber infolge von Mineralquellungen zu Bodenhebungen kommen, die Straßen, Bauwerke etc. beschädigen können. Aus diesem Grund ist eine qualitätsgerechte komplette Zementierung ein wesentlicher Aspekt für die Qualität der Sondenausführung.

20.3.3 Ermittlung von Temperatur und Entzugsleistung

Teufenabhängige Temperaturmessungen mit Thermometer und digitaler Datenerfassungen sind eine der wichtigsten Methoden zur Beurteilung des Zustands und der Qualität einer EWS. Die Temperatur kann sowohl unmittelbar nach Fertigstellung der EWS oder aber mit modernen Techniken im laufenden EWS Betrieb erfolgen (siehe Abschn. 20.4.2 und 20.4.3).

Darüber hinaus kann ein Temperaturlog auch für die Qualitätsprüfung der Zementierung eingesetzt werden (s. Abschn. 20.4.1.2) sowie der Registrierung hydraulisch aktiver Teufenbereiche.

Sowohl stationäre als auch instationäre Temperaturszenarien werden zur Bewertung herangezogen, insbesondere in Form von Abweichungen von einem zu erwartenden typischen Verhalten der Sonde im zu erwartenden Temperaturfeld (vgl. Voelker und Voutta 2011).

Typische Anwendungen und Beispiele von Temperaturverlaufskurven veranschauliche Abb. 20.4 zu thermischen Normalprofilen und Abb. 20.5 zu

- thermischen Anomalien, bedingt durch hydraulische Zirkulationen
- thermischen Anomalien, bedingt durch exothermische Reaktionen des Gesteins mit Wasser.

Näheres hierzu findet sich in Abschn. 20.4.

Die Ermittlung der spezifischen Entzugsleistung einer EWS wird im sogenannten thermischen Response-Test ermittelt (vgl. z.b. H.S.W. 2011). Es handelt sich um ein Input-Output-Experiment, bei welchem die den Wärme-Energie-Fluß bestimmenden Parameter vom Gebirge zur EWS und umgekehrt erfasst werden. Hierzu wird

- eine definierte Wärmeenergiemenge der EWS entweder über die Zirkulation von aufgeheiztem Wasser oder durch Aufheizen der EWS-Rohre mit einem elektrischen Heizdraht als zeitabhängige Input-Größe und
- eine kontinuierliche zeit- und nach Möglichkeit auch teufenabhängige Temperaturmessung als System-Output

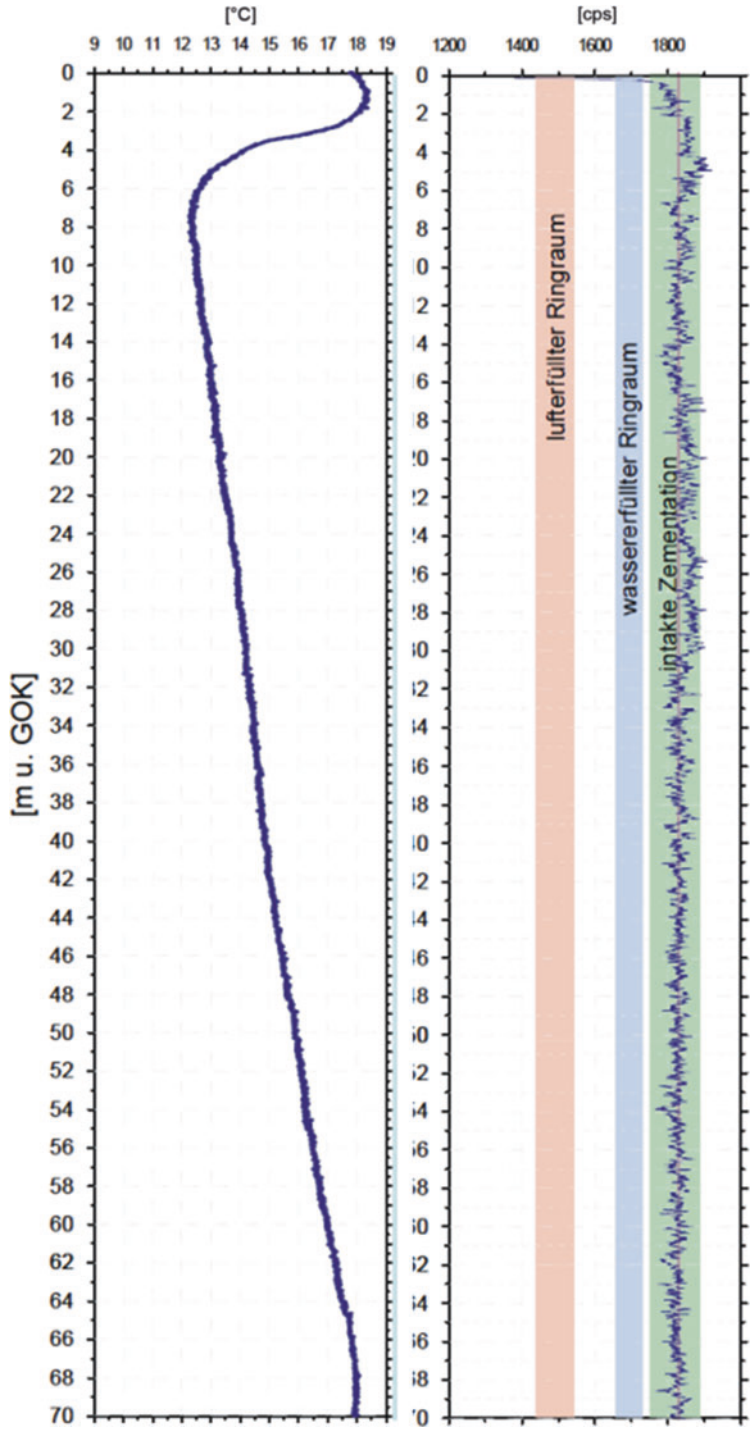


Abb. 20.4 Beispiel von Temperatur und Gamma-Gamma-Logs in einer gut zementierten Bohrung. (Aus Voelker und Voutta 2011, verändert)

verwendet und eine Systemparameteridentifikation vorgenommen. Der klassische **Thermal Response Test** wird ausführlich im Kap. 19 behandelt. Wir stellen in Abschn. 20.4.3 den erweiterten thermischen Responsetest mit Messkugeln näher dar.

20.4 Methoden der Informationsgewinnung

20.4.1 Messsonden

Messsonden sind technische Systeme, die an einem Kabel in die Rohre der EWS eingelassen werden, um dort die gewünschten Daten zu ermitteln. Sie wurden ursprünglich überwiegend für Messungen in Erdöl-/Erdgas- oder Trinkwasserbohrungen entwickelt. Erst in den letzten Jahrzehnten nimmt der Einsatz in den oft recht schlanken Zirkulationsrohren von EWS an Bedeutung zu, sodass modifizierte Messsonden mit sehr kleinem Durchmesser entwickelt wurden. Solche Systeme werden wir in diesem Abschnitt behandeln.

20.4.1.1 Bestimmung der EWS-Geometrie

Die Geometrie, d. h. die Lage der Zirkulationsrohre in der Bohrung und der Verlauf der Bohrung selbst, wird über die Orientierung einer Sonde in unterschiedlichen Tiefen ermittelt. Dafür können Beschleunigungsmesser eingesetzt werden, die Inklination und Azimut der Sonde messen. Alternativ kann die Orientierung mittels eines Magnetfeldstärkemessers im Vergleich zum umgebenden magnetischen Feld angegeben werden.

20.4.1.2 Messsonden zur Ermittlung der Qualität der Zementierung

Überwachung des Verpressvorgangs

Die Qualitätssicherung kann bereits beim Verpressvorgang zum Tragen kommen. Hierfür werden auf dem Markt Messgeräte zur Überwachung der Verpressung auf Basis einer **ferromagnetischen** Dotierung der Zementsuspension angeboten (Badoux et al. 2016). Die Messsonde wird vor dem Beginn des Verpressvorgangs in einem Rohr der Erdwärmesonde oder einem separaten Messrohr am Sondenfuß platziert. Beim Zementieren werden Menge und Durchflussrate der Suspension über einen induktiven Durchflussmengenzähler erfasst.

Darüber hinaus kann die Vollständigkeit der Zementierung anhand der **Abbindetemperatur** der Suspension überprüft werden. Bei einer guten Verfüllung wird zunächst eine etwa homogene Wärmezunahme entlang der gesamten EWS registriert. Diese erhöhte Temperatur sinkt innerhalb der nächsten Stunden und Tage relativ gleichförmig ab und passt sich der Umgebungstemperatur an (vgl. Abb. 20.4). Fehlstellen können sich damit durch Abweichungen im Temperaturverlauf zeigen (vgl. Jäger 2014).

Kontrollmessungen

Auch spätere Prüfungen nach der Zementierung sind durch diverse physikalische Methoden möglich (vgl. z. B. Baumann 2010). Hierzu gehören beispielsweise Messungen der natürlichen Gammastrahlung (**Gamma-Ray-Log**) des Gebirges und der Gammastrahlung

der Verfüllung, die auch richtungsabhängig rechtwinklig zur Rohrachse ermittelt werden kann (segmentiertes Gamma-Ray-Log) (vgl. Voelker und Voutta 2013).

Zur Erhöhung des Gammasignals der Suspension und damit einer Erhöhung des Kontrasts zum Gammasignal des Gebirges wird die Suspension mit bis zu 15 % Zirkonsand (Baumann 2010) versetzt. Idealerweise sollte die Gammaaktivität des Zements die des Gebirges signifikant überschreiten und somit zu einem einheitlichen Gammasignal der zementierten Bereiche im Vergleich zu Fehlstellen führen (Abb. 20.4 und 20.5). Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass Zirkonsand aufgrund seiner höheren Dichte absinkt, bevor die Suspension ausgehärtet ist. Diese physikalische Entmischung kann zu unterschiedlichen Gammastrahlungsintensitäten über die Sondentiefe führen. Zur Vermeidung dieses Effekts wird vorgeschlagen, auf chemischem Weg Sauerstoffbläschen an den Zirkonsand anzuhaften, um ihn so länger in Schwebe zu halten. Dies wurde aber bisher in der Praxis noch kaum erprobt. Es ergeben sich aber auch Probleme, Fehlstellen der Zementierung zu finden, wenn nicht-symmetrische Defekte auftreten. So könnte ein EWS-Rohr nur teilweise mit dotiertem Zement umgeben sein, während die natürliche Gammamessung aber dennoch erhöhte Strahlung anzeigt. Um dies auszuschließen, ist der Einsatz eines segmentierten und richtungsorientierten Gamma-Ray-Logs zu empfehlen (vgl. Voelker und Voutta 2013).

Sinnvoll ist in jedem Fall, wenn man eine „Nullmessung“ im offenen Bohrloch vornehmen kann, bevor die EWS eingebaut wird. Mit dieser Vergleichsmessung am Gebirge und unter Verwendung gammadotierten Zements erhöhen sich die Chancen erheblich, Fehlstellen im Zement mithilfe von Gamma-Ray-Logs zu detektieren.

Schließlich sei angemerkt, dass wir mit dem Gamma-Ray-Log leicht an die Auflösungsgrenzen des Verfahrens stoßen, wenn die Fehlstellen geringe Größe haben. Eine fingerdicke Fehlstelle in einem ansonsten mit Suspension oder zirkonangereicherten Zement gefüllten Bohrloch mittels Gamma-Ray-Log zu finden, ist eher unwahrscheinlich.

Ein weiteres Verfahren besteht in einer gleichzeitigen Anordnung von Gammastrahlungsquelle und -empfänger in einem Messsystem (**Gamma-Gamma-Dichte-Log**). Je höher die aufgezeichneten Signale im Empfänger sind, desto geringer ist die Dichte des Materials, die die Strahlung vom Sender zum Empfänger durchdrungen hat. Anhand des Tiefen-Dichte-Profils können Bereiche fehlerhafter Zementierung anhand geringerer Dichte lokalisiert werden.

Darüber hinaus können wassergefüllte Hohlräume im Zement anhand **Neutron-Neutron-Logs** detektiert werden. Dabei werden Neutronen emittiert und im umgebenden Material insbesondere von Wasserstoffatomen gestreut und dabei abgebremst. Je höher der Wassergehalt, desto stärker ist die Dämpfung des Signals am Empfänger.

Auch Unterschiede in der **Magnetisierbarkeit** (Suszeptibilität) entlang der Messstrecke können auf Fehlstellen hinweisen. Dafür wird die Zementsuspension mit magnetischem Material, beispielsweise Eisenspänen, dotiert, um den Kontrast zwischen dem Zement und dem Gebirge zu erhöhen.

Auch kleine Fehlstellen, die gerade durch eine ungewünschte hydraulische Wirksamkeit Probleme verursachen könnten, lassen sich detektieren. Dies ist beispielsweise durch die Untersuchung des **Temperaturprofils** möglich (vgl. Voelker und Voutta 2011). Eine

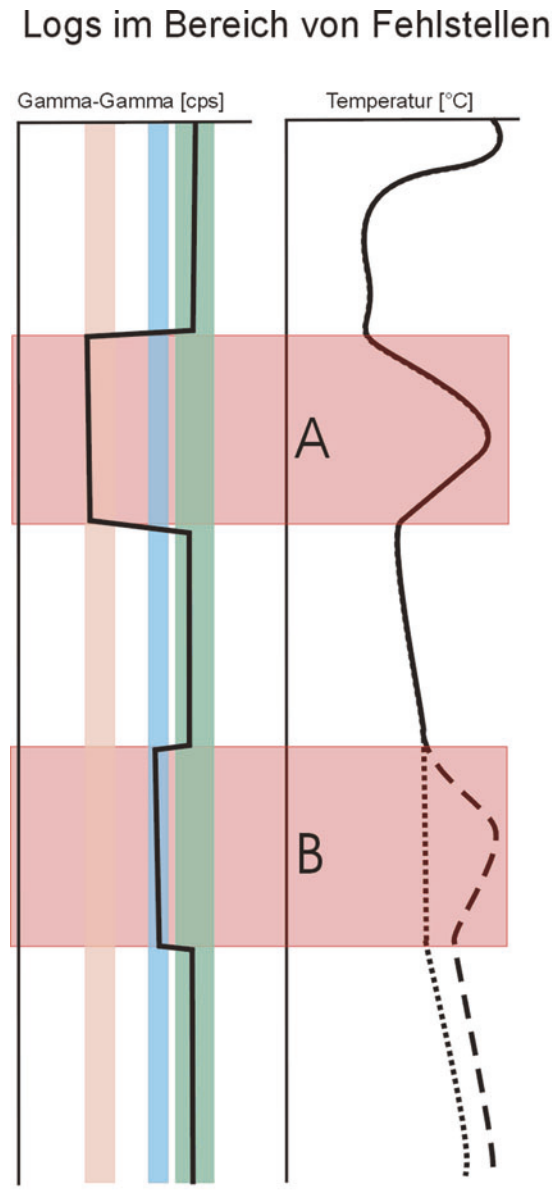


Abb. 20.5 Schematische Darstellung von Gamma-Gamma- und Temperaturlogs mit Fehlstellen. Fehlstelle A: luftgefüllter Ringraum mit isolierender Wirkung bei gezielter thermischer Beeinflussung. Fehlstelle B: wassergefüllte Fehlstelle mit Temperaturausgleich durch den hydraulischen Umlauf (gepunktet) bzw. mit zusätzlicher Reaktionswärme infolge von Mineralquellung (gestrichelt)

vollständig zementierte EWS wird ein Temperaturprofil aufweisen, das unterhalb der durch saisonale Temperaturschwankungen beeinflussten 8–10 m des Erdreiches den geothermischen Gradienten repräsentiert (Abb. 20.4). Die Temperatur sollte daher im Idealfall möglichst gleichmäßig mit der Tiefe zunehmen. Fehlstellen in nicht wasserführenden Schichten führen bei gezielter Wärmebeeinflussung, zum Beispiel im Rahmen eines Thermal Response Tests, zu thermischer Isolation, die sich in einem lokalen Temperaturpeak

zeigt. Sind Fehlstellen mit Wasser gefüllt, so können sich im Allgemeinen zwei unterschiedliche Temperaturverläufe ergeben. Zum einen führt hydraulische Umläufigkeit zu einem Temperaturausgleich in den betreffenden Intervallen und damit zu einem Abschnitt konstanter Temperatur. Sofern allerdings quellfähige Minerale im entsprechenden Intervall auftreten, führt die Reaktion mit dem Wasser bei der Quellung zu Kristallisationswärme, die die Temperatur lokal erhöht.

20.4.1.3 Restriktionen des Sondeneinsatzes

Die tatsächliche Lage und Krümmung der EWS-Rohre in der Bohrung hat starke Auswirkungen auf die Befahrbarkeit mit Sonden. Starre Teile wie Sensoreinheiten können Bereiche der Rohre mit übermäßiger Verbiegung nicht passieren und gegebenenfalls zu einer Havarie führen. Auch wenn Knicksonden mit flexiblen Teilen eingesetzt werden, können die starren Komponenten noch zu lang sein. Neben der Länge ist ebenfalls der Durchmesser der Messsonde zu berücksichtigen, der in den Standard-PE-Rohren für EWS etwa 18 mm nicht überschreiten sollte. In einigen Fällen ist eine Miniaturisierung gut möglich, in anderen Fällen, beispielsweise bei Gammadetektoren, problematischer (vgl. z. B. Baumann 2010, DMT (o.J.)).

20.4.2 Messmolche und Messkugeln

Unter Messmolchen versteht man Messsysteme, die ohne Kabel in das Vorlaufrohr eingeführt werden. Bei U-Rohren können sie durch die Zirkulation während des EWS-Betriebs den Basispunkt passieren und damit in einem Durchgang eine Messung in Vorlauf- und Rücklaufrohr durchführen. Eine Weiterentwicklung und Miniaturisierung sind Messkugeln.

Neben der kabellosen Führung zeichnen sich die Messmolche bzw. Messkugeln durch eine autarke Energieversorgung, einen Datenspeicher und entsprechende Vorrichtungen zum Auslesen von Daten aus. Daher werden Messmolche bzw. Messkugeln als komplette Systeme angeboten.

Die erste auf dem Markt angebotene Messkugel ist das GEOsniff-Messsystem von enOware. Sie zeichnet sich insbesondere durch ihre Kugelsymmetrie, ihren kleinen Durchmesser und die kompakte technische Ausführung in ihrer Funktionalität aus. Diese soll im Folgenden beschrieben werden (vgl. hierzu enOware GmbH 2015).

Die GEOsniff-Messkugel von enOware (Abb. 20.6) misst 20 mm im Durchmesser und besitzt eine Gesamtdichte von 1700 kg/m^3, sodass sie mit einer Geschwindigkeit von 6,5 m/min in der Wassersäule absinkt. Das Gehäuse beinhaltet die Messsensorik für Druck (14 oder 30 bar vorkalibriert) und Temperatur (–10 bis +40 °C, C vorkalibriert mit einer Abweichung von 0,05 K) sowie einen Energiespeicher und ermöglicht eine drahtlose Energie- und Datenübertragung. Messungen erfolgen in einer festgelegten Messfrequenz während des Mitschwimmens der Kugel mit dem Zirkulationsstrom. Während des Messvorgangs werden Daten zu Druck und Temperatur entlang eines präzisen Tiefenprofils ermittelt. Weitere Messsensorik zur Untersuchung des Hinterfüllmaterials sowie zur Ermittlung der räumlichen Lage und Position sind in der Entwicklung.

Abb. 20.6 Größenvergleich der GEOsniff-Kugel

Ein einfacher Messdurchgang in einem U-Rohr funktioniert wie folgt (Abb. 20.7):

1. Der Messvorgang wird gestartet und die Messdaten werden umgehend mit einer festgelegten Messfrequenz in der Messkugel gespeichert.
2. Die Messkugel wird in die Erdwärmesonde eingeschleust und sinkt durch ihr Eigengewicht innerhalb der mit Flüssigkeit gefüllten Erdwärmesonde ab. Währenddessen werden ständig die Messdaten Druck und Temperatur aufgezeichnet.

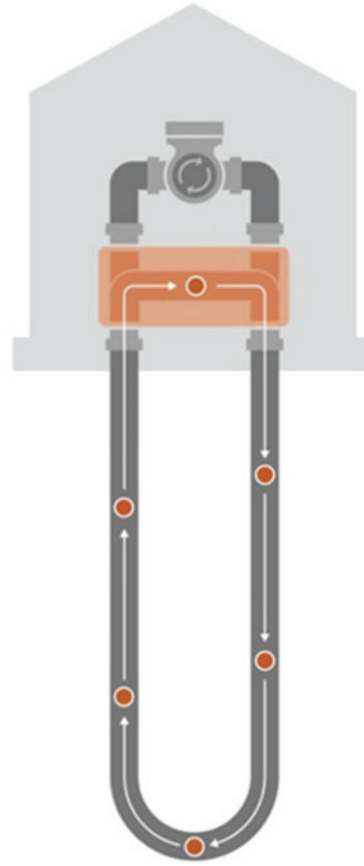


Abb. 20.7 Messdurchgang mit GEOsniff Messkugel

3. Die Messkugel ist am tiefsten Punkt der Erdwärmesonde angelangt und verbleibt dort so lange, bis eine angeschlossene Pumpe sie wieder nach oben befördert.
4. Die Messkugel wird durch den Pumpendruck zum Sondenrücklauf befördert.
5. Am höchsten Punkt wird die Messkugel über einen manuellen Bypass oder einen automatischen Bypass aus dem Zirkulationskreislauf geschleust.
6. Die Messdaten werden drahtlos aus der Messkugel ausgelesen, der Datenspeicher wird gelöscht, und anschließend wird der Energiespeicher induktiv geladen.

20.4.3 Langzeitmonitoring und erweiterter Thermal Response Test mit Messkugeln als neue Qualitätssicherungskonzepte

Wie die vorangegangenen Abschnitte gezeigt haben, umgehen Messmolche und Messkugeln bestimmte Nachteile von Messsonden. Durch ihre geringe Größe, insbesondere in der Länge, können sie auch stark gekrümmte Rohrabschnitte passieren. Das Bohrlochtiefste wird so mit der Sensorik problemlos erreicht, und über die Druckmessungen ist die absolute Tiefe des Sondenrohres bestimmbar.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich, wenn am Kopf der EWS ein dauerhafter Bypass mit Pumpe installiert wird (Abb. 20.8) (vgl. hierzu enOware GmbH 2015). Dann kann der Messvorgang automatisiert werden, und langlaufende Messprogramme können ohne Betriebsunterbrechung der EWS selbst über mehrere Jahre durchgeführt werden. Dies ist aufgrund der berührungslosen Daten- und Energieübertragung leicht möglich. Hier können beispielsweise wiederholte Messfahrten nach einem vorgegebenen Programm konfiguriert

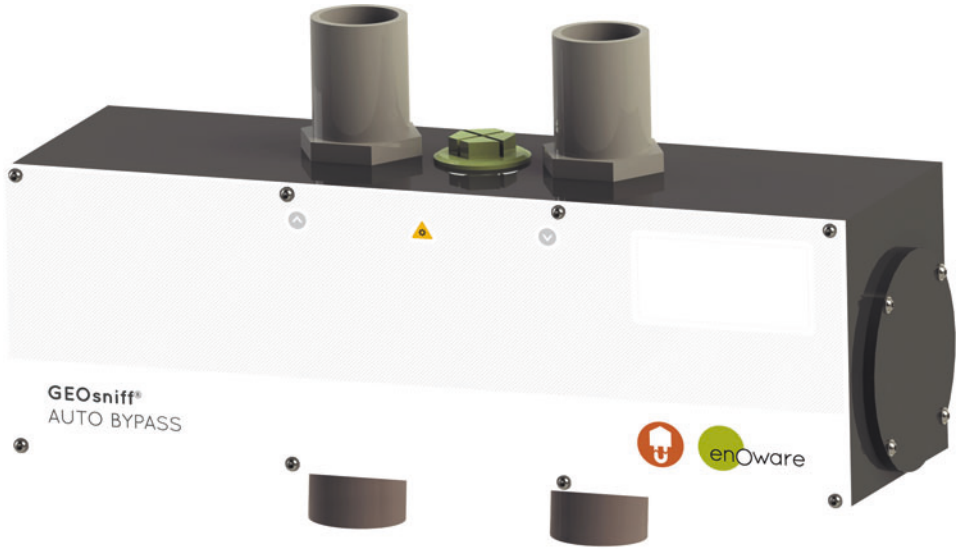


Abb. 20.8 GEOsniff-Autobypass der enOware GmbH

und ausgeführt werden. Beim Auslesen der Daten können Abweichungen von Normwerten erkannt und mit Warnhinweisen kommuniziert werden. Das Messsystem eignet sich daher nicht nur für Initialmessungen an einer offenen EWS, sondern auch für Nachmessungen während des EWS-Betriebs, beispielsweise in Form eines Langzeitmonitorings.

Auch ein erweiterter Thermal Response Test (eTRT) kann durch einen automatisierten Messablauf durchgeführt werden. Die Wärmezufuhr erfolgt durch einen in das Rohr eingebrachten oder an der Außenseite zementierten Heizdraht. Während der Aufheizungs- und Abkühlungsphase (ohne Zirkulation) werden mehrere Messkugeln in bestimmten Abständen automatisch in das Rohr eingebracht und verbleiben bis zum Ende des Tests im Sondenfuß. Anschließend werden sie zurückgepumpt. Durch die exaktere Erfassung der Temperaturdaten im Vergleich zu klassischen TRTs wird eine präzisere Systemidentifikation des thermischen Verhaltens der EWS möglich. Die Entzugsleistungen wie auch der thermische Bohrlochwiderstand können zum Beispiel über die Tiefe aufgelöst werden.

Literatur

Badoux, V., Gropius, M., Soom, M.: Qualitätssicherung Erdwärmesonden. Temperatur- und Verlaufsmessungen in Erdwärmesonden. GEOTEST Schlussbericht zu Studie i. A. von Energie-Schweiz (2016)

Baumann, K.: Erste Erfahrungen bei der bohrlochgeophysikalischen Überprüfung von Erdwärmesonden. In: bbr 5, S. 34–37 (2010)

DMT (Hrsg.): Einsatz von extrem dünnen Bohrlochsonden in oberflächennahen Erdwärmesonden. Präsentation (o. J.)

enOware GmbH (Hrsg.): Information for Smarter Living. GEOsniff Geothermie Monitoring. Produktinformationsbroschüre (2015)

H.S.W. Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH (Hrsg.): Geothermal Response Test GRT/TRT. Internetauftritt des Unternehmens unter: http://www.response-test.de (2011). Zugegriffen: 03. März 2016

Jäger, C.: Effizienzsteigerung und Qualitätssicherung von Erdwärmesonden. http://www.geothermie-nachrichten.de/effizienzsteigerung-und-qualitaetssicherung-von-erdwaermesonden-2. (2014). Zugegriffen: 03. März 2016

Mathews, T. (o. J.): Gutachten. http://www.sv-mathews.de/de/gutachten Zugegriffen: 04. März 2016

Michalik, E.: Erläuterungen der Messysteme für die Kontrolle des Abdichtungsvorganges bei der Herstellung von Erdwärmesonden. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Geothermie/LQS_EWS/Hersteller/Michalik_Erlaeuterung.pdf (2012). Zugegriffen: 03. März 2016

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (Hrsg.): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS), Stand September 2015. http://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Geothermie/LQS_EWS/1509_Leitlinien_Qualitaetssicherung_Erdwaermesonden.pdf. (2015). Zugegriffen: 03. März 2016

Müller, L.: Frost-Tau-Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden. Beitrag „Der Geothermiekongress 2009“, Bochum (2009)

Riegger, M.: Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden-Technik. Projektabschlussbericht. Solites, Stuttgart (2013)

Santherr Geothermietechnik (Hrsg.): CemTrakker-Suszeptibilitätsmesssystem. System für die Verpressüberwachung bei Erdwärmebohrungen. Produktinformation (o. J.).

Sauer, M., Mands, E., Grundmann, E., Sanner, B.: Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten des Geothermal Response Test: Bestimmung der Erwärmesondenlänge mittels Thermoimpuls. Beitrag „Der Geothermiekongress 2010“ Karlsruhe, 17.–19. Nov. 2010

Sensys Sensorik & Systemtechnologie GmbH: Magnetische Suzeptibilitätsmessung für die Verfüllkontrolle von Geothermiebohrungen. Informationsblatt (2015)

Terratec Geophysical Services: Borehole Probe Data Sheet MBDV. Produktinformation (2016).

Terratec Geophysical Services: Borehole Probe Data Sheet MGAMT. Produktinformation (2016).

Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 4. überarbeitete Auflage. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Ser-vice/Publikationen/Energie/Leitfaden_-_Nutzung_von_Erdwaerme_1_.pdf. (2016). Zugegriffen: 03. März 2016

Voelker, H., Voutta, A.: Erdwärmesonden. Nachweis der abdichtenden Wirkung der Ringraumhinterfüllung. bbr Jahresmagazin **62**(12), 46–53 (2011)

Voelker, H., Voutta, A.: Hinterfüllung von Erdwärmesonden. Chancen und Grenzen der Gamma-Gamma-Dichte-Messung sowie ergänzende Messmethoden. Handout zum Fachgespräch Erdwärmenutzung in Hessen, Idstein (2012)

Voelker, H., Voutta, A.: Studie zu Gamma-Gamma-Dichte-Anomalie-Messungen im Ringraum von Erdwärmesonden im Technikums-Maßstab. Studie im Auftrag der LUBW Anstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2013)

Voutta, A., Voelker, H.: Vorstellung aktueller Messmethoden bei der Überprüfung der Zementationsgüte von Erdwärmesonden. Präsentation (2011)

Qualitätssicherung und Zertifizierung

21

Christine Buddenbohm

Inhaltsverzeichnis

21.1 Einleitung 654
21.2 Mittel der Qualitätssicherung 655
21.3 Qualitätssicherung bei Wärmepumpenherstellern 656
21.3.1 Gütesiegel 656
21.4 Qualitätssicherung bei Bohrunternehmen 659
21.4.1 Grundlagen 659
21.4.2 Zertifizierung von Bohrunternehmen nach W 120 660
21.4.3 Zeichen „Fremdüberwachtes Bohrunternehmen für Erdwärmesonden“ 665
21.5 Qualitätssicherung bei Wärmepumpeninstallateuren 667
21.6 Qualitätssicherung bei Architekten und Fachplanern 668
Literatur 669

Zusammenfassung

Die weitere Entwicklung der oberflächennahen Geothermie ist ganz erheblich davon abhängig, ob die ökonomischen und ökologischen Vorteile dieser Technologie durch sorgfältig geplante, installierte und richtig betriebene Anlagen auch zum Tragen kommen. Einen wesentlichen Beitrag dazu können Qualitätssicherungsmaßnahmen leisten. Darunter sind organisatorische und technische Maßnahmen zu verstehen, die der Schaffung und Sicherstellung einer definierten Qualität dienen. Die Einhaltung dieser Maßnahmen wird häufig durch Zertifikate, Gütesiegel oder Gütezeichen nachgewiesen. Glaubwürdig sind diese, wenn ihre Ausstellung durch eine unabhängige und fachkundige Stelle bestätigt wird. Am bekanntesten sind die Gütesiegel für Wärmepumpenhersteller und die Zertifizierung von Bohrunternehmen. Doch weder eine

Christine Buddenbohm (✉)
SakostaCCB GmbH, Seeweg 12, 12529 Schönefeld b. Berlin, Deutschland
e-mail: c.buddenbohm@sakostaccb.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_21

fachgerecht ausgeführte Geothermiebohrung noch eine mit Gütesiegel ausgezeichnete Wärmepumpe können ohne eine fachgerechte Planung die gewünschte Anlagenqualität garantieren. Gerade im Bereich der Architekten, Planer, Fachbüros und Installateure mangelt es derzeit an definierten Qualitäts- und Qualifikationsanforderungen, sodass Handlungsbedarf besteht. Dies ist umso dringlicher, da die Herausforderung der nächsten Jahre die ganzheitliche Bearbeitung und Betrachtung einer Geothermieanlage von der Planung bis zur Ausführung mit Fokus auf die Schnittstellenregelung zwischen den Beteiligten sein wird, die nur in der Hand von Planern liegen kann.

Schlüsselwörter
Qualitätssicherung · Zertifizierung · Fachplaner · Betriebliches Managementsystem · Umweltzeichen · Gütesiegel

21.1 Einleitung

Die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie birgt ein beachtliches Potenzial zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfs im Bereich der Gebäudebeheizung und -klimatisierung. Die gemeinsame Branchenstatistik des Bundesverbands Wärmepumpe (BWP) und des Bundesverbands der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) weist für Deutschland bei den erdgekoppelten Wärmepumpen einen deutlichen Anstieg der Verkaufszahlen zwischen 2005 (Beginn der Erhebungen) und 2008 aus (BWP 2016a). In den Folgejahren wurden jedoch leicht rückläufige Absatzzahlen verzeichnet. Ursachen sind die Preisentwicklung konventioneller, fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas, die lange Zeit unzureichende Fördermittelsituation sowie die gesetzlichen und administrativen Rahmenbedingungen. Zum letztgenannten Kriterium zählt auch die Entwicklung der Anforderungen aus behördlichen Genehmigungen für die Errichtung von Geothermieanlagen. Aufgrund der Erkenntnisse und Erfahrungen der letzten Jahre sind die umweltschutzrechtlichen Auflagen an diese Technologie deutlich umfangreicher geworden. Der Fokus ist dabei bisher auf die ausführende Seite, insbesondere die Bohrunternehmen gerichtet. Bundesweit hat sich durchgesetzt, dass die Erdwärmeerschließung über Erdwärmesonden oder Brunnenanlagen von einem qualifizierten Bohrunternehmen durchgeführt werden muss. In den bundesweit dafür erforderlichen wasserrechtlichen Genehmigungen werden Fachunternehmenszertifizierungen und/oder besondere Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Bohrunternehmen gefordert. Hier gab es in den letzten Jahren eine regelrecht explosive Entwicklung der behördlichen Auflagen, die nicht zuletzt einer Verunsicherung durch Schadensfälle und dem Umstand geschuldet ist, dass die in Richtlinien wie der VDI 4640 Blatt 2 (VDI 2001) festgelegten technischen Standards weit hinter den aktuellen Entwicklungen zurückblieben. Im Gegensatz zur straffen Regulierung bei den Bohrunternehmen fehlen konkrete Anforderungen an die Planer, denn jeder fachgerecht ausgeführten Erdwärmebohrung muss auch eine fachkundige Planung

der Wärmepumpenanlage vorangehen. Es ist ebenso wichtig, dass Architekten, Fachplaner für die technische Gebäudeausrüstung (TGA), geologische Ingenieurbüros und Heizungsinstallateure die speziellen Anforderungen an Wärmepumpen und die Erdwärmenutzung fachkundig beurteilen und Anlagen planen können. Hier spielt neben der Fachkompetenz die Erfahrung eine wesentliche Rolle. Ein entsprechendes Qualitätssiegel oder Zertifikat, das einen erfahrenen, kompetenten und zuverlässigen Planer auszeichnet, existiert bisher jedoch nicht. Neben der Qualitätssicherung auf planerischer Ebene wird die Herausforderung der nächsten Jahre die ganzheitliche Bearbeitung einer Geothermieanlage von der Planung bis zur Ausführung sein, wobei der Schnittstellenregelung zwischen den beteiligten Planern und Gewerken eine wichtige Rolle zufällt. Hier wird auf den VBI-Leitfaden *Oberflächennahe Geothermie* (VBI 2012) und die AHO-Schrift *Planungsleistungen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie* (AHO 2011) verwiesen.

21.2 Mittel der Qualitätssicherung

Qualität soll im Rahmen dieses Beitrages in Anlehnung an den Qualitätsbegriff der DIN EN ISO 9001 (2015-11) verstanden werden als Eigenschaft eines Produktes oder einer Dienstleistung, mit der bestätigt wird, dass bestimmte vorher festgelegte Merkmale erfüllt sind. Bei Anlagen zur Nutzung Oberflächennaher Geothermie stellen sich die wichtigsten Qualitätsmerkmale wie folgt dar:

- fachgerechte Auslegung der Anlage entsprechend des Wärme- und/oder Kältebedarf des Gebäudes,
- Wirtschaftlichkeit,
- Einhaltung der Auflagen aus den behördlichen Genehmigungen,
- einwandfreie Funktionstüchtigkeit,
- etablierter Mindesteffizienzstandard der Wärmepumpe,
- Betriebssicherheit,
- hohe Lebensdauer und geringer Verschleiß,
- kompetenter Service.

Gewissheit über die Einhaltung aller versprochenen Qualitätsmerkmale erhält man erst nach einigen Jahren des Betriebes und bei messtechnischer Überwachung der Anlage. Das Vertrauen des Kunden ist daher neben dem Preis einer der wichtigsten Wettbewerbsfaktoren. Um es zu gewinnen, werden Maßnahmen zur Qualitätssicherung als probates Mittel genutzt. Darunter sind organisatorische und technische Maßnahmen zu verstehen, die der Schaffung und Sicherstellung einer definierten Qualität dienen. Sie können durch Eigen- und Fremdüberwachungen kontrolliert werden. Die Fremdüberwachungen gehen üblicherweise mit der Ausstellung von entsprechenden Zertifikaten durch eine unabhängige Überprüfungsgesellschaft einher. Am Markt konzentrieren sich diesbezüglich Zertifikate

auf das Handwerk – auf den Wärmepumpenhersteller, den Wärmepumpeninstallateur und das Bohrunternehmen.

21.3 Qualitätssicherung bei Wärmepumpenherstellern

21.3.1 Gütesiegel

Hersteller können sich zur Kennzeichnung ihrer Produkte eines Gütesiegels bedienen. Umgangssprachlich wird dafür auch der Begriff „Gütezeichen“ genutzt. Unter der Güte wird im Allgemeinen die gute Qualität eines Produktes verstanden. Das Gütesiegel soll als Zeichen für die Qualität und damit für bestimmte positive und prüffähige Beschaffenheitsmerkmale des Produktes stehen. Die Verwendung und Werbung mit dem Begriff des Gütezeichens ist rechtlich nicht geregelt, sodass eine Vielzahl an Gütezeichen in der Produktwerbung Verwendung finden, die von wenig vertrauenswürdigen selbst vergebenen Herstellersiegeln bis hin zu Qualitätszeichen reichen, die durch eine unabhängige und auf der Basis von anerkannten Normen durchgeführte Prüfung die versprochene Qualität garantieren.

Gütesiegel im Bereich der Wärmepumpen werden für solche Eigenschaften wie Umweltverträglichkeit, Energieeffizienz und Betriebssicherheit vergeben. Die Testbedingungen und Testverfahren sind für die nachfolgend aufgeführten Gütesiegel in Regelwerken/Normen verbindlich festgelegt. Die technische Prüfung erfolgt durch unabhängige Prüfinstitutionen. Am weitesten verbreitet ist das EHPA-Gütesiegel (siehe Abschn. 21.3.1.1).

Erwähnt werden sollen aber auch die am Markt existierenden Umweltzeichen für Wärmepumpen wie „Blauer Engel“, dem nach den Richtlinien des RAL-UZ 118 (RAL, April 2012) oder „Euroblume“ (gemeinschaftliches Umweltzeichen, gemäß Entscheidung 2007/742/EG, 09.11.2007). Sie werden im Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG, 07.08.2008) alternativ zum EHPA-Gütesiegel als Voraussetzung für die Förderfähigkeit von Wärmepumpen aufgeführt.

21.3.1.1 EHPA-Gütesiegel

Die Abkürzung EHPA steht für *European Heat Pump Association*, dem Dachverband der europäischen Wärmepumpenbranche. Vorgänger des EHPA-Gütesiegels war das sogenannte „DACH-Gütesiegel“, das nur für Deutschland, Österreich und die Schweiz galt.

Die Verleihung dieses Labels (Abb. 21.1) erfolgt nur an Wärmepumpen bis 100 KW. Sie werden einer technischen Prüfung durch ein unabhängiges Testinstitut unterzogen. In Deutschland sind für diese Tests bislang fünf Prüfinstitute autorisiert (Stand Januar 2016, Quelle: BWP 2016b):

- TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH,
- TÜV SÜD Industrie Service GmbH,

Abb. 21.1 EHPA-Gütesiegel. (© Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.)

- VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut,
- ILK Dresden und die
- Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Heiz- und Raumlufttechnik.

Grundlage der technischen Prüfung stellen die DIN EN 14511:2013-11 und die DIN EN 14825: 2013-12 dar. Die Prüfstellen messen den COP-Wert (*coefficient of performance*), der die Effizienz der Wärmepumpe repräsentiert, sowie die Schallleistung und stellen fest, ob diese mit den Herstellerangaben übereinstimmen. Die vom Gütesiegel geforderten Mindesteffizienzwerte (Stand: 01.12.2014), die auch den Mindestwerten für die Förderung nach dem Marktanreizprogramm in Deutschland entsprechen, liegen für Sole-Wasser-Wärmepumpen bei COP = 4,3 (B0/W35) und bei Wasser-Wasser-Wärmepumpen bei COP = 5,1 (W10/W35).

Darüber hinaus sind für das EHPA-Gütesiegel servicespezifische Qualitätsrichtlinien für Wärmepumpen festgelegt. Dazu hat der Hersteller zum Beispiel folgende Nachweise zu erbringen:

- verständliche Planungsunterlagen für das Fachhandwerk,
- technische Dokumentationen,
- Serviceunterlagen,

- Einbau- und Betriebsanleitung in Landessprache,
- Dokumentation der Garantiebestimmungen,
- flächendeckende und funktionierende Servicestruktur,
- Gewährung von 2 Jahren Vollgarantie sowie 10 Jahren für die Lieferung von Ersatzteilen,
- Verfügbarkeit des Kundendienstes innerhalb 24 Stunden im gesamten Vertriebsgebiet.

Der Wärmepumpenhersteller erhält das von ihm beantragte EHPA-Gütesiegel bei positiver Prüfung für einen Zeitraum von drei Jahren. Danach muss zur weiteren Verwendung des Gütesiegels ein Verlängerungsantrag gestellt werden.

21.3.1.2 Wärmepumpen-Keymark

Die Keymark (Abb. 21.2) ist ein gesetzlich geschütztes und eingetragenes europäisches Normenkonformitätszeichen, das auf Empfehlung des Europäischen Rates durch die europäischen Normungskommissionen CEN und CENELEC initiiert wurde. Es stellt eine freiwillige Kennzeichnung dar und soll die CE-Kennzeichnung von Produkten sinnvoll ergänzen und der Vertrauensbildung der Verbraucher dienen, die sich damit auf eine geprüfte Übereinstimmung des jeweiligen Produktes mit den in den Europäischen Normen genannten Anforderungen verlassen können.

Bisher ist die Keymark bereits für solarthermische Produkte, Wärmedämmstoffe für Gebäude und industrielle Anwendungen, Steinzeugrohre, keramische Fliesen, Feuerlöscher usw. eingeführt. Ende 2015 wurde mit der Einführung der Wärmepumpen-Keymark begonnen. Sie soll sich als ein einheitliches sowie europaweit gültiges und herstellerunabhängiges Qualitätszertifikat für Wärmepumpen etablieren und im deutschsprachigen Raum die neue Basiszertifizierung werden, auf die das bekannte EHPA-Gütesiegel (siehe Abschn. 21.3.1.1) aufbaut.

Ein Keymark-Zertifikat erhalten die Wärmepumpen, bei denen in einem durch die jeweilige Zertifizierungsstelle anerkannten Prüflabor die Übereinstimmung mit den

Abb. 21.2 Zeichen Keymark-Wärmepumpe. (© DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH)

Anforderungen der Europäischen Norm und des Keymark-Zertifizierungsprogramms festgestellt wurde. Grundlagen sind:

- eine werkseigene Produktionskontrolle (WPK) unter Berücksichtigung der Elemente der EN ISO 9001: 2015-11,
- Leistungsprüfungen, basierend auf EN 14511:2013-11, EN 14825:2013-12, EN 15879:2011-05 und EN 16147:2011-04 sowie
- Fertigungsaudits und Qualitätsüberwachungen von unabhängigen Prüf- und Zertifizierungsstellen.

Derzeit ist die Zertifizierungsgesellschaft DIN CERTCO die für Deutschland bevollmächtigte Zertifizierungsstelle zur Vergabe der Keymark. Hier reicht der Wärmepumpenhersteller seinen Antrag auf Keymark-Zertifizierung ein.

Nach erfolgreich bestandener Erstinspektion und Typprüfung wird ein Zertifikat ausgestellt, das mit einer Nutzungslizenz des Keymark-Zeichens verbunden ist. Das Zertifikat besitzt eine Gültigkeit von 5 Jahren. In dieser Zeit erfolgt jährliche eine Fremdüberwachung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie zusätzlich im Rhythmus von 2 Jahren eine Kontrollprüfung der Produkte (Quelle: DINCERTCO 2016).

21.4 Qualitätssicherung bei Bohrunternehmen

21.4.1 Grundlagen

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine funktionstüchtige und energieeffiziente Wärmepumpenanlage zur Gewinnung von Erdwärme ist die sach- und fachgerechte Ausführung des erdseitigen Anlagenteils. In Deutschland werden dabei Erdwärmesonden am häufigsten als Wärmeübertrager gewählt. Daneben finden auch Erdwärmekollektoren, Anlagen mit Direktverdampfung, Energiepfähle und die thermische Nutzung des Grundwassers mit Brunnenanlagen Anwendung. Bis auf den Fall der Erdwärmekollektoren ist die Expertise von Bohrunternehmen gefragt. Sie müssen die Bohrungen niederbringen, die Wärmeübertrager einbauen und oftmals auch die horizontale Anbindung bis an das Haus realisieren.

In Abhängigkeit vom Wärmeübertrager sind im Bereich der Oberflächennahen Geothermie Bohrungen zwischen einigen Metern bis 400 m erforderlich. Die tiefsten Bohrungen werden für Erdwärmesonden abgeteuft. Für jede Bohrung, die das Grundwasser beeinträchtigen kann, sind die Belange des Grundwasserschutzes zu berücksichtigen. Als mögliche Beeinträchtigung gilt nicht nur die direkte Erschließung des Grundwassers wie bei Brunnenanlagen. Auch die thermische Beeinflussung durch Wärmeentzug oder Wärmeeintrag und insbesondere das Abteufen und der Ausbau der Bohrungen selbst können Beschaffenheitsänderungen des Grundwassers herbeiführen. Hier dürfen

weder Schadstoffeinträge in das Grundwasser noch hydraulische Kurzschlüsse zwischen unterschiedlichen Grundwasserstockwerken riskiert werden.

In Deutschland wird der Grundwasserschutz durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2009) und durch Landeswassergesetze geregelt. In Auslegung des Wasserrechts stellen Geothermiebohrungen i. d. R. Maßnahmen dar, „... die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen" (§ 9, Abs. 2, Nr.2 in WHG 2009). Damit unterliegen diese Bohrungen einer Erlaubnispflicht. Der Bauherr hat diese Erlaubnis bei der regional zuständigen Wasserbehörde zu beantragen. Die Erteilung wird in der Regel mit Inhalts- und Nebenbestimmungen verbunden, die u. a. Anforderungen an das Bohrunternehmen, die fachliche Ausführung der Bohrungen und den Ausbau beinhalten. Unterscheiden sich auch Umfang und Details der Bescheide von Bundesland zu Bundesland deutlich voneinander, so wird in Deutschland jedoch fast flächendeckend gefordert, dass das Bohrunternehmen eine Zertifizierung nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 120 oder eine vergleichbare Fachqualifikation nachweisen muss. Die Wasserbehörde kann damit davon ausgehen, dass die Ausführung der Bohrvorhaben im Einklang mit dem Schutz des Grundwassers und nach dem Stand der Technik erfolgt.

Unabhängig von den administrativen Anforderungen stärken Fachunternehmenszertifikate auch das Vertrauen des Kunden in die Qualität der auszuführenden Arbeiten.

21.4.2 Zertifizierung von Bohrunternehmen nach W 120

Im Jahr 1991 veröffentlichte der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) als Regelwerksetzer für die Gas- und Wasserversorgungsbranche erstmalig das DVGW-Arbeitsblatt W 120 als technische Regel für den deutschen Markt. Hier waren die Anforderungen an die technische Fachkompetenz und Leistungsfähigkeit von Unternehmen im Bereich Bohrtechnik und Brunnenbau formuliert.

Seither ist das DVGW-Arbeitsblatt W 120 mehrfach überarbeitet worden und aufgrund der speziellen Anforderungen an die Qualitätssicherung bei der Errichtung von Erdwärmesonden seit 2012 untergliedert in Teil 1 und 2. Der Teil 1 der W 120 (DVGW W 120-1 Ausgabe 2012-08) beschäftigt sich mit den Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik, Brunnenbau sowie Regenerierung, Sanierung und Rückbau von Brunnen. In der W 120, Teil 2 (DVGW W 120-2 (A):2013-07) werden die Bereiche Bohrtechnik und Oberflächennahe Geothermie behandelt.

Bohrunternehmen können die Einhaltung der Anforderungen des jeweiligen Arbeitsblattes z. B. durch eine Zertifizierung nachweisen. Stellen, die eine solche Zertifizierung durchführen, sollten nachweislich über Neutralität, Unabhängigkeit und Kompetenz verfügen. Dabei hat sich die Akkreditierung der Zertifizierungsstellen nach der am Markt als geeignet herausgestellt.

21.4.2.1 Differenzierung in Gruppen

Aufgrund der speziellen Qualifikationsanforderungen, insbesondere im Hinblick auf die gerätetechnische Ausstattung eines Unternehmens, die Fachkunde, Erfahrungen und

Referenzen, erfolgt bei der Zertifizierung eine Unterscheidung nach Gruppen. Im Arbeitsblatt W 120-1 (A):2012-08 werden zur Differenzierung z. B. der Ausbaudurchmesser und das Bohrverfahren sowie die erreichbare Bohrteufe herangezogen. Das Arbeitsblatt W 120-2 (A):2013-07 unterscheidet bei den Bohrungen zur Errichtung von Erdwärmesonden drei Teufengruppen (Bohrungen bis 100 m, 200 m und 400 m).

21.4.2.2 Anforderungen

Die Anforderungen der DVGW-Arbeitsblätter W 120-1 (A):2012-08 und W 120-2(A): 2013-07 richten sich im Wesentlichen an die Bohrunternehmen. Es werden jedoch auch Anforderungen an die Durchführung der Prüfungen und an die Qualifikation der Prüfstellen formuliert (siehe Abb. 21.3).

Der Katalog der formalen Anforderungen der W 120-1 (A):2012-08 und W 120-2(A):2013-07 ist sehr umfangreich und betrifft neben der Verpflichtung zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und technischer Regeln insbesondere folgende Punkte:

- Abschluss eines ausreichenden Versicherungsschutzes,
- Führen eines betrieblichen Managementsystems (BMS),
- Vorweisen einer ausreichenden Anzahl an Referenzen,
- Einsatz qualifizierten Fachpersonals und geeigneter Gerätetechnik,
- Ausreichende Vorbereitung und fachgerechte Durchführung der Baumaßnahmen.

Die Bohrunternehmen müssen sich verpflichten, diese Punkte einzuhalten.

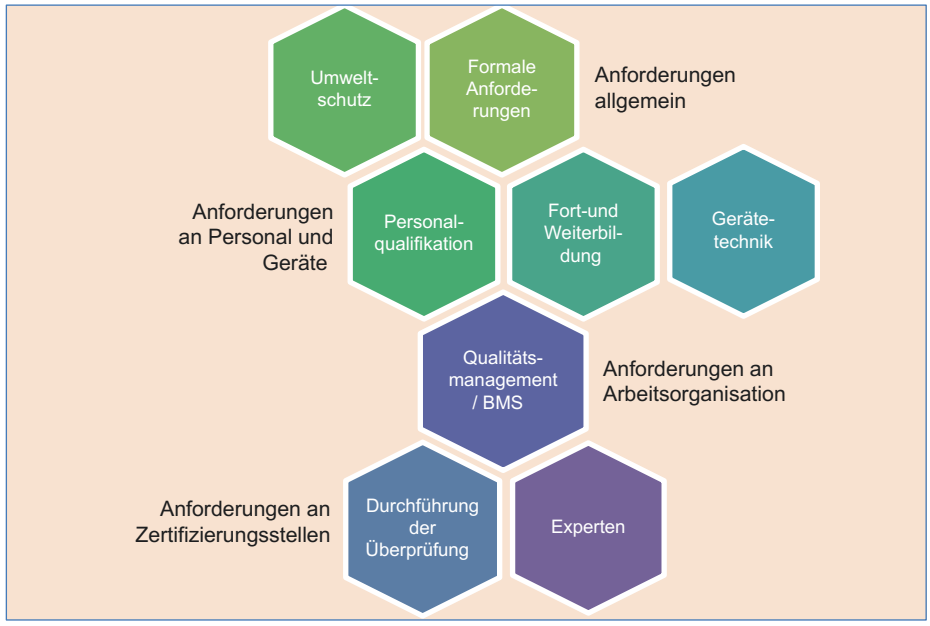


Abb. 21.3 Anforderungen der DVGW-Arbeitsblätter W 120-1 und W 120-2 (BMS: betriebliches Managementsystem)

Tab. 21.1 Erforderliche Personalqualifikationen nach W 120-1 (A):2012-08 und W 120-2(A): 2013-07

W 120-1 (A)	W 120-2 (A)
Brunnenbau	**Erdwärmesonden**
Verantwortliche Fachaufsicht	
• Meister Brunnenbauerhandwerk oder • Hoch- bzw. Fachhochschulabschluss einschlägiger Fachrichtungen oder • Ausnahmegenehmigung nach § 7a/b, § 8 und § 9 Handwerksordnung	• Meister Brunnenbauerhandwerk oder • Hoch- bzw. Fachhochschulabschluss einschlägiger Fachrichtungen oder • Ausnahmegenehmigung nach § 7a/b, § 8 und § 9 Handwerksordnung oder • Werkpolier Brunnenbau oder • Werkpolier Geothermie
Mindestens 5 Jahre Berufserfahrung in Bohr-, Brunnenbau- oder Brunnenregenerierunternehmen	3 Jahre Berufserfahrung in Bohrunternehmen
Bauleitende Fachkraft	
Wie verantwortliche Fachaufsicht oder Werkpolier Brunnenbau	Wie verantwortliche Fachaufsicht oder ausgebildeter Brunnenbauer
Fachpersonal	
• Ausgebildeter Brunnenbauer oder • Bohrgeräteführer nach ehemaliger DIN 4021 oder • Facharbeiter für geologische Bohrungen oder • Vorarbeiter Brunnenbau	• Ausgebildeter Brunnenbauer oder • Fachkraft für geothermische Zwecke und den Einbau von geschlossenen Wärmeträgersystemen oder • Bohrgeräteführer nach ehemaliger DIN 4021 oder • Facharbeiter für geologische Bohrungen oder • Bergbautechnologe Fachrichtung Tiefbohrtechnik oder • Vorarbeiter Geothermie

Bei den vorzuweisenden Personalqualifikationen werden spezielle Ausbildungen für die verantwortliche Fachaufsicht des Unternehmens, die bauleitende Fachkraft (Bauleiter) und das Fachpersonal (Geräteführer) verlangt (siehe Tab. 21.1).

Seit 2012 bzw. 2013 haben die Bohrunternehmen im Rahmen der Prüfung/Zertifizierung nach W 120-1 (A):2012-08 und W 120-2(A):2013-07 auch ein sogenanntes betriebliches Managementsystem (BMS) nachzuweisen. Im Wesentlichen geht es dabei um die Unternehmensorganisation zur Sicherstellung einer nachvollziehbaren Auftragsbearbeitung, die Gestaltung effizienter Verfahrensabläufe sowie um die Einhaltung von Arbeits- und Umweltschutzbestimmungen im Unternehmen (siehe Abb. 21.4).

Es müssen dabei u. a. dargelegt werden:

- Unternehmensorganisation:
  - Organigramm mit Weisungsbefugnissen,
  - Stellenbeschreibungen,

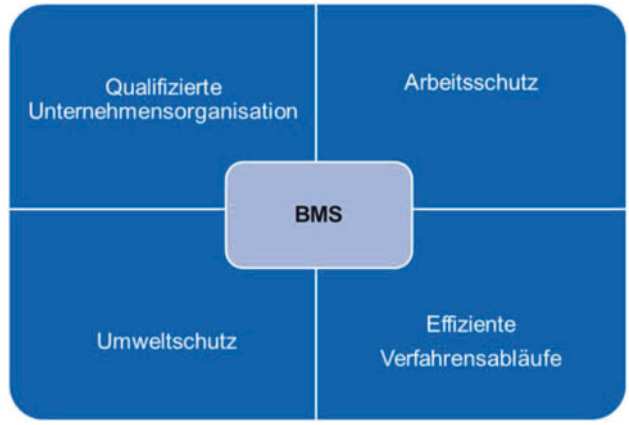


Abb. 21.4 Inhalte des betrieblichen Managementsystems

  - Beauftragungen von Verantwortlichen,
  - Arbeitsanweisungen für relevante Tätigkeiten;
- Verfahrensabläufe (Beschreibung und Verantwortlichkeiten) für:
  - Qualitätssicherung bei der Beschaffung, Handhabung und Lagerung von Arbeits- und Prüfmitteln sowie Baumaterialien,
  - Vorbereitung, Dokumentation und Abnahme von Baustellentätigkeiten,
  - Qualifikation und Schulung von Mitarbeitern (Schulungsbedarfsplan),
  - Pflege und Wartung von Geräten, Werkzeugen usw.,
  - Qualifikationskontrolle beim Einsatz von Nachunternehmern,
  - Pflege eines Projektarchivs;
- Arbeitsschutz:
  - Gefährdungsbeurteilungen,
  - Regelmäßige Unterweisung von Mitarbeitern,
  - Regelmäßige Geräteabnahmen durch befähigte Personen oder Sachverständige;
- Umweltschutz:
  - Einhaltung der geltenden Umweltschutzbestimmungen (wie z. B. in den wasserrechtlichen Bescheiden zum Schutz des Grundwassers, Entsorgung von Bohrgut/Bohrspülung, Ableiten von Grundwasser aufgeführt),
  - Gerätschaften zum Abdichten von Artesern,
  - Notfallplan für Antreffen von Artesern, Altlasten, Gas, Hohlräumen usw.

21.4.2.3 Ablauf einer Zertifizierung

Die Einhaltung der in den DVGW-Arbeitsblättern W 120-1 (A):2012-08 und W 120-2(A): 2013-07 genannten Qualifikationsanforderungen sollte von einer unabhängigen Stelle überprüft und bestätigt werden. Im Bereich des Brunnenbaus und der Geothermie haben sich dafür die Zertifizierungen der durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) für Zertifizierungen im Bereich W 120 akkreditierten Zertifizierung Bau GmbH und DVGW-Cert GmbH durchgesetzt. Bohrunternehmen können bei einer dieser Stellen einen

Antrag auf Zertifizierung nach dem jeweiligen DVGW-Arbeitsblatt stellen. Sie haben dabei Unterlagen zu Verantwortlichen, Personal, Gerätschaften, Versicherung und Referenzen einzureichen. Bei erfolgreicher Vorprüfung der Unterlagen wird ein geeigneter Auditor benannt, der in Abhängigkeit vom beantragten Zertifizierungsumfang (Anzahl der Gruppen) eine umfangreiche Prüfung des Bohrunternehmens durchführt.

Dabei werden in einem mehrstündigen Fachgespräch die Fachkompetenz des/der Verantwortlichen und die fachgerechte Durchführung der Tätigkeiten anhand von Bohrdokumentationen zu abgeschlossenen Projekten sowie auch Aufbau und Pflege eines betrieblichen Managementsystems überprüft. Des Weiteren erfolgt die Begutachtung des Betriebshofes und einer laufenden Baustelle. Bei erfolgreicher Gesamtprüfung wird ein auf die entsprechenden Gruppen des DVGW-Arbeitsblattes W 120-1 (A):2012-08 und W 120-2(A):2013-07 (siehe Abschn. 21.4.1) abgestimmtes Zertifikat ausgestellt, welches in der Regel eine Gültigkeit von fünf Jahren besitzt. Zudem verleiht jede Zertifizierungsstelle ihr eigenes Zeichen (Abb. 21.5 und Abb. 21.6), das vom zertifizierten Unternehmen zu Werbezwecken genutzt werden kann.

Die Regelungen der W 120-1 (A):2012-08 und W 120-2(A):2013-07 sehen vor, dass im dritten Jahr nach der Erst- oder Rezertifizierung das Bohrunternehmen überwacht werden muss (siehe Abb. 21.7). Audit und Überwachung finden zu Terminen statt, die mit den Bohrunternehmen vereinbart werden. Soll die Zertifizierung nach 5 Jahren fortgesetzt werden, ist zuvor ein Antrag auf Rezertifizierung erforderlich.

Solange das Zertifikat gültig ist, wird das zertifizierte Unternehmen auch auf den Internetseiten der jeweiligen Zertifizierungsstelle gelistet. Nach den Geschäftsordnungen der Zertifizierungsstellen können Zertifikate auch vorzeitig zurückgezogen werden. So zum Beispiel, wenn im Rahmen der Überwachung im 3. Jahr oder durch berechtigte Beschwerden Dritter über zertifizierungsrelevante Sachverhalte relevante Abweichungen von den Qualitätsanforderungen festgestellt wurden.

Abb. 21.5 Zeichen für nach W 120 zertifizierte Unternehmen der Zertifizierung Bau GmbH. (© Zertifizierung Bau GmbH)

Abb. 21.6 Zeichen für nach W 120 zertifizierte Unternehmen der DVGW Cert GmbH. (© DVGW Cert GmbH)

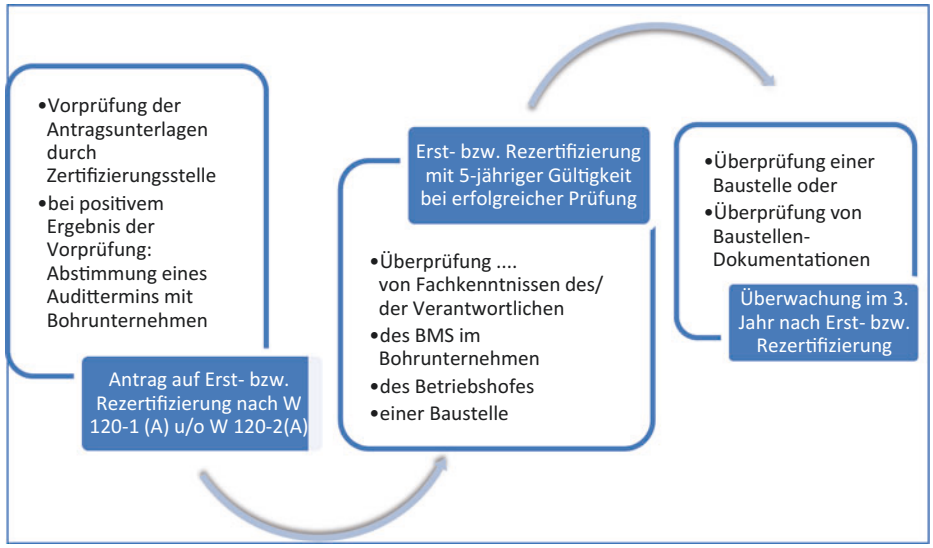


Abb. 21.7 Zertifizierungsablauf nach W 120-1 (A) und W 120-2 (A)

21.4.3 Zeichen „Fremdüberwachtes Bohrunternehmen für Erdwärmesonden“

Im Bundesland Baden-Württemberg existiert seit 2015 ein Fremdüberwachungssystem, bei dem sich Bohrunternehmen freiwillig verpflichten, jederzeit unangekündigte Baustellenüberwachungen auf ihren Baustellen zuzulassen, bei denen allgemeine und länderspezifische Qualitätsanforderungen an Erdwärmesondenbohrungen kontrolliert werden.

Während eine Überprüfung der Bohrunternehmen im Rahmen einer Zertifizierung zu Terminen stattfindet, die mit dem zu zertifizierenden Unternehmen abgestimmt und langfristig geplant sind, soll das System der unangekündigten Baustellenprüfungen zusätzliches Vertrauen des Kunden in die kontinuierliche und auf jeder Baustelle umgesetzte qualitätsgerechte Ausführung der Bohr- und Ausbauarbeiten schaffen. Diesem Fremdüberwachungssystem angeschlossene und erfolgreich überwachte Bohrunternehmen sind berechtigt, das Zeichen „Fremdüberwachtes Bohrunternehmen“ (siehe Abb. 21.8) zu führen. Diesem relativ jungen und freiwilligen System, das von den Mitgliedern des BWP e. V. ins Leben gerufen wurde, sind bisher nur wenige Bohrunternehmen angeschlossen. Gemäß den Geschäftsbedingungen des BWP melden die Bohrunternehmen selbst oder die jeweiligen Genehmigungsbehörden regelmäßig alle Erdwärmesonden-Baustellen. Die Auswahl der zu überwachenden Unternehmen erfolgt nach dem Losverfahren. Die Kontrollen führen unabhängige und qualifizierte Auditoren durch, die die Anforderungen an Auditoren des DVGW-Arbeitsblattes W 120-2(A):2013-07 erfüllen. In Abb. 21.9 sind Vertragsverhältnisse und Ablauf des Fremdüberwachungssystems skizziert.

Abb. 21.8 Zeichen „Fremdüberwachtes Bohrunternehmen für Erdwärmesonden“. (© Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.)

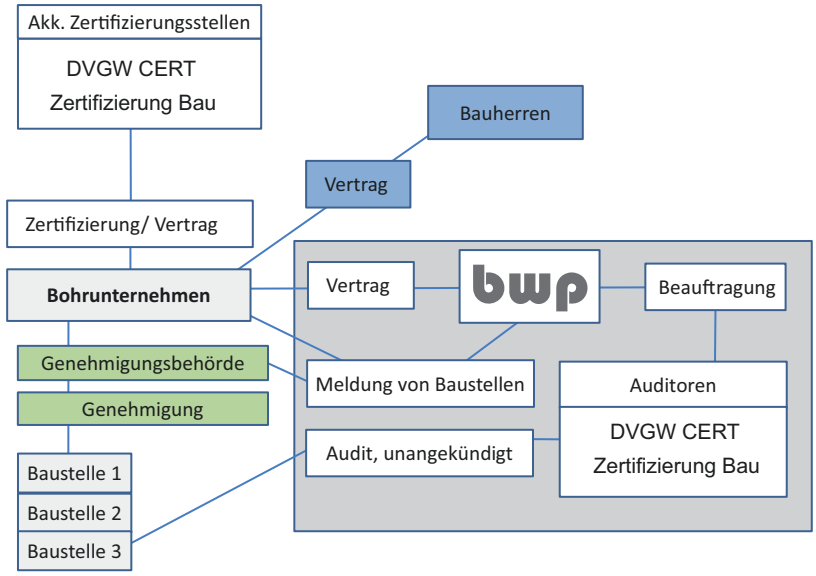


Abb. 21.9 Ablauf und Vertragsverhältnisse des Fremdüberwachungssystems. (Mit freundlicher Genehmigung von © Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., All Rights Reserved)

Derzeit wird überlegt, ob sich diese unangekündigten Baustellenüberwachungen auch auf andere Bundesländer übertragen lassen.

21.5 Qualitätssicherung bei Wärmepumpeninstallateuren

Im Wärmepumpenmarkt gibt es zahlreiche Unternehmen, die Wärmepumpen verkaufen und installieren. Um den Anforderungen an eine qualitätsgerechte Wärmepumpeninstallation gerecht zu werden, muss der Installateur zunächst die Besonderheiten, die eine Wärmepumpenanlage gegenüber konventionellen Heizsystemen aufweist, kennen und entsprechend berücksichtigen. Hier sind spezielle Fachkunde und ausreichende Erfahrung von Bedeutung. Insbesondere bei kleinen Anlagen im Einfamilienhausbereich übernimmt der die Wärmepumpe installierende Fachhandwerker in der Regel auch die Aufgaben des Planers. Dabei muss er im Rahmen der Grundlagenermittlung abwägen, ob eine Wärmepumpenanlage für das zu versorgende Gebäude sinnvoll (effizient) und welche Wärmequelle (z. B. Erdwärme, Außenluft, Grundwasser) unter Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten zu favorisieren ist. Darüber hinaus trägt er in diesen Fällen oftmals auch die Verantwortung für die Dimensionierung der Wärmepumpenanlage, die wiederum Kenntnisse und Erfahrungen in der Heizlastberechnung voraussetzt. Bei Wärmepumpen mit dem Erdreich oder Grundwasser als Wärmequelle muss er für die Auslegung der erdseitigen Anlagenkomponenten fachkundige Unterstützung durch ein Ingenieurbüro oder ein Bohrunternehmen heranziehen.

Ein zertifiziertes Qualitätssicherungssystem wie die DVGW W 120-2 (A).2013-07 bei Bohrunternehmen (siehe Abschn. 21.4.2) gibt es jedoch für die Wärmepumpeninstallationsunternehmen nicht.

Vergleichbar wäre eine Personalqualifikation, wie die seit dem Jahre 2008 vom Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) angebotene Zertifizierung zum „EU zertifizierten Wärmepumpeninstallateur“ (siehe Abb. 21.10).

Abb. 21.10 Zeichen „EU Zertifizierter Wärmepumpeninstallateur“. (© Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.)

Hier wurde unter dem Dach des EUCERT-Konsortiums der European Heat Pump Association (EHPA) ein 40-stündiger Lehrgang entwickelt, dessen Inhalte von der Wärmepumpentechnik und der Anlagenplanung über heizungstechnisches, bauphysikalisches und geologisches Know-how bis hin zur Einführung in die Thematik der erneuerbaren Energien reichen (Quelle: BWP 2016c). Die Teilnahme an diesem Lehrgang wird mit einem Teilnahmezertifikat bestätigt und mit einer theoretischen und praktischen Prüfung abgeschlossen. Die bestandene Prüfung ist neben den personellen Anforderungen und Referenzen eine der Voraussetzungen für die Beantragung der Zertifizierung beim BWP. Die Richtlinien für die Zertifizierung wurden vom BWP in Abstimmung mit der EHPA festgelegt.

Um das erworbene und für 3 Jahre gültige Zertifikat zu verlängern, muss neben der Teilnahme an Fortbildungen zur Wärmepumpentechnik auch die aktive Tätigkeit im Bereich Installation von Wärmepumpen nachgewiesen werden. Installateure mit gültigem Zertifikat werden auf einer Liste des BWP (www.waermepumpe.de) und der EHPA (http://www.ehpa.org) geführt.

Diese Personenzertifizierung hat in den ersten Jahren nach der Einführung in Deutschland einen nennenswerten Zulauf erfahren. Sie stellt eine rein freiwillige Zertifizierung dar, die allein der Vertrauensbildung beim Kunden dient. In Frankreich und der Schweiz wurde dieser Ansatz weiter entwickelt und ist heute in abgewandelter Form eine Voraussetzung für die Förderfähigkeit von Wärmepumpenanlagen. Derzeit befindet sich das EUCERT-Programm in Überarbeitung und soll neu aufgelegt werden (Quelle: www.waermepumpe.de).

21.6 Qualitätssicherung bei Architekten und Fachplanern

Mit der Planung und Auslegung einer Wärmepumpenanlage steht und fällt die Entscheidung für deren dauerhafte Funktionstüchtigkeit und Effizienz und damit schließlich für die Nutzung ihrer ökonomischen und ökologischen Vorteile. Sind es bei den kleinen Wärmepumpenanlagen überwiegend die Handwerksunternehmen, die die Planung und Installation übernehmen, so liegt die planerische Verantwortung für mittlere und größere Anlagen bei Architekten und Fachplanern. Da der Architekt grundsätzlich nicht über das spezielle Fachwissen eines Fachplaners verfügen kann, ist er verpflichtet, einen oder mehrere Experten einzuschalten. Dies ist regelmäßig bei der Planung der Heizungsanlage der Fall. Anders als bei konventioneller Heizungstechnik bedarf es bei der Planung von Geothermieanlagen eines multidisziplinären Ansatzes bei der Wahl des Planungsteams. Der Haustechnikplaner muss über die spezielle Fachkompetenz und besondere Erfahrung im Bereich der erdgekoppelten Wärmepumpen verfügen. Für den quellseitigen (z. B. Boden, Grundwasser) Teil der Anlage ist zusätzlich ein spezialisierter Geowissenschaftler einzubinden. Beide müssen die sich im Bereich der Geothermie rasch entwickelnden Regeln der Technik beherrschen und anwenden. Ein in der Planungsphase unentdeckter

Planungsfehler, der sich bis zur Bauausführung fortsetzt, kann über die dauerhafte Funktionstüchtigkeit und die Effizienz der Anlage entscheiden. Im Falle geothermischer Anlagen werden diese Fehler oft erst Monate nach Inbetriebnahme erkennbar und sind für den Bauherrn nur schwer nachvollziehbar.

Ein ebenso wichtiges Thema wie die korrekte Planung ist die Koordination der Beteiligten. Ist ein Architekt beauftragt, muss er die Schnittstellen erkennen und die Leistungen in allen Leistungsphasen von der Planung bis zur Bauausführung aufeinander abstimmen und kontrollieren. Gerade das Fehlen der eigentlich dringend erforderlichen Koordination ist eine der größten Fehlerquellen und kann zu mangelhafter Qualität der Anlage führen.

Für Planungs- und Architekturbüros ist die Projektierung von Geothermieanlagen in vielen Fällen aufgrund der Komplexität dieser noch relativ jungen Technologie eher ein Randthema, sodass hier die Erfahrungen fehlen. Für Fachplaner und Architekten existiert keine mit der Fachunternehmenszertifizierung von Bohrunternehmen (siehe Abschn. 21.4.2) oder der Personalqualifikation des „EU Zertifizierten Wärmepumpeninstallateurs“ (siehe Abschn. 21.5) vergleichbare Qualitätssicherung.

Für Architekten besteht allerdings eine allgemeine Fort- und Weiterbildungsverpflichtung, die in den Berufsordnungen für Architekten festgelegt ist. Um die Qualifikation und Leistungsfähigkeit zu erhalten, haben sich die Architekten ständig fort- oder weiterzubilden. Der Umfang ist mit mindestens acht Stunden pro Jahr, das Thema entsprechend der Fachrichtung und den beruflichen Aufgaben festgelegt.

Haustechnikplaner oder Geowissenschaftler unterliegen keiner ähnlichen Verpflichtung. Um einzuschätzen, inwiefern es sich um kompetente Spezialisten handelt, kann allenfalls anhand von Referenzen speziell im Themengebiet der Oberflächennahen Geothermie nachgewiesen werden.

Derzeit erarbeitet der VDI (Verein Deutscher Ingenieure) eine Richtlinie „Planung und Dimensionierung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern“ (VDI-Richtlinie 4645). Sie könnte die neue Grundlage für entsprechende Personenzertifizierungen werden.

Literatur

AHO – Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e.V.: Planungsleistungen im Bereich der oberflächennahen Geothermie. AHO-Schriftenreihe Nr. 26, 1. Aufl. Bundesanzeiger Verlag, Berlin (2011)

BWP (Bundesverband Wärmepumpen e.V.): Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland von 2008 bis 2015. http://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatzzahlen/ (2016a). Zugegriffen: 23. Febr. 2016

BWP (Bundesverband Wärmepumpen e.V.): Gütesiegel Wärmepumpen. https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/qualitaetssicherung/guetesiegel-waermepumpen (2016b). Zugegriffen: 23. Febr. 2016

BWP (Bundesverband Wärmepumpen e.V.): EUCERT-Installateure. https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/qualitaetssicherung/eu-zertifizierter-waermepumpeninstallateur/ (2016c). Zugegriffen: 21. Febr. 2016

DIN 14511:2013-12: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern, Blatt 1-4; Deutsche Fassung EN 14511-Blatt 1-4:2013. Beuth, Berlin (2013)

DIN EN 14825:2013-12: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung – Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl; Deutsche Fassung EN 14825:2013. Beuth, Berlin (2013)

DIN EN 15879-1:2011-05: Prüfung und Leistungsbemessung von erdreichgekoppelten Direktübertragung-Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und/oder -kühlung – Teil 1: Direktübertragung/Wasser-Wärmepumpe; Deutsche Fassung EN 15879-1:2011. Beuth, Berlin (2011)

DIN EN 16147:2011-04: Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser; Deutsche Fassung EN 16147:2011. Beuth, Berlin (2011)

DIN EN ISO/IEC 17065:2013-01: Konformitätsbewertung – Anforderungen an Stellen, die Produkte, Prozesse und Dienstleistungen zertifizieren. Beuth, Berlin (2013)

DIN EN ISO 9001:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9001:2015. Beuth, Berlin (2015)

DINCERTCO: Die KEYMARK – Schlüssel für Europa: http://www.dincertco.de/de/dincertco/produkte_leistungen/management_keymark/management-keymark.html (2016). Zugegriffen: 21. Febr. 2016

DVGW W 120-1 (A):2012-08: Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik, Brunnenbau, -regenerierung, -sanierung und –rückbau. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn (2012)

DVGW W 120-2 (A):2013-07: Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik und oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden). Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn (2013)

Entscheidung 2007/742/EG: der Kommission vom 9. November 2007 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EG-Umweltzeichens an Elektro-, Gasmotor- oder Gasabsorptionswärmepumpen (ABl. Nr. L 301 vom 20.11.2007, S. 14) (2007)

Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz: vom 7. August 2008 (BGBl. I S. 1658), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1722) geändert worden ist (2015)

RAL-UZ 118: (Vergabegrundlagen) Energiesparende Wärmepumpen, RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., Sankt Augustin, April (2012)

VBI – Verband Beratender Ingenieure: VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie. VBI-Schriftenreihe Band 18, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage (2012)

VDI 4640 Blatt 2: 2001-09, Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Beuth, Berlin (2001)

WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 320 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist" (2009)

Risikopotenziale der Oberflächennahen Geothermie

22

Ingo Sass

Inhaltsverzeichnis

22.1 Die 5-M-Methode . . . 673
22.1.1 Mensch . . . 673
22.1.2 Methode . . . 674
22.1.3 Material . . . 675
22.1.4 Maschinen . . . 676
22.1.5 Medium . . . 676
22.1.6 Fazit . . . 677
22.2 Geologische Risiken . . . 677
22.2.1 Quellfähige und setzungsempfindliche Gesteine . . . 677
22.2.2 Lösliche Gesteine . . . 678
22.2.3 Überkonsolidierte und porenwasserdruckanfällige Gesteine . . . 679
22.2.4 Tektonik . . . 679
22.2.5 Massenbewegungen . . . 680
22.2.6 Erdfall-, Senkungs- und Bergsenkungsgebiete . . . 680
22.2.7 Gasaustritte . . . 680
22.3 Hydrogeologische Risiken . . . 681
22.3.1 Gespanntes und artesisch gespanntes Grundwasser . . . 681
22.3.2 Stockwerke . . . 682
22.3.3 Hydrochemische Gradienten . . . 682
22.3.4 Entgasung . . . 683
22.3.5 Wasserqualität . . . 684
22.4 Umwelttechnische Risiken . . . 684
22.4.1 Altlasten und Altablagerungen . . . 684
22.4.2 Bergbau, Bergbaufolgeschäden . . . 685

Ingo Sass (✉)
Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geothermie, Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt
e-mail: sass@geo.tu-darmstadt.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_22

22.5 Risiken beim Sondeneinbau 685
22.6 Betriebsrisiken 687
Literatur 688

Zusammenfassung

Die Einbringung von Erdwärmesonden in den bebauungsnahen Untergrund erhöht das Risikopotenzial der oberflächennahen Geothermie. Einige Schadensfälle wurden in den Medien stark thematisiert. Zur Vermeidung von Schäden und Unfällen einerseits und zur Verbesserung des medialen Echos sind Maßnahmen zur Qualitätseinhaltung und -überwachung notwendig. So können die typischen Risikopotenziale dieser Technik reduziert werden. Im Sinne der EA Geothermie wird die Anwendung der 5-M-Methode empfohlen. Da sie auf alle Risikobereiche wirkt.

Schlüsselwörter

Anthropogene Risiken · geologische Risiken · hydrologische Risiken · umwelttechnische Risiken · Betriebsrisiken, Sondeneinbau

In den Jahren seit 2007 sind verschiedene Schadensfälle, die in Zusammenhang mit geothermischen Bohrungen stehen, publik geworden (z. B.: Sass et al. 2009; Grimm et al. 2014). Grimm et al. haben die ihnen bekannten Schadensfälle in Baden-Württemberg miteinander verglichen und die Ursachen aufgelistet.

Es kann hier behauptet werden, dass der Umgang der Medien mit den Fällen und der Umgang verantwortlicher Instanzen mit den Medien z. T. nicht optimal war. Probleme, die im weitesten Sinne mit geothermischen Bohrungen in Zusammenhang gebracht wurden, sind in einer oftmals unangemessen, hin und wieder reißerischen und manchmal auch in sachlich unzutreffender Art berichtet worden. Vor allem das führte zu einem schlechten Image der Geothermie in der Öffentlichkeit. Der Vorteil dieser oft unerwünschten öffentlichen Diskussion war ein sehr schnelles Anheben der Qualitätsstandards (DGGT und DGGV 2015).

Auch sind die Medien oft nicht in der Lage, tiefe und Oberflächennahe Geothermie sachgerecht auseinanderzuhalten. So kommt es zu einer Vermengung von verschiedenen Themenbereichen, wie Fracking, künstlicher Seismizität u.a., die mit oberflächennahen geothermischen Bohrungen nichts zu tun haben.

Dieser Abschnitt stützt sich stark auf die Ausführungen in den *Empfehlungen zur Oberflächennahen Geothermie, EA Geothermie* (DGGT und DGGV 2015). Dabei wird nur auf die Oberflächennahe Geothermie bezogenen Fragestellungen eingegangen. Die vielleicht offenen Fragen der tiefen Geothermie erscheinen an dieser Stelle nicht.

In der *EA Geothermie* (DGGT und DGGV 2015) wird die 5M-Methode als Werkzeug zur Analyse von Risikopotenzialen eingeführt und angepasst. Die Anwendung der Methode trägt erheblich zur Qualitätsverbesserung in der Herstellung von unterirdischen Anlagen der Oberflächennahen Geothermie und zur Erhöhung der Sicherheit in Bau und Betrieb bei.

22.1 Die 5-M-Methode

Der folgende Abschnitt stellt eine Möglichkeit vor, die Risiken, die durch die Errichtung und Nutzung der Oberflächennahen Geothermie entstehen können, zu beschreiben. Die Grundsätze zur Minimierung dieser Risiken werden aufgezeigt sowie Vorschläge für die Qualitätssicherung abgebildet (DGGT und DGGV 2015).

Als Risiko S_R wird die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines negativen Ereignisses bezeichnet. Es wird mittels Gl. 22.1 definiert.

$$S_R = S_P \cdot S_V \tag{22.1}$$

mit:

S_R = Schadensrisiko,
S_P = Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Schaden,
S_V = Schadenshöhe.

Bezogen auf die Aufgabenstellungen in der Oberflächennahen Geothermie sind dies speziell das Eintreten einer Bohrlochhavarie bzw. das Eintreten eines Schadens, welcher direkt durch die Bohrung, den Ausbau oder die spätere Nutzung der geothermischen Anlage, insbesondere der Installationen im Untergrund, verursacht wird.

Um Risikoursachen zu beurteilen, kann die 5-M-Methode nach Englert und Schalk (2003) herangezogen werden. Sie muss allerdings für die Anwendung auf die Oberflächennahe Geothermie erweitert werden. Hierbei werden alle auftretenden oder bekannten Risikofaktoren in Gruppen aufgeteilt. Sowohl die Verantwortlichkeiten als auch Risikominimierungsansätze werden somit entsprechend zugeteilt (Abb. 22.1).

22.1.1 Mensch

Der Mensch, ist im Sinne von Methner (in Pfeifer und Schmitt 2007) der wesentliche Faktor in der Risikobeurteilung, weil der Mensch die Anforderungen des Arbeitsplatzes durch bestimmte Funktionen zu erfüllen hat. Will sich eine Institution mit ihrem Qualitätsmanagement, ob zertifiziert oder nicht, einem Idealzustand annähern, so ist es notwendig, überprüfbare Anforderungsprofile für die Beschäftigten zu erstellen und das Personal ist für diese Arbeiten gezielt auszuwählen (Tätigkeitsbeschreibungen, Arbeitsanweisungen, Gefährdungsbeurteilungen etc.). Defizite in der Qualifikation sind durch gezielte Weiterbildungsmaßnahmen auszugleichen. Grundsätzlich ist das Personal durch solche Maßnahmen in die Lage zu versetzen, nach dem Stand der Technik zu arbeiten.

Die Verantwortung der Geschäftsleitung ist es, darauf zu achten, dass die Ausbildung, Qualifikation und die Weiterbildung zum jeweiligen Gewerk passen. Diese Grundsätze alleine zeigen, dass es demnach nicht sinnvoll ist, Heizungs- und Sanitärfachkräfte Bohrungen ausführen zu lassen oder Brunnenbauer mit der Planung der gesamten Geothermieanlage zu beauftragen. Architekten sind mit der Bewertung geologischer Fakten ebenso überfordert wie Geologen mit der Planung einer Heizungsanlage.

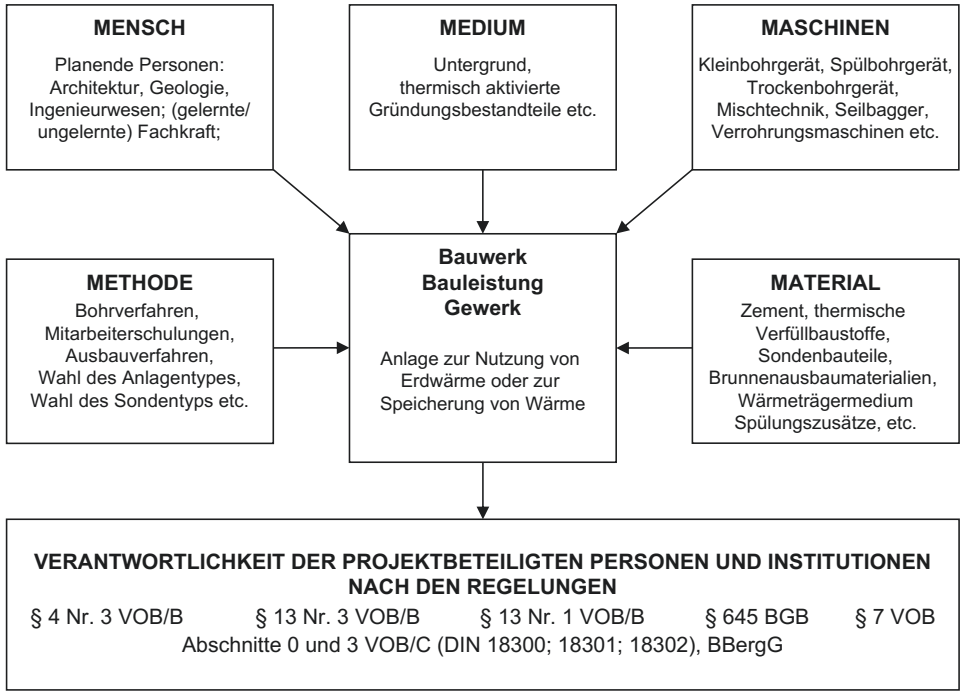


Abb. 22.1 5-M-Risiken und die Grundlagen der Verantwortlichkeit in Anlehnung an die von Englert entwickelte 5-M-Methode. (Grafik: Englert und Schalk 2003)

22.1.2 Methode

Oberflächennahe Geothermie wird durch das Herstellen von Erdwärmesonden überwiegend durch Bohrungen erschlossen. Die Bohrungen greifen z. T. mehrere hundert Meter in den Untergrund ein. Das Bohren ist eine technisch sehr anspruchsvolle Tätigkeit, die den unterschiedlichsten Wechselwirkungen ausgesetzt ist.

Die wesentlichen Arbeitsschritte bei vergleichsweise wenig tiefen (z. B. 50 – 500 m u. GOK) Bohrungen sind:

- Lösen von Boden oder Fels mittels Bohrwerkzeugen an der Bohrlochsohle,
- Entfernen des Bohrgutes von der Bohrlochsohle,
- Abtransport des Bohrgutes nach über Tage,
- Statische Sicherung der Bohrlochwand und Sicherung gegen hydraulische Zu- und Abflüsse,
- Komplettierung der Bohrung zur Erdwärmesonde oder zum Brunnen,
- Inbetriebnahme des Ausbaues.

Besonders bei der ersten Erdwärmebohrung an einem Standort oder innerhalb eines Vorhabens sind die Untergrundverhältnisse oft nicht so gut bekannt, dass das richtige

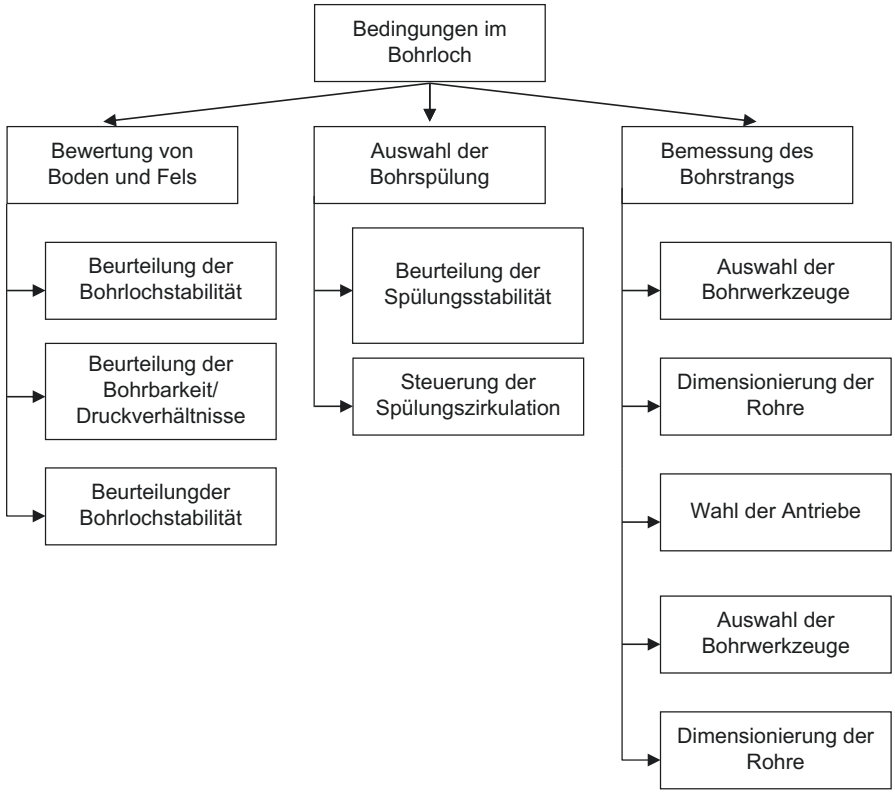


Abb. 22.2 Methoden (gekürzt) zur Beeinflussung des Bohrvorganges. (Verändert und erweitert nach Arnold 1993)

Bohrverfahren auf fachlich sicherer Grundlage gewählt werden kann. Die ersten drei Arbeitsschritte erfordern somit auf die möglichen Bedingungen im Bohrloch zugeschnittene Methoden, die ausreichend flexibles Reagieren auf unerwartete Verhältnisse ermöglichen (Abb. 22.2).

22.1.3 Material

Dass die Qualität der verwendeten Materialien ein weiterer, wichtiger Faktor zur Risikobeurteilung ist, überrascht nicht. Das Material wird in Gruppen unterteilt: Gebrauchsmaterial wie Bohrwerkzeuge, Verrohrung sowie Bohrstrang und Verbrauchsmaterial wie Ausbau- und Bohrsuspension, sowie Verfüllmaterial wie Hinterfüllsuspensionen etc. Im Zusammenhang mit den Materialien können vier Fehlerquellenarten definiert werden:

- **Instruktionsfehler:** Material wird falsch eingesetzt und die Produktbeschreibung wird nicht berücksichtigt;
- **Fabrikationsfehler:** Einzelne Materialien bzw. Chargen davon weisen einen Fertigungsfehler auf;
- **Konstruktionsfehler:** Das Material ist nicht auf den Anwendungsfall ausgelegt;
- **Entwicklungsfehler:** Der Stand der Technik war zum Zeitpunkt des Vertriebes des Materials noch nicht erkennbar.

Letzteres gilt z. B. für die Tau-Gefrier-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllsuspensionen (Müller 2009), die bei Einbau vieler älterer Erdwärmesonde als wichtiges Qualitätsmerkmal noch nicht bekannt war (Anbergen et al. 2014). Hinweise zu Materialauswahl und Eigenschaften sind im technischen Regelwerk, z. B. des DVGW, des API u. a. oder in den entsprechenden Normen, z. B. DIN 4924 für Sande und Kiese und die DIN 4922 für Brunnenrohre in den Produktspezifikationen der Hersteller zu finden.

22.1.4 Maschinen

Die Auswahl der Maschinerie fällt bei Bohraufgaben typischerweise in die Verantwortung der ausführenden Firmen. Vorschriften hierfür gibt es im eigentlichen Sinne nicht. Konformitätserklärungen sollen sicherstellen, dass die Instrumentarien des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bei der Arbeit mit und an einer Maschine angewendet und eingehalten werden können. Auflagen aus der Genehmigung können aber erheblichen Einfluss auf die Maschinenauswahl haben, wie z. B. der Schallschutz aus den berg- oder gewerberechtlichen Vorgaben der Bohr- und Baugenehmigungen.

Maschinen müssen in ihrer Größe und Art den Qualitätsanforderungen in der Weise entsprechen (DIN-EN-791), dass die technischen Ziele unter Ansatz einer ausreichenden Leistungsreserve erreicht werden können, ohne dabei unbillige Risiken in Kauf zu nehmen. Ein unbilliges Risiko wäre z. B. das Bohren bei bekannter Gefahr, auf artesisches Grundwasser zu treffen, ohne eine Absperrvorrichtung einzusetzen. Standardbemessungskriterien in der Bohrtechnik sind u. a. das Drehmoment beim Trockenbohren oder die Hakenlast beim Spülbohren. Hier ist rechnerisch nachzuweisen, dass die Kriterien mit der gewählten Ausrüstung in Bezug auf die konkrete Aufgabe einschließlich entsprechender Sicherheitszuschläge eingehalten werden können.

Der maschinellen Ausrüstung kommt bei der M-Methode erhebliche Bedeutung zu: Der **Mensch** bedient die **Maschine**, die nach einer bestimmten **Methode** mit bestimmtem Material in dem oft noch schlecht bekannten **Medium** Baugrund arbeitet.

22.1.5 Medium

Aus den bisher dargestellten Zusammenhängen wird klar, dass vier der fünf M-Faktoren, nämlich Mensch, Methode, Maschine und Material, durch Maßnahmen in der Projektplanung, während der Projektdurchführung und der Überwachung reduzierbar sind.

Der fünfte M-Risikofaktor, das Medium Gebirge, ist nicht beeinflussbar. Die Gefahrenpotenziale, die im Untergrund enthalten sind, müssen durch die Interpretation der Erkundungsergebnisse erkannt und bewertet werden können, um die Eintrittswahrscheinlichkeit zu reduzieren. Ad-hoc-Wissen kann diese Funktion ebenfalls übernehmen.

Durch die Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrundrisiko entsteht das Systemrisiko. Es umfasst sämtliche Gefahren, die mit der Herstellung von Tiefbauwerken einhergehen. Es sind niemals sämtliche Reaktionen des zur Anwendung gelangenden Bausystems technisch-wissenschaftlich vorhersehbar oder gar kalkulierbar, auch nicht bei Erdwärmebohrungen und geothermischen Brunnenbohrungen, die in der Risikobetrachtung vergleichbar sind mit Bohrpfahl- oder Schlitzwandherstellung, Bodenvereisung, Hochdruckinjektion, Baugrubensicherung etc. Deshalb können trotz bestmöglicher Planungsvorgaben und optimaler Ausführung Mängel und Schäden auftreten (Englert et al. 1992).

Latente Risiken im Sinne der 5-M-Methode im Untergrund sind z. B.: Erdbeben, Massenbewegungen, Verkarstung, Methanführung, Bergbaufolgen, veränderliche Grundwasserstände, Hochwasser und wenig standfestes, nachfallendes Gebirge etc., aber auch Kampfmittel, Altlasten, Leitungen, Anlagen Dritter, künstliche Hohlräume oder vorangegangene Tiefbaumaßnahmen wie Anker, Injektionen und sonstige Gründungen.

22.1.6 Fazit

Art und Umfang der Risikobewertung dürfen nicht zum Gegenstand betriebswirtschaftlichen Handelns werden. Der Verzicht auf erkennbar risikominimierende Maßnahmen aus Kostengründen kann zur direkten Haftung für Schäden und deren Folgen für die handelnden Personen führen. Die Unterlassung risikominimierender Handlungen fällt in den Bereich der Fahrlässigkeit.

Für eintretende Schäden haften:

- der/die Eigentümer/in des Grundstückes, von dem die Gefahr ausgeht,
- die Bauherrschaft als Auftraggeber der Arbeiten,
- die Planungsbeteiligten,
- das ausführende Unternehmen,
- die Aufsichts- und Genehmigungsbehörden.

22.2 Geologische Risiken

22.2.1 Quellfähige und setzungsempfindliche Gesteine

Das Anfahren quellfähiger Gesteine oder von Gesteinen mit Anteilen quellfähiger Minerale (Prinz und Strauß 2006) kann erhebliche Schäden durch Volumenänderung (in der

Regel Volumenzunahme durch Quellung, Volumenverringerung durch Schrumpfung oder Umwandlung von Mineralien) sowohl im Bohrbetrieb, beim Ausbau der Bohrung als auch im Betrieb einer führen. Diese Baugrundeigenschaften gehören zu den häufigeren Risiken für die geothermische Anlage (Grimm et al. 2014).

Planerisch ist zu berücksichtigen, ob folgende geologische Tatsachen oder Reaktionsphänomene in der zu erschließenden oder zu durchörternden Formation auftreten können:

- quellfähige Tongesteine oder relevante Anteile von quelfähigen Tonmineralien
- die Umwandlungsreaktionen von Anhydrit zu Gips bei Wasserzutritt,
- Ausfällung von Gips aus der Lösung durch Trockenlegung (z. B. durch Überbauung, Drainage, Wärmeeintrag),
- Austrocknung von Tonen oder organischen Böden,
- Baugrundhebung infolge Quellerscheinungen oder Kristallisationsdruck und
- Volumenveränderungen durch Synärese (Schrumpfung bei Unverträglichkeit von Poren- und Grundwassersalinität bei Tongesteinen).

Zur Orientierung zur Abklärung dieser komplexen geo- und hydrochemischen Fragestellungen sind die Untersuchungsumfänge ist die EN ISO 14689-1 heranzuziehen.

22.2.2 Lösliche Gesteine

Bohrarbeiten und die Bohrungen selbst können die Grundwassersituation nachhaltig verändern und somit lösliche Gesteine mit Grundwasser in Kontakt bringen. Deshalb spielt die Abdichtung von Bohrungen, auch bei aufgegebenen Löchern, eine enorme Rolle in der Geothermie. Grundwasser kann sonst u. U. in Schichten gelangen, die es auf natürlichem Wege nicht erreichen konnte. Dieses geschieht zum Beispiel beim ungewollten Kurzschluss zweier Grundwasserstockwerke durch eine Erdwärmebohrung.

So kann es auch zur Mischung von Grundwässern unterschiedlicher Genese und Zusammensetzung kommen, was wiederum bei entsprechend anfälligem Gebirge zu erhöhtem Lösungspotenzial oder Mischungskorrosion führen kann.

Bereits verkarstete Formationen zeichnen sich meist durch Hohlraumbildungen unterschiedlicher Größe und Verteilung aus. Das Gebirge ist häufig gebräch und nachfällig. Die Beinträchtigungen durch solche Erscheinungen können so weit gehen, dass eine Bohrung oder die Hinterfüllung nicht mehr möglich sind.

Hierfür kommen grundsätzlich infrage:

- Kalkstein,
- Dolomit,
- Gipsgesteine,
- anhydritführende Schichten,
- Salzgesteine (Chloride, Sulfate usw.) oder stark salzhaltige Schichten.

Die Kenntnis einer möglichen Verkarstung vor Beginn der Arbeiten muss zu einer Anpassung der Planung führen. Sie kann so weit gehen, dass auf die Erschließung mittels Bohrungen in voller Tiefe oder überhaupt verzichtet werden muss.

22.2.3 Überkonsolidierte und porenwasserdruckanfällige Gesteine

Als eine Auswirkung des Bohrvorgangs ist es möglich, dass überkonsolidierte Böden mit Hebung bzw. Ausdehnung reagieren. Eine Erhöhung der Mantelreibung an der temporären Schutzverrohrung kann zum Abbruch bzw. zur Aufgabe der Bohrung führen.

Die Entspannung von Gesteinen die bei Porenwasserdruckveränderungen mit Verformungen reagieren, kann durch eine Reduzierung des wirksamen hydrostatischen Druckniveaus in einem vormals gespannten Grundwasserleiter zu Setzungen führen.

Weiterhin können sich überkonsolidierte Schichten bei einer plötzlichen Entwässerung (z. B. durch Bohrungen) infolge von Kohäsionsverlust mechanisch problematisch verhalten. Die Herabsetzung der Standfestigkeit kann so weit gehen, dass in entsprechend topografisch geeigneten Lagen, Fließ- und Kriechbewegungen induziert werden.

22.2.4 Tektonik

Eine Beurteilung der Lagerungsverhältnisse bei der Planung von Bohrungen trägt dazu bei, Risiken zu minimieren. Die Schichtlagerung und das Trennflächengefüge in Ausprägung und räumlicher Orientierung beeinflussen die Bohrrichtung und die Bohrlocheigenschaften maßgeblich. Deshalb sind die Bohrverfahren immer auch mit Blick auf die erwartete tektonische Situation hin zu wählen. Eine starke tektonische Vorbeanspruchung der Gebirges führt meistens dazu, dass die Bohrungsabweichungen in Bezug auf den geplanten Verlauf zunehmen.

Erhöhte Risiken ergeben sich aus der Durchörterung von Störungszonen. Kakeritische, mylonitische oder kataklase Bereiche bergenbesondere bohrtechnische Anforderungen und können das Risikopotenzial erheblich erhöhen. (Kakerit = dicht von tektonisch erzeugten Rutsch- und Kluftflächen durchzogenes Gestein, das wegen seines Gefüges von H. CLOOS (1936) als Bruchbreccie bezeichnet worden ist; Mylonit = ursprünglich eine allgem. Bezeichnung für feinkörniges Gesteinszerreibsel verschiedenen Verfestigungsgrades, das bei Bewegungsvorgängen im Gestein erzeugt wird. Heute wird unter einem M. nach einem Vorschlag v. P. HEITZMANN (1985) „... ein stark deformiertes Festgestein mit einer deutlichen Flächentextur [und stark reduzierter Korngröße], meist verbunden mit einem Streckungslinear [in der Schieferebene], beides als Ausdruck einer Scherverformung im duktilen (s. d.) Bereich“ verstanden; Kataklase = tektonisch bedingte Zerbrechungserscheinungen in und an Einzelmineralen eines Gesteins. Sie kann selektiv sein, indem sie nur einzelne spröde Minerale betrifft und andere Minerale völlig intakt lässt, oder aber sämtliche Gefügebestandteile des Gesteins erfasst.)

Störungszonen können räumlich eng begrenzte, hohe hydraulische Druckunterschiede zum Nebengestein aufweisen und sie können schwer beherrschbare Spülungsverluste bewirken.

22.2.5 Massenbewegungen

Das Hänge, die über anfälligem Untergrund für Massenbewegungen (Rutschhang, Kriechhang, Gleitung) liegen, sind in Bezug auf den Eingriff durch die Bohrungen zu beurteilen. Es kann unerheblich sein, ob die Massenbewegung eine alte oder aktive ist. Alte Massenbewegungen können bei unangemessener bohrtechnischer Erschließung reaktiviert oder rezente Massenbewegungen können beschleunigt werden. Im Umkehrschluss können ausgebaute Erdwärmesondenbohrungen durchaus stabilisierende Momente erzeugen.

Erdwärmesonden in Zonen mit Massenbewegungen können während der Betriebszeit geschert, abgequetscht oder versetzt werden, sodass Anschlussleitungen abreißen. Das ist mit dem Risiko verbunden, das Wärmeträgerflüssigkeit austritt. Dieses wiederum kann die Kohäsion/Scherfestigkeit in der Rutschmasse herabsetzen.

22.2.6 Erdfall-, Senkungs- und Bergsenkungsgebiete

Das In Gebieten mit verkarstungsfähigen Gesteinen können Hohlräume einstürzen (z. B. Dolinen) und ggf. die im direkten Umfeld gebohrten Erdwärmesonden oder Brunnen zerstören. Durch Massendeposition (z. B. Fließsande) in vorhandene Hohlräume können ebenfalls Erdwärmesonden beeinträchtigt werden. Bohrungen können derartige Umlagerungen induzieren.

In (Alt)bergbaugebieten kommt es durch Absenkung des Deckgebirges zur Absenkung des Hangenden über dem Grubenbau (Bergsenkung).

Ohne ingenieurgeologische Prüfung und Überwachung sollten Erdwärmesondenanlagen in Senkungs-, Erdfall- und (Alt)bergbaugebieten nicht installiert werden.

22.2.7 Gasaustritte

Das Als Risiken beim Bau und Betrieb von Erdwärmesonden stellen folgende Gase ein Risikopotenzial für Mensch und Material dar. Dies kann einerseits durch das direkten Freisetzen der Gase erfolgen und andererseits durch das Schaffen einer dauerhaften Wegsamkeit für Gase entlang der Bohrungsachse.

- **Methan** (CH_4) tritt als Abbauprodukt von organischem Material (Braunkohle, Steinkohle, Torf) oft in Bergbaugebieten auf. Voraussetzung ist das Vorhandensein von Speicherräumen, wie z. B. einer Fallenstruktur, damit sich das Methan sammeln kann.

- **Kohlendioxid** (CO_2) ist meist mit Vulkanismus oder dem Auftreten von Mineralwässern verbunden (Kohlensäuerlinge, Gaslift).
- **Schwefelwasserstoff** (H_2S) kommt in der Natur als sehr variabler Bestandteil (von Spuren bis zu 80 Vol.-%) in Erdgas und in Erdöl, als vulkanisches Gas und in Quellwasser gelöst vor. Es entsteht außerdem bei Fäulnis- und Zersetzungsprozessen durch den Abbau von Biomasse (z. B. Faulschlammbildung am Grund eutropher Seen usw.) oder im Bereich von Mülldeponien. Die Bildung saurer Wässer kann eine Beton- und Metallaggressivität hervorrufen.
- **Radon** kommt vermehrt in Gebieten mit geogen hohem Uran- und Thoriumgehalt vor. Dies sind hauptsächlich die Mittelgebirge mit granitoidem Untergrund, in Deutschland vor allem Schwarzwald, Bayerischer Wald, Fichtelgebirge und Erzgebirge, in Österreich das Granitbergland im Waldviertel und Mühlviertel. Insgesamt kommt Radon in Süddeutschland in wesentlich höherer Konzentration vor als in Norddeutschland. Weitere Orte, an denen Radon in relativ hohen Konzentrationen vorkommt, sind Uranerz-, Flussspat- oder Bleibergwerke. Radon kann über die Mauerdurchbrüche und entsprechende Wand- und Bodendurchführungen bei den Anschlussleitungen in das Gebäude gelangen und sich dort in geschlossenen, schlecht durchlüfteten Räumen über längere Zeit in gefährlichen Konzentrationen ansammeln.

22.3 Hydrogeologische Risiken

22.3.1 Gespanntes und artesisch gespanntes Grundwasser

Artesisch austretendes Grundwasser kann zu einem hydraulischen Grundbruch in der Bohrung und/oder im Bereich des Umfeldes führen. Weitere Probleme entstehen durch übertägig ausgetragenes Material sowie untertägig durch Hohlraumbildung und die damit verbundenen Setzungen. Treten große Wassermengen aus, sind diese meist nur schwer zu beherrschen, müssen gefasst und kontrolliert abgeleitet werden.

In Risikogebieten für artesisches Grundwasser ist durch Setzen eines temporären Standrohres, welches bis zum ersten Geringleiter oder bis in den wenig durchlässigen Fels einbinden muss, der Gefahr entgegenzuwirken. Sofern keine oder unzureichende Vorkehrungen getroffen werden, kann es zur „Verwilderung“ von artesischen Bohrlöchern kommen. Hierbei treten Wasserwegsamkeiten außerhalb des kontrollierbaren Bohrlochbereiches auf.

Durch gespanntes Grundwasser kann es bei hydraulischem Kurzschluss von Grundwasserleitern zu Übertritten von unterschiedlich mineralisierten Wässern, aber auch zur Verlagerung von Material und damit zu Setzungen kommen. Schiefstellungen von Gebäuden sind eine nicht seltene Folge.

Durch den Zutritt von Grundwasser in die überlagernden Horizonte wird der hydrostatische Druck verändert. Durch Aktivierung oder Erzeugung von Gleit- und Scherflächen können Bodenbewegungen ausgelöst werden.

Grundwasserströmungen und deren Auswirkungen auf das Bohrloch können den Einbau der Erdwärmesondenrohre erschweren oder verhindern. Grundwasserströmungen im Bohrloch können zu einer Entmischung oder ungewollten Verdünnung des Verfüllmaterials während des Verfüllvorgangs führen und somit die hydraulische Abdichtung des Bohrlochs unwirksam machen.

Dieses stellt insbesondere bei Erdwärmesondenbohrungen deshalb eine Gefahr dar, weil diese einfachen Bohrungen üblicherweise ohne besondere Spülungsunterstützung sondern nur mit Wasser oder Druckluft gebohrt werden.

Prinzipiell können bei der Verfüllung von Bohrlöchern in gespanntem Grundwasser hydraulisch abbindende (zementgebundene) Verfüllmaterialien verwendet werden. Gegebenenfalls sind diese Verfüllmaterialien mit Zusätzen zu versehen. Diese dienen z. B. der Beschwerung des Verfüllmaterials zur Erzeugung eines Gegendruckes oder der Verkürzung der Abbindezeit. Der Einsatz solcher Hilfsmittel erfordert eine Genehmigung.

22.3.2 Stockwerke

Durch unterschiedliche Druckverhältnisse kann es zum Austausch von Wässern zwischen benachbarten Grundwasserstockwerken kommen. Dies kann sowohl durch aufsteigende als auch absteigende Grundwässer verursacht werden. Hierdurch kann es zur Vermischung von Wässern mit unterschiedlichem Chemismus kommen, was z. B. zur Mineralisierung von Trinkwasservorkommen führen kann. Daher ist der angetroffene Stockwerksbau grundsätzlich wiederherzustellen.

In kontaminierten Bereichen können Verschleppungen von Schadstoffen und anthropogenen Inhaltstoffen zu einer Beeinträchtigung der Grundwassergüte führen.

Schwebende Grundwasservorkommen können geleert werden. Einflüsse auf Vegetation und bestehende Anlagen sind nicht auszuschließen (siehe Wasserhaltungsmaßnahmen DIN 18305).

Exemplarisch lassen sich drei potenzielle Schadensfallgruppen unterscheiden: Grundwasser strömt vom oberen ins untere Stockwerk (Abb. 22.3a), Grundwasser strömt aus dem gespannten unteren in das ungespannte obere Stockwerk (Abb. 22.3b) und oberflächennahe Schadstoffe dringen in tiefere Grundwasserstockwerk ein (Abb. 22.3c). Für den Grundwasserschutz hat der Bohrlochausbau und insbesondere die Hinterfüllung daher vorrangige Bedeutung.

22.3.3 Hydrochemische Gradienten

Durch Druck- und Temperaturänderungen in Brunnenanlagen kann es speziell bei der Wiedereinleitung von Wasser zu Ausfällungen von Eisen-, Mangan- und Kalkverbindungen (Sinter, Verockerung) kommen.

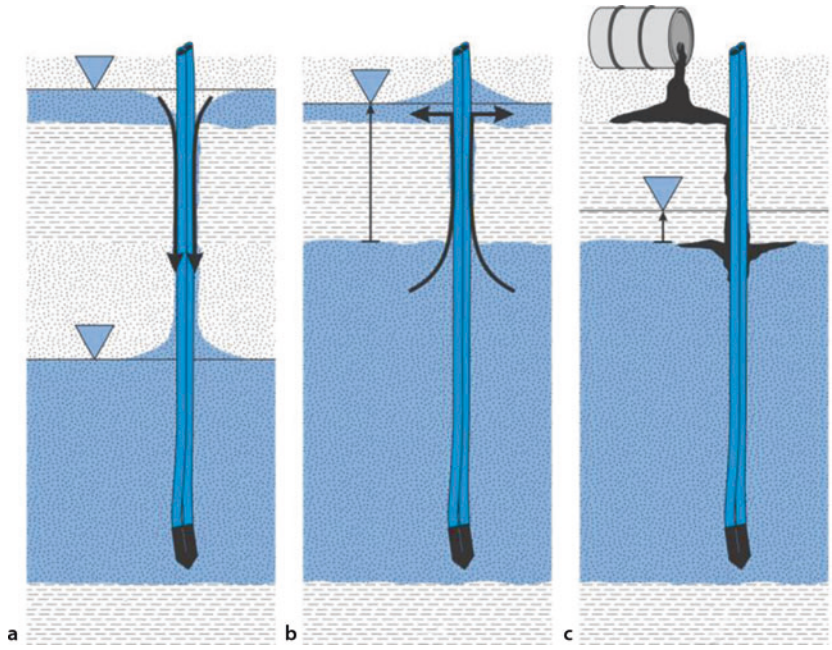


Abb. 22.3 Durch Erdwärmesonden verursachte Stockwerksverbindung und die daraus entstehenden Gefahrenpotenziale. **a** Kurzschluss zwischen überdecktem Grundwasserleiter und oberflächennahem Grundwasserleiter, **b** Auswildern eines gespannten Grundwasserleiters durch Perforation der Deckschicht, **c** Schaffung eines Kontaminationspfades durch mangelhafte Ringraumdichtung. (Grafik: Panteleit und Mielke 2010)

Die Einleitung des rückgeleiteten Wassers sollte stets unterhalb der tiefsten bekannten, saisonalen Grundwasserspiegellage und möglichst tief im Schluckbrunnen, durch Fallrohre und mit einer niedrigen Fließgeschwindigkeit erfolgen, sodass von Turbulenzen begünstigte Ausfällungen minimiert werden.

Der Eintrag von Sauerstoff sollte durch möglichst dichte Brunnenkopfabschlüsse vermieden werden. Sollte das nicht ausreichen, kann eine Stickstoffüberschichtung den Luftsauerstoffzutritt wirksam verhindern.

22.3.4 Entgasung

Beim Durchteufen von abdichtenden Schichten kommt es meist zu einer Veränderung der hydrostatischen Verhältnisse. Somit ist das Entweichen von im Grundwasser gelösten Gasen wie Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Schwefelwasserstoff möglich. Vergleichbar einer Mammutpumpe können dann große Wassermengen u. U. sehr schnell in der

Bohrung aufsteigen. Ein derartiger Gaslift kann zur Notwendigkeit führen, die Bohrung tot zu stauen, wie bei einem artesischen Grundwasseraufstieg.

22.3.5 Wasserqualität

Organische Böden und saure Wässer können das Hinterfüllmaterial angreifen. Die Betonaggressivität des Grundwassers ist daher ein wichtiger Kennwert zur Beurteilung solcher Risiken.

Im Fall von sauren Wässern muss bei offenen geothermischen Brunnenanlagen die Korrosion des Wärmeaustauschers der Wärmepumpe bzw. sonstiger Metallteile bei der Planung der Haustechnik besonders berücksichtigt werden. Durch einen der Wärmepumpe vorgeschalteten Wärmeaustauscher können bei hoher Korrosionsgefahr Wartungen und Reparatur vereinfacht werden. Allerdings sinkt der Wirkungsgrad der Gesamtanlage leicht.

Auf bakteriologische Verunreinigungen ist zu achten. Biologische Verunreinigungen werden zum großen Teil durch bauliche Mängel (z. B. mangelhafter Kleintier- und Insektenschutz), die Verunreinigungen durch Fremdstoffe und durch oberflächennahe Wässer ermöglichen, ausgelöst. Eine weitere Ursache der biologischen Verunreinigungen kann die übermäßige Erwärmung des wieder eingeleiteten Grundwassers darstellen. Latent vorhandene Keime erfahren hierdurch eine Verbesserung ihrer Milieubedingungen.

Durch zu starke Sandführung im Brunnenwasser kann es durch Bodenaustrag zu Bodensetzungen und der Zerstörung der Pumpenanlage durch Abrieb führen. Ein Zusetzen des Schluckbrunnens bzw. der Leitungen durch das geförderte Material hat erhöhte Reibungsverluste bis hin zum kompletten Verschluss des Systems zur Folge. Ein Zusetzen des Wärmeaustauschers kann betriebsbedingt zur Zerstörung der Wärmepumpe durch Auffrieren nach sich ziehen.

22.4 Umwelttechnische Risiken

22.4.1 Altlasten und Altablagerungen

Das Bohren in Altlastenverdachtsflächen, Altlasten oder Altablagerungen darf nur unter strengen, z. T. gesetzlich geregelten Kriterien durchgeführt werden. Nähere Informationen hierzu sind der einschlägigen Fachliteratur, z. B. den Altlastenleitfäden der Länder, zu entnehmen. Grundsätzlich wird eine Genehmigung nur in fachlich gut begründeten Fällen erteilt werden, was eine überdurchschnittliche planerische und gutachterliche Vorbereitung des Vorhabens voraussetzt. Entsprechende Projekte sollten in einem sehr frühen Stadium mit den Behörden abgestimmt werden.

Geothermische Bohrungen unterliegen einer Reihe von zusätzlichen, meist fallbezogen definierten Auflagen. Das Erschließen umweltrelevanter Grundstücke durch Bohrungen

mit Erdwärmebohrungen ist daher nur genehmigungsfähig, wenn zusätzlich baubegleitende Untersuchungen und Überwachungsarbeiten durchgeführt werden.

Werden Kontaminationen angetroffen, ist entsprechend den umweltrechtlichen Vorschriften zu verfahren: Die Bohrung ist zunächst einzustellen und die zuständige Behörde ist zu verständigen. Eine Verlagerung von Kontaminationen in unkontaminierte Bereiche durch eine Bohrung ist unbedingt zu vermeiden.

22.4.2 Bergbau, Bergbaufolgeschäden

Das Bohren in Bergbaugebieten und in Bergschadensgebieten ist ebenfalls nur unter besonderer Sorgfalt möglich. Durch Wasserhaltungen kann die Grundwasserdruckfläche erheblich tiefer als unter regional natürlichen Bedingungen liegen. Durch fehlenden Grundwasserstrom kann es zur Unterdimensionierung der Erdwärmesondenanlage kommen. Davon unbenommen ist die Bohrung trotzdem so zu komplettieren, als ob sie im Grundwasser stünde, da es bei Aufgabe der Bergbautätigkeit zu einem Wiederanstieg des Grundwassers kommt.

Durch Bergsenkungen, Tagbrüche, Bergfälle und andere Bergbaufolgen ergeben sich verschiedene Ausführungsrisiken für Geothermiebohrungen. Ist ein Bergfallgebiet als solches bekannt, sind erhebliche zusätzliche Auflagen bei der Erlaubnis eines Bohrvorhabens zu erwarten.

Das Anfahren von Hohlräumen kann zum Verlust der Bohrung führen. Grubengase können sich in diesen Hohlräumen angesammelt haben und durch die Bohrungen einen Weg an die Tagesoberfläche finden.

22.5 Risiken beim Sondeneinbau

Das Material der einzubauenden Sondenrohre spielt bei der Beurteilung der Risikopotenziale beim Einbau eine wesentliche Rolle. Die am häufigsten verwendeten Doppel-U-Rohre aus Polyethylenen mit hoher Dichte stellen immer wieder eine besondere Herausforderung für die Bohrfirmen dar. Die Möglichkeiten, die Sonden zu beschädigen oder nicht korrekt einzubauen sind vielfältig. Ein zu groß gewählter Bohrdurchmesser erschwert entgegen der häufigen Annahme sogar den Einbau, anstatt ihn zu erleichtern. Die Sonde kann im klüftigen Gebirge in Aussparungen in der Bohrlochwand aufsetzen und sich verkeilen (Abb. 22.4). Durch die enorme Duktilität kann sich dann die Sonde korkenzieherartig in der Bohrung stauen. So ein Einbaufehler ist u. U. am Bohrlochmund gar nicht zu erkennen, weil scheinbar die gesamte Sondenlänge im Bohrloch verschwunden ist. Unter anderem deshalb darf das Sondenbündel beim Einbau nicht mit Maschinenkraft in das Loch geschoben werden.

Abstandhalter können nicht kraftschlüssig mit Polyethylen verbunden werden. Nur Schweißverbindungen würden diese Anforderung erfüllen. Derartige Systeme sind aber

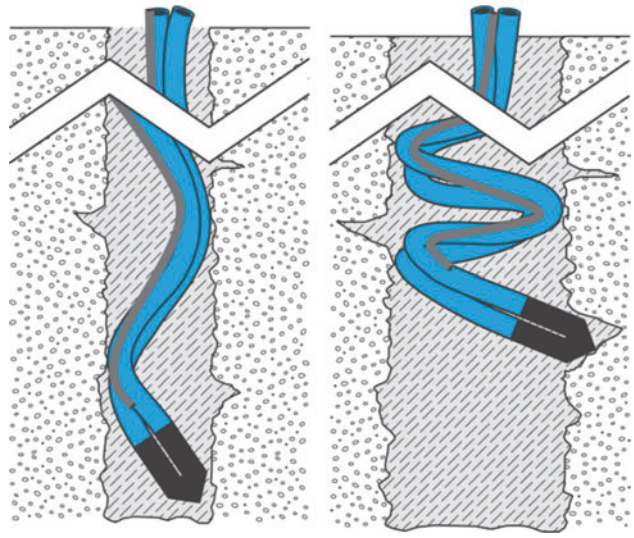


Abb. 22.4 Verkeilung von Erdwärmesonden im Bohrloch mit größerem Durchmesser

Einzelanfertigungen und nicht serienreif. Bei Verwendung von ungeeigneten Abstandhaltern können sich diese bedingt durch die Reibung an der Bohrlochwand beim Herablassen des Sondenbündels längs der Sondenachse verschieben und sich oberflächennah ansammeln. Der Einbau des unteren Teils der Sonde erfolgt dann unzentriert, was z. B. zu einer Verkeilung der Sonde führen kann (Abb. 22.5). Die dichte Ansammlung an Abstandhaltern im oberen Teil des Bohrlochs verhindert zudem eine ordnungsgemäße Verschließung des Bohrlochs mit Verfüllbaustoff.

Bei Bohrungen in der oberflächennahen Geothermie werden für Erdwärmesonden überwiegend einfache, unverrohrte Verfahren eingesetzt. Daran gibt es bei entsprechend dafür

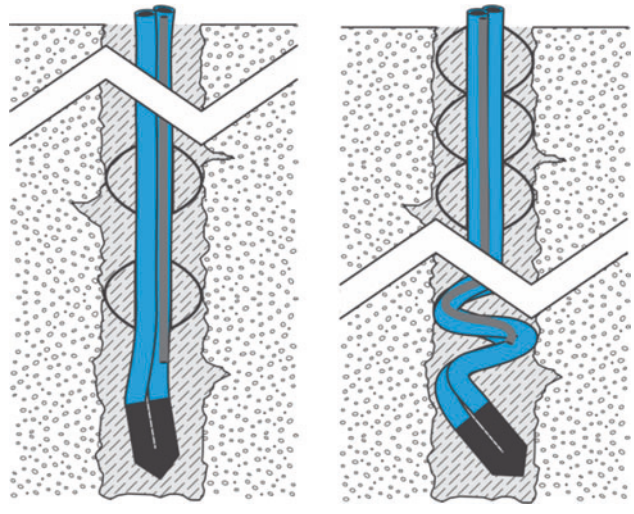


Abb. 22.5 Einbauerschwernis bei Verwendung ungeeigneter Abstandhalter (links wie geplant, rechts bei Ansammlung von Abstandhaltern im oberen Bohrungsabschnitt)

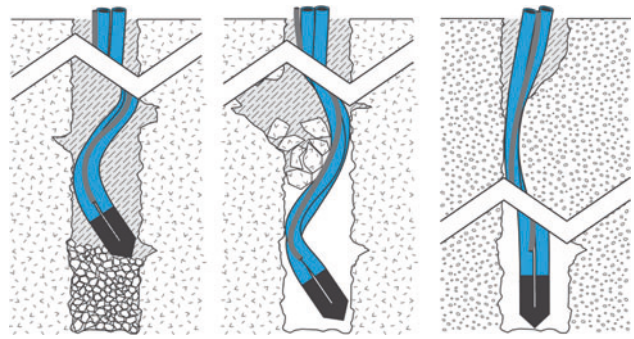


Abb. 22.6 Beispiele für Schadensrisiken bei nachfälligem, nicht standfestem Gebirge oder bei unzureichender Stützwirkung der Bohrsuspension

geeigneten Untergrundverhältnissen nichts auszusetzen. Trotzdem können bei der Anwendung unverrohrter Verfahren mangelhafte Bohrlochstabilitäten auftreten, sodass die Sonde beim Einbau bzw. beim Verpressen durch Kollaps oder Teilkollaps des Bohrlochs beschädigt wird. Tritt der Kollaps vor dem Absenken der Sondenrohre ein, kann die Folge sein, dass die Erdwärmesonde nicht bis zur vorgesehenen Bohrendteufe eingebaut werden kann (Abb. 22.6), mit nachteiligen Auswirkungen für die Anlage:

- Zu geringe Entzugsleistung infolge zu geringer Sondentiefe,
- Mechanische Beschädigung der Sondenrohre,
- Stark eingeschränkter Durchfluss,
- Hydraulischer Kurzschluss infolge mangelhafter Verfüllung des Ringraums.

22.6 Betriebsrisiken

Hinweise auf mögliche Schäden im Betrieb einer Erdwärmesondeanlage können durch den Einbau einer Leckwarneinrichtung frühzeitig gewonnen werden.

Durch eine übermäßige Inanspruchnahme der bzw. durch hydraulisch unzulänglich abgeglichene Sondenkreisläufe kann es infolge von wiederholten Tau-Gefrier-Wechseln zu einem mechanischen Versagen des Hinterfüllbaustoffs kommen, wenn dieser nicht beständig gegen diese Einwirkung ist (Anbergen et al. 2015). Die Folgen können sein:

- Ausbildung von Erdfällen mit einer bodenmechanischen Schwächung des Baugrundes und damit zusammenhängend Schädigung eventuell betroffener Bauwerke;
- Hydraulische Kurzschlüsse, die zur Verbindung ehemals getrennter Grundwasserstockwerke führen;
- Mechanische Beschädigung der Sondenrohre infolge der Eisbildung und durch Eindrücken scharfkantigen Gebirgsmaterials.

Mechanische Schädigung (z. B. Quetschung) von Sonden- und Anbindeleitungen infolge von Bauwerkssetzungen oder Einwuchs (Wurzeldruck) bewirken eine nachlassende thermische Leistungsfähigkeit der Anlage und/oder Leckagen.

Bei Brunnenanlagen treten andere Risikotypen beim Betrieb auf als bei Erdwärmesondenanlagen. Bei unerwartet tiefer Grundwasserabsenkung infolge des Betriebes einer Brunnendublette kann es bei Vorhandensein von empfindlichem Baugrund zu Setzungen kommen. Wasserstandsabhängige Vegetation kann geschädigt werden. Feinkornaustrag infolge eine nicht angepassten Brunnenverfilterung oder eines nicht ordnungsgemäß ausgeführten Brunnenausbaus kann ebenfalls zu Setzungsschäden führen.

Bei übermäßiger Erhöhung des Grundwasserstandes im Umfeld eines Infiltrationsbrunnens kann es zu Vernässungsschäden an angrenzender Bebauung und Vegetation kommen. Nicht auftriebssicher gebaute Gebäude oder Anlagen im Untergrund wie z. B. Erdtanks können aufschwimmen und dabei beschädigt werden. Eine nachlassende hydraulische Leistungsfähigkeit des Infiltrationsbrunnens infolge von Verockerung, Verschleimung, Versinterung oder Feinkorneintrag führt zu einem erhöhten hydraulischen Widerstand und damit einhergehend zu einem Druckanstieg. Bei undichtem Brunnenkopf und mangelhaftem Brunnenausbau führt dies zur Flutung der Brunnenstube bis hin zum übertägigen Austritt des thermisch genutzten Grundwassers.

Durch den Betrieb einer oberflächennahen geothermischen Dublette kann es zu einer Verlagerung eines unbekannten Grundwasserschadens kommen, was zu einem Versagen der Betriebserlaubnis führen kann, wenn der Betreiber der Anlage sich nicht zu einer Entfernung der Schadstoffbelastung bereit erklärt. Ferner können organische Schadstoffe zu einer Schädigung der untertägigen Bauteile wie z. B. Kunststoffbrunnenfilter, Dichtungen etc. führen. Auch innerhalb des Gebäudes kann es dadurch zu Schädigungen z. B. an Wärmetauschern oder Leitungen kommen.

Literatur

Anbergen, H., Kuckelkorn, J., Reuß, M., Frank, J., Müller., L. & Sass, I.: Hydraulische Integrität des Systems Erdwärmesonde. bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau **02** (2015), 34–41 (2015)

Anbergen, H., Frank, J., Müller, L., Sass, I.: Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchanger Grouts: Impact on the Hydraulic Properties. GTJ **37**(4), (2014)

Arnold, W.: Flachbohrtechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1993)

BLA-GEO: Empfehlungen für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde. (Hrsg.): Staatliche geologische Dienste der Deutschen Bundesländer (SGD), S. 64 (www.gd.nrw.de/zip/ew_empfehlungen-durchlaessigkeit.pdf). Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (2015)

DGGT & DGGV (Hrsg.), Sass, I., Brehm, D., Coldewey, W. G., Dietrich, .J., Klein, R., Kellner, T., Kirschbaum, B., Lehr, C., Marek, A., Mielke, P., Müller, L., Panteleit, B., Pohl, S., Porada, J., Schiessl, S., Wedewardt, M., Wesche, D.: Empfehlung Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie. Ernst & Sohn, Berlin (2015)

Englert, K., Grauvogl, J., Maurer, M.: Handbuch des Baugrund- und Tiefbaurechts, Düsseldorf, 2. Aufl. Werner Verlag, (1992)

Englert, K., Schalk, G.: Die „5-M-Methode“ als Hilfsmittel zur Beweisführung bei Baumängeln. Geolex **1**, 17–14 (2003)

Grimm, M., Stober, I., Kohl, T., Blum, P.: Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg. Grundwasser **19**, 275–286 (2014)

Müller, L.: Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden. bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, **07-08**(2009), 30–36 (2009)

Pfeifer, T., Schmitt, H.: Masing – Handbuch Qualitätsmanagement. 46.3 Aus-, Fort- und Weiterbildung, 1012 S. München (2007)

Prinz, H., Strauß, R.: Abriss der Ingenieurgeologie – 4. Aufl. S. 671 Elsevier, München (2006)

Ruch, C., Wirsing, G.: Erkundung und Sanierungsstrategien im Erdwärmesonden-Schadensfall Staufen i. Br. geotechnik 36. Ernst & Sohn, Berin (2013)

Sass, I., Burbaum, U., Petrat, L.: Staufen im Breisgau: Artesisches Grundwasser, Anhydrit und Karst im Konflikt mit geothermischen Bohrungen. 17. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum für Junge Ingenieurgeologen, Zittau (2009)

Sass, I., Burbaum, U.: Damage to the historic town of staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations. Acta Carsologica **39(**2), 233–245 (2010)

Strauß, R.: Das neue web- basierte Informationssystem zu Gefährdungspotentialen des Untergrundes in NRW. geotechnik **4**, 282 (2008)

VDI 4640-2: Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (Gründruck), S. 66. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf (2015)

Kommunikation und Akzeptanz

23

Anna Borg, Eva-Maria Jakobs und Martina Ziefle

Inhaltsverzeichnis

23.1 Handlungsbedarf 692
23.2 Akzeptanz innovativer/neuer Technologien 695
23.3 Kommunikation 699
23.3.1 Kommunikationsansätze für Geothermie 699
23.3.2 Kommunikationsstrategien für Geothermieprojekte 700
23.3.3 Kommunikationsgrundsätze 702
23.3.4 Kommunikationstools 703
23.3.5 (Digitale) Medien 706
23.3.6 Krisenkommunikation 707
23.4 Fazit 708
Literatur 709

Zusammenfassung

Die erfolgreiche Einführung und Umsetzung technologischer Projekte der Oberflächennahen Geothermie als wichtiger Baustein zur Energiewende bedürfen einer sorgfältig geplanten, effektiven und kontinuierlichen Kommunikationsstrategie. Akzeptanz für innovative Technologien ist ein wesentlicher Bestandteil für den langfristigen Erfolg und die nachhaltige Umsetzung neuer Technologien in der Energiewende. Kommunikation

Anna Borg (✉)
CBM – Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH, Niederbexbacher Str. 67, 66450 Bexbach, Deutschland
e-mail: borg@cbm-ac.de

Eva-Maria Jakobs · Martina Ziefle
Human-Computer-Interaction Center, RWTH Aachen University, Campus-Boulevard 57, 52074 Aachen, Deutschland
e-mail: e.m.jakobs@tk.rwth-aachen.de; ziefle@comm.rwth-aachen.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_23

ist ein wesentlicher Zugang zur Herausbildung von Wissen, Vorstellungen und Einstellungen. Der Beitrag beschreibt Herausforderungen an die Kommunikation (größerer) Oberflächennaher Geothermieprojekte sowie Vorgehensweisen, wie Betreiber von Projekten Stakeholder proaktiv adressieren, informieren und einbeziehen können. Basierend auf empirischen Befunden werden Kommunikationsregeln und -grundsätze benannt. Der Beitrag betont die Relevanz projekt-, standort- und stakeholderbezogener Strategien und empfiehlt das Einbeziehen internetbasierter Formate (z. B. Social Media, Foren).

Schlüsselwörter

Kommunikation · Akzeptanz · Öffentlichkeitsarbeit · Einstellung · Wahrnehmung · öffentliche Meinung · Energiewende · Risiko · Wissen · Partizipation

23.1 Handlungsbedarf

Energie aus Oberflächennaher Geothermie kann einen wesentlichen Beitrag zu der durch die Bundesregierung beschlossenen Energiewende leisten. Jedoch sehen sich Geothermieprojekte insgesamt – trotz ihrer Potenziale für die Energiewende – einer zunehmend kritischen Öffentlichkeit gegenüber. Wie und in welchen Umsetzungsformen Geothermie als Energiegewinnungsform nutzbar ist, ist in der Bevölkerung weitestgehend unbekannt. Die Berichterstattung ist geprägt durch Berichte über seismische Ereignisse und die Sorge über schwer einschätzbare Risiken und unkalkulierbare Kosten. Hinzu kommen auf energiepolitischer Seite die Unwägbarkeiten der künftigen Rolle von Geothermie als Teil des Energiemix. Um hier Chancen nutzbar zu machen, brauchen technische Innovationen, wie die Geothermie, gesellschaftliche Akzeptanz, um breit umgesetzt und angewandt zu werden.

Oberflächennahe Projekte sind aktuell insbesondere für die lokale Versorgung mit Wärme oder Kälte von hoher Bedeutung. Zu den Einsatzmöglichkeiten gehören Ein- oder Mehrfamilienhäuser, Verwaltungsgebäude, Bürogebäude und Industriebauten, aber auch die Nutzung zur Eisfreihaltung von Straßen und Bahnweichen. In der öffentlichen Wahrnehmung sind die kleineren Projekte der Oberflächennahen Geothermie aus dem privaten Bereich, wie z. B. die Versorgung mit Wärme/Kälte von Eigenheimen, wenig präsent. Allerdings spielen sie bezogen auf die Energiewende insgesamt und für die Branche eine entscheidende Rolle, um eine breite Umsetzung regenerativer Energie zu ermöglichen. Größere Projekte, wie die Nutzung bei öffentlichen Gebäuden, z. B. Kindergärten oder Bürogebäuden, die auch technisch aufwendiger sind, werden deutlich stärker durch die Bevölkerung wahrgenommen und auch diskutiert. Es gibt grundsätzlich ein großes Potential für einen weiteren Ausbau. Eine zunehmende Rolle spielen Sanierungen von Gebäuden oder auch eine stärkere gewerbliche Nutzung. Derzeit sind in Deutschland rund 318.000 Oberflächennahe Geothermieanlagen in Betrieb (Stand 2015). Zunehmend soll auch die Klimatisierung von Großgebäuden (Verwaltungsgebäude, Museen, Fabriken) mit Oberflächennaher Geothermie erfolgen. Die Klimatisierung von ganzen Wohnanlagen

mithilfe von Erdsonden ist bereits Realität, wie z. B. eine Neubauanlage in Berlin Pankow, in der eine GeoHybrid-Anlage 70 Wohnungen mithilfe von 20 Erdsonden klimatisiert, oder der Erdwärmepark in Neuweiler, wo ein ganzes Neubaugebiet mit Wärme/Kälte aus Oberflächennaher Geothermie versorgt werden soll. Auch Anwendungen im Straßen- und Schienenbau, in denen Geothermie als Verkehrsflächenheizung verwendet wird, sind erfolgreich umgesetzt (Würtele et al. 2005; Bolk et al. 2007).

Die Akteure der Branche wie Planungsbüros, Bohrunternehmen, Architekten, Energieberater und Institutionen haben in der Vergangenheit die Bedeutung der Öffentlichkeitsarbeit und der Kommunikation mit Bürgern, Lokalpolitik und Medien eher unterschätzt. Die Branche konzentriert sich auf die technischen Aspekte der Umsetzung; Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit spielen meist eine untergeordnete Rolle. Kommunikation mit der Öffentlichkeit wird häufig erst dann zum Thema, wenn ein „Ereignis" eintritt und es gilt, kritische Themen im Zusammenhang mit Geothermie zu kommunizieren. Der Umgang mit einer eher kritischen Stimmung in der Bevölkerung stellt jedoch eine Herausforderung dar. Dies kann insbesondere für die Umsetzung größere Projekte, die auch durch die öffentliche Hand gefördert werden, kritisch werden.

Als einschneidendes Ereignis für die gesamte Branche ist das Ereignis in Staufen 2007 zu nennen. Die Stadt Staufen im Breisgau beschloss zur Heizung/Kühlung des historischen Rathauses im Rahmen von Sanierungsarbeiten Oberflächennahe Geothermie zu nutzen. Dazu wurden Sondierungsbohrungen auf einer Tiefe von 140 Metern niedergebracht. Wie sich später herausstellen sollte, schufen die Bohrungen eine Verbindung zwischen einer Schicht mit unter hohem Druck stehendem Grundwasser und einer darüber liegenden Gipskeuperschicht. Kurz nach der Rathauseröffnung in 2007 zeigten sich erste Risse am Gebäude, die sich rasant verstärkten. Auch an umliegenden Gebäuden kam es zu Schäden. Nach Messung zeigte sich, dass in Folge der Bohrungen bis 2009 eine Hebung von 66 mm der Erdoberfläche erfolgt war. Dieses Ereignis hatte und hat Strahlkraft auf die Wahrnehmung und das Image der Geothermie insgesamt. In wie weit hier technische Fehler ursächlich waren oder andere Verursacher eine Rolle spielten, müssen die Experten klären. Die politische, mediale und öffentliche Wirkung war und ist jedoch immens. Seit den Ereignissen 2007 Staufen hat sich die Berichterstattung von einer eher neutralen hin zu einer eher kritisch-negativen gewandelt (Leucht 2010). Exemplarisch für die kritische Einschätzung des Themas und die lang anhaltende Wirksamkeit des Ereignisses in den Medien ist ein Auszug aus einem Interview in der Badischen Zeitung am 18. November 2014 mit Martin Herrenknecht (Butenweg und Kramer 2014).

> „BZ: Sie setzen ja auch auf die Geothermie. Diese Technik ist doch nach dem Erdbeben in Basel und den Hebungen in Staufen erledigt.
>
> Herrenknecht: In Staufen waren Nichtkönner am Werk und in Basel wurde versäumt, die Bürger vorab über mögliche leichte seismische Erschütterungen während des Stimulierens des ersten Bohrloches zu informieren. [...]"

Bezeichnend ist hierbei unter anderem die fehlende Differenzierung zwischen „Oberflächennaher Geothermie" und „Tiefer Geothermie" sowie die Einschätzung der Presse,

dass die Technik „erledigt“ sei. Das Ereignis wurde und wird nicht nur in den Lokalmedien, sondern auch überregional immer wieder aufgegriffen, u. a. im Spiegel Online. Politisch haben sich die Schadensfälle an Orten wie Staufen, Leonberg und Böblingen in der Einführung von Leitlinien zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden (LQS EWS) der jeweiligen Landesministerien niedergeschlagen, die z. B. die Qualitätsanforderungen an Bohrunternehmen erheblich verschärfen.

In der Bevölkerung wird – wie in der Presse – häufig nicht zwischen Oberflächennaher und Tiefer Geothermie differenziert; das Wissen über technische und geologische Grundlagen ist gering. Es werden häufig allgemein Risiken diskutiert. Genannt werden unter anderen als Risiken (vgl. auch Herrmann und Herrmann 2013):

- Geologische Risiken bei der Bohrung wie Nachbrüche, artesische Wässer, Setzungen oder Hebungen,
- Kontamination von Boden und Gewässern durch Bohrlöcher, die verschiedene Aquifere verbinden, sowie durch die Nutzung von Gefrierschutzmitteln und weiterer Hilfsstoffe bei Bohrung und Betrieb,
- Veränderungen der Untergrundtemperatur und deren Auswirkungen auf die Chemie und bakterielle Zusammensetzung im Untergrund,
- Emissionen, Schäden und lokale Beeinträchtigungen, wie Lärm und Staub während Bohrung und Bau,
- Schäden an umliegenden Gebäuden (Seismik) während des Betriebs,
- Beeinträchtigungen der Fauna und Flora (Veränderungen im Mikroklima) während des Betriebs.

Demgegenüber werden insbesondere auf Seiten der Verbände (vgl. Bundesverband Wärmepumpe e.V.) als Vorteile genannt:

- Geothermie als unerschöpfliche Energiequelle,
- überall verfügbar,
- sauber und leise,
- erprobte Technik der Oberflächennahen Geothermie,
- Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern,
- klimafreundlich durch CO_2-Emmissions-Reduktion,
- Wertschöpfung in der Region,
- langfristige Wärmequelle und Investition.

Eine „einfache“ Gegenüberstellung dieser Pros und Contras ist jedoch nicht ausreichend. Um Oberflächennahe Geothermie als Baustein der Energiewende zu verankern, sind Branche und Politik gefordert, initiativ und offensiv an die Öffentlichkeit zu treten und Stadt- oder Kommunalplanung sowie Verbraucherberatungen aktiv in den Dialog einzubeziehen. Ein wichtiger Schritt ist hier ein Bewusst werden der Bedeutung von Kommunikation mit der Öffentlichkeit in der Branche. Für die Akteure der Branche ist die Bedeutung

des Themas Akzeptanz zwar bekannt, aber unscharf und das Potential einer strategischen Kommunikation eher Neuland. Das übergeordnete Ziel sollte sein, einen möglichst offenen Dialog zwischen den beteiligten Parteien zu initiieren, auf Augenhöhe zu führen und konsequent nachzuhalten. Für die Gestaltung derartiger Dialoge ist die Kenntnis der Sicht von Stakeholdergruppen auf Geothermie von Bedeutung (Abschn. 23.2) sowie Kenntnis der Möglichkeiten und Anforderungen der kommunikativen Begleitung geothermischer Anwendungen (Abschn. 23.3).

23.2 Akzeptanz innovativer/neuer Technologien

In der sozialwissenschaftlichen Forschung hat die Untersuchung der Akzeptanz für neue Technologien und technische Artefakte eine inzwischen lange Tradition. Frühe Akzeptanzstudien bezogen sich vornehmlich auf neuartige Geräte und Anwendungen im Bereich der Informationstechnologie im Arbeitskontext (Davis 1989; Arning et al. 2010). Zwischenzeitlich hat sich der Fokus der Akzeptanzforschung um Fragen im Kontext der Energiewende bei infrastrukturellen Planungen und Maßnahmen im urbanen Raum erweitert (Huijts et al. 2012; Wüstenhagen et al. 2007). Dominierende Technologien zur Energiewandlung, wie Kohle- oder Kernenergie, verlieren aufgrund einer Vielzahl negativer Auswirkungen auf Umwelt und Klima zunehmend an Akzeptanz. Insbesondere der Effekt von Öl-, Gas- und Kohlekraftwerken auf die CO_2-Bilanz und die daraus resultierende Einflussnahme auf den anthropogenen Treibhauseffekt sowie die Endlichkeit fossiler Energieressourcen verursachen öffentlichen Widerstand (Bosch und Peyke 2011; Devine-Wright 2005; Sengers et al. 2010). Ökologische und klimatische Auswirkungen von Energieszenarien sind ein wesentlicher Aspekt, der die Nutzerwahrnehmung steuert (Wüstenhagen et al. 2007).

Zu Energieakzeptanz liegt eine breite und heterogene Forschung vor. Sie konzentriert sich auf traditionelle Formen der Energieerzeugung (Atomkraft, Kohle, Öl, Gas; Forsa 2009). Alternative Energieerzeugungsformen gewinnen zunehmend an wissenschaftlicher Relevanz, wie z. B. für Solaranlagen, Windkraft und Biomasse (Devine-Wright und Batel 2013; Zaunbrecher et al. 2016b). Studien zu Geothermie fokussieren politische oder ökonomische Faktoren (Cataldi 2001; Popovski 2003; Dowd et al. 2011), zunehmend werden sozial und emotional bedeutsame Akzeptanzfaktoren thematisiert (Kluge et al. 2015; Kluge und Ziefle 2016; Kowalewski et al. 2014; Zaunbrecher et al. 2016b)

Die Akzeptanz für neue Energieszenarien ist dabei in starkem Ausmaß von prognostizierten Umweltauswirkungen und dem wahrgenommenen Risiko für Anwohner, Gemeinden und Regionen abhängig (Flynn et al. 1994; Groothuis et al. 2008). Systemstabilität ist für Bürger und Bürgerinnen nicht nur auf technischer und ökonomischer, sondern auch auf ökologischer und persönlicher Ebene wichtig und fließt in eine umweltgerechte und akzeptanzbasierte Bewertung ein (Baard 2016; Wüstenhagen et al. 2007).

Akzeptanz wird als ein vielschichtiges Konstrukt interagierender Größen gesehen (Sellke und Renn 2008; Arning et al. 2013). Technologien, die sich der Einsicht und der Einflussnahme der Nutzer entziehen, wie z. B. Energieerzeugungsformen und Infrastrukturen, unterliegen anderen Wahrnehmungsmustern, Maßstäben und Meinungsbildungskontexten als Technologien, deren Erwerb und Nutzung im direkten Handlungsspielraum und Interesse des Einzelnen liegen (acatech 2010; Arning et al. 2010).

Die gesellschaftliche Einstellung zu Technologien ist differenziert, sie ist geprägt von Kosten-Nutzen-Überlegungen und Kontrollerwartungen (Kowalewski et al. 2013), aber auch von symbolischen Assoziationen (Aven und Renn 2012). Akzeptanz neuer Technologien variiert je nach Akteursgruppe (Entscheider in Wirtschaft und Politik, Nutzer, Bürger, technische Planer) und Hintergrundwissen (Bostrom et al. 1994; de Chazal et al. 2008). Während Forscher und Entwickler nach fachlichen Kriterien von der Sinnhaftigkeit und dem Erfolg innovativer Technologien überzeugt sind, besteht in der Bevölkerung oftmals ein breit gestreutes „Nichtwissen“ über den Stand der Technik und die mit der Technologie verbundenen Vorteile und Risiken, die zu Unsicherheit und eher skeptischen Haltungen führen (Renn 2011; Renn 2008b). Die zurückhaltende oder ablehnende Haltung in der Bevölkerung gegenüber einer neuartigen Energieinfrastruktur ist selbst dann beobachtbar, wenn einzelne Facetten der Technologie von der Bevölkerung positiv bewertet werden, wie beispielsweise eine hohe gesellschaftliche Wünschbarkeit (Sozial- und Umweltverträglichkeit), hohe Nutzungserwartung bei geringen Schadens-, Katastrophen- und Missbrauchspotenzialen (Kluge et al. 2015; Trevisan et al. 2014).

Unbehagen gegenüber alternativen Energieerzeugungsformen entsteht unter anderem bei ihrer Anwendung im unmittelbaren persönlichen Lebensraum von Menschen (NIMBY-Phänomen [*not in my backyard*]) (Schively 2007), aber auch bei der Wahrnehmung eines persönlich erlebten Risikos bzw. einer potentiellen Veränderung der Lebensgrundlagen (Renn 2011; Renn 2008b). Das Unbehagen richtet sich zunehmend auch auf die befürchteten Konsequenzen bei der Implementierung von Infrastrukturen, wie Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen (Firestone et al. 2009; Sovacool und Lakshmi Ratan 2012; Kubota et al. 2013) und sonstigen Netzinfrastrukturen im Energiesektor (Kraeusel und Möst 2012; Emmann et al. 2013; Zaunbrecher et al. 2016a, b).

Technikakzeptanz variiert darüber hinaus in starkem Ausmaß in Abhängigkeit individueller Faktoren und Bevölkerungsgruppen (Zaunbrecher et al. 2015). Neben dem Geschlecht und Alter (Zaunbrecher et al. 2014) sind die in einer Generation vermittelten gesellschaftlichen Ideale, Werte und Konzepte relevant, aber auch familiäre und ökonomische Lebensbedingungen, Bildungs- und „Wissensfaktoren“. Ebenfalls sind die normativ-ethische Grundhaltung (Renn 2008a), der kognitive Stil der Auseinandersetzung mit Sachproblemen (Zaunbrecher et al. 2015), der Umgang mit bedrohlichen Ereignissen (Siegrist 2000) sowie der Grad des Verantwortungsbewusstseins für gesellschaftliche Entwicklungen (Huijts et al. 2012) maßgebliche Akzeptanzfaktoren, die darüber mitbestimmen, ob und in welchem Ausmaß Bürger bereit sind, neue Systemlösungen mitzutragen (Bosch et al. 2011; Bostrom et al. 1994; Leiserowitz 2007; Renn 2008a). Ein weiteres Kennzeichen von Akzeptanz ist es, dass sie sogenannten „Trade-offs“ unterliegt. Kennzeichnenderweise werden in der Entscheidung für oder gegen neue

Technologien verschiedene Eigenschaften oder Ausprägungen einer Technologie – sowohl positive als auch negative – gegeneinander abgewogen, je nach Bedeutungsrelevanz (Arning et al. 2014). Charakteristischerweise werden negativ besetzte und emotionale Einstellungen in der Akzeptanzentscheidung stärker berücksichtigt als positive und eher faktenorientierte Argumente (Achterberg et al. 2010; Joffe 2003; Zaunbrecher et al. 2016b), was sich insbesondere bei Geothermie, einer für die Öffentlichkeit noch recht unbekannte Energietechnologie, auswirkt.

Neuste Studien (Kluge et al. 2015; Kluge und Ziefle 2016) zeigen, dass die wichtigsten Akzeptanzfaktoren bei Tiefer Geothermie Transparenz und Vertrauen darstellen. In einer empirischen Studie mit insgesamt 159 Bürgern aus Deutschland (im Alter zwischen 18 und 64 Jahren) wurden Laien aufgefordert, die wahrgenommenen Vor- und Nachteile von Tiefer Geothermie als Bestandteil von Energieszenarien zu bewerten. Wichtig ist dabei, dass es sich nicht um „Fakten" oder „Wissen" handelt, sondern um sogenannte *hidden drivers* (Joffe 2003; Slovic et al. 2003; Zaunbrecher et al. 2016c), die als affektiv konnotierte mentale Modelle die Akzeptanz für oder gegen eine neue Technologie beeinflussen können. Die spontan geäußerten Assoziationen wurden kategorisiert und visualisiert. In Abb. 23.1 sind die geäußerten wahrgenommenen Nachteile von Tiefer Geothermie dargestellt. Die Visualisierung wurde so gewählt, dass die Größe der Darstellung die Häufigkeit der Nennung wiedergibt.

Als Nachteil wurde vor allem die Unsicherheit gegenüber unbekannten Risiken benannt. Mit Tiefer Geothermie werden aber auch Erdbeben assoziiert, die befürchtete Schädigung des eigenen Grundstücks, die Veränderungen beim Grundwasserspiegel und zusätzliche Kosten.

Auf der anderen Seite sind die Wahrnehmung der Vorteile und die positiven Assoziationen vergleichsweise differenziert (Abb. 23.2).

Positive wahrgenommene Eigenschaften sind in erster Linie die Nachhaltigkeit und die Umweltfreundlichkeit der Technologie. Tiefe Geothermie wird als sauber, kostensparend und CO_2-neutral wahrgenommen. Die Sichtbarmachung solcher indirekt wirksamen

Abb. 23.1 Negative Assoziationen (N = 104) zu Tiefer Geothermie. (Kluge et al. 2015)

Abb. 23.2 Positive Assoziationen (N = 108) zu Tiefer Geothermie. (Kluge et al. 2015)

Faktoren ist ein erster Schritt, um akzeptanzwirksame Wahrnehmungs- und Einstellungsmuster zu identifizieren und ein Verständnis über die in der öffentlichen Wahrnehmung vorhandenen Bewertungsmuster zu erhalten.

In einem nächsten Schritt wurden individuelle Faktoren erhoben und in ihrem Einfluss auf die Akzeptanz für Tiefe Geothermie quantifiziert (Kowalewski et al. 2014). In einer Onlinebefragung (N = 390) wurden der Einfluss von der wahrgenommenen Selbstwirksamkeit im Umgang mit Technologie, der Einstellung gegenüber erneuerbaren Energien im Allgemeinen, aber auch das generelle Umweltbewusstsein sowie Argumente für und gegen die Nutzung von Tiefer Geothermie erhoben. Mittels einer Strukturgleichungsmodellierung wurde geprüft, welche Einflussfaktoren sich in welchem Ausmaß auf die Akzeptanz für Geothermie auswirken (Abb. 23.3).

Die Analyse des Strukturgleichungsmodells zeigt, dass vor allem die Pro-Argumente für Geothermie einen starken Einfluss auf die Akzeptanz von Geothermie haben. Aber auch die Argumente gegen Geothermie beeinflussen die Akzeptanz deutlicher als die geprüften individuellen Faktoren. Besonders interessant ist, dass das generelle Umweltbewusstsein zwar die Einstellung zu erneuerbaren Energien im Allgemeinen beeinflusst, nicht aber die Einstellung zu Tiefer Geothermie. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Tiefe Geothermie im mentalen Modell nicht als eine „prototypische“ erneuerbare Energieform wahrgenommen wird. Zwar beziehen sich die hier dargestellten Ergebnisse auf Tiefe Geothermie, dennoch hat sich in den empirischen Untersuchungen immer wieder gezeigt, dass das mentale Modell und die Assoziationen bei Laien nicht exakt zwischen

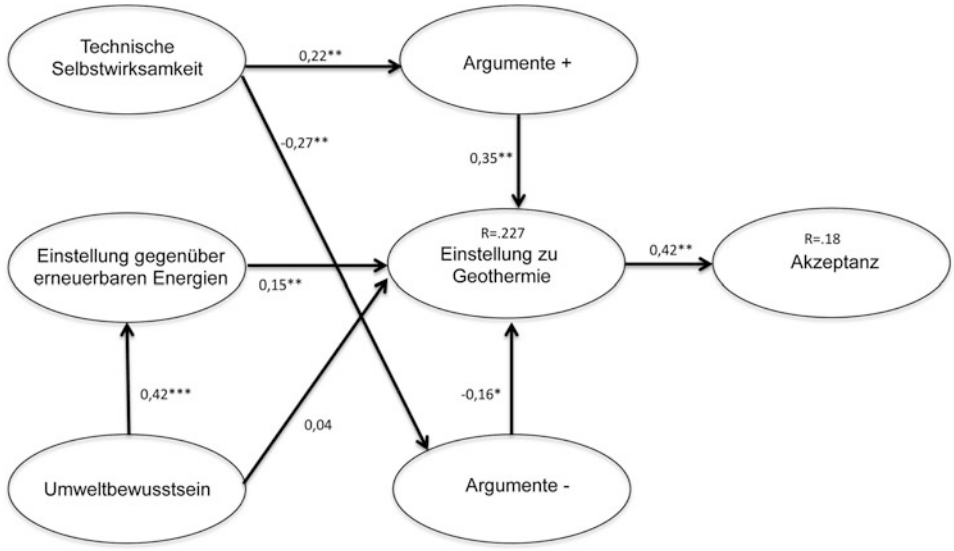


Abb. 23.3 Strukturgleichungsmodell. Zusammenhänge zwischen den geprüften Faktoren und den Pro- und Contra-Argumente zur Nutzung von Geothermie. Signifikante Relationen sind mit + ($p<0{,}05$) und *($p<0{,}001$) gekennzeichnet

Tiefer und Oberflächennaher Geothermie unterscheidet und das Untersuchungsergebnis eher als generische Bewertung für Geothermie an sich zu sehen ist.

Eine adäquate und Akzeptanz fördernde Informationsstrategie sollte sich auf Geothermie als eine Form erneuerbarer Energien fokussieren und somit ihr Image als regenerative Energie stärker fördern. Dies ist Gegenstand des nächsten Kapitels.

23.3 Kommunikation

Die erfolgreiche Einführung und Umsetzung technologischer Projekte, die die Lebenswelt von Bürgern tangieren, bedürfen einer sorgfältig geplanten, effektiven und kontinuierlich umgesetzten Kommunikationsstrategie, um Zielkonflikte der beteiligten Parteien frühzeitig zu erkennen und im Diskurs lösen zu können. Kommunikation ist ein wesentlicher Zugang zur Herausbildung von Wissen, Vorstellungen und Einstellungen, z. B. der Bereitschaft, etwas mitzutragen, aber auch ein mächtiges Mittel für die Interaktion mit anderen und in Verhandlungsprozessen. Kommunikation ermöglicht, (verdeckte) Ängste und Perspektivendivergenzen offenzulegen und sich im Austausch zu einigen.

Es gibt eine Vielzahl von Studien, die auf die Bedeutung von Kommunikation und Partizipation für die erfolgreiche Umsetzung technologischer Projekte, etwa im Umfeld erneuerbarer Energie oder bei Infrastrukturentscheidungen, verweisen (Goldschmidt et al. 2008; Renn 2015). Wie diese im Einzelnen erfolgen soll, bleibt oft offen oder vage. Es fehlen insbesondere Kommunikationskonzepte für geothermische Technologien (z. B. Wallquist und Holenstein 2015) sowie Ansätze, die das Wissen verschiedener Disziplinen in Kommunikationsstrategien zusammenführen. Der unseres Wissens einzige bislang vorliegende interdisziplinäre Ansatz entstand in dem BMU-geförderten Projekt TIGER (Abschn. 23.3.1). Er umfasst eine Kommunikationsstrategie (Abschn. 23.3.2), Regeln (Abschn. 23.3.3) und Tools (Abschn. 23.3.4). Zu den Bestandteilen von Kommunikationsstrategien für geothermische Projekte sollten Maßnahmen für die Risikokommunikation gehören (Abschn. 23.3.6).

Kommunikationskonzepte sollten zudem berücksichtigen, dass sich in den letzten zehn Jahren die Orte der öffentlichen Meinungsbildung mehr und mehr ins Internet verlagert haben. Das Portfolio von Kommunikationsmitteln sollte daher das Potential von Social-Media-Applikationen nutzen. Social-Media-Applikationen bieten nicht nur vielversprechende Ansätze des Kontakts zu Zielgruppen (Abschn. 23.3.5), sondern auch des Screenings öffentlich geführter Diskurse.

23.3.1 Kommunikationsansätze für Geothermie

Der bislang umfangreichste Kommunikationsansatz für Geothermieprojekte entstand im Kontext des BMU-geförderten Verbundprojektes TIGER. Er führt Wissen und empirische Befunde verschiedener Disziplinen – Ingenieurwissenschaft, Psychologie, Technikkommunikation – zusammen (Reimer et al. 2015). Der stakeholderzentrierte Ansatz wurde

ursprünglich für die Einführung und Begleitung von Tiefen Geothermieprojekten entwickelt, ist aber in Teilen oder als Ganzes auf alle Arten der Nutzung von Geothermie übertragbar, insbesondere für größere Projekte, wie die Anwendung Oberflächennaher Geothermie in Industrieprojekten, Gewächshäusern oder in ganzen Siedlungen.

Oberflächennahe Projekte haben durch ihre geringere Reichweite und durch ihren lokalen Versorgungscharakter einen starken Bezug zu den lokalen sozial-gesellschaftlichen Bedingungen. Die Tiefe und Breite von Kommunikationsmaßnahmen hängen zudem von den Rahmenbedingungen des geplanten Projekts ab. Auch bei kleinen, privat finanzierten Projekten, wie Erdsonden oder Energiepfählen im Eigenheimbereich, ist Kommunikation wichtig – z. B. für Anwohner, die diese nicht nutzen und gegebenenfalls Schäden für ihre Häuser befürchten. Eine Grundanforderung ist der Umgang auf Augenhöhe miteinander, um Missverständnisse und Konflikte zu vermeiden und Dialogbereitschaft und Vertrauen aufzubauen.

Der in TIGER entwickelte Ansatz adressiert Entscheider, Kommunikationsexperten und Bürger. Er geht davon aus, dass Wissen, gefühlte Informiertheit und ein offener Dialog zwischen den Beteiligten dazu beitragen können, die öffentliche Akzeptanz für technologische Projekte zu fördern. Projektmanager und Kommunikationsexperten erhalten vielfältige Hinweise darauf, wie sie Stakeholdergruppen im Verlauf des geothermischen Projekts informieren, adressieren und integrieren können. Der Ansatz umfasst eine Kommunikationsstrategie, Hintergrundwissen, Kommunikationsgrundsätze bzw. -regeln und eine Web-App. Alle Komponenten orientieren sich an den Phasen bzw. dem *life cycle* eines Geothermieprojekts sowie standort- und ereignisbezogenen Anforderungen.

23.3.2 Kommunikationsstrategien für Geothermieprojekte

Die Umsetzung von Kommunikationsstrategien erfordert umfangreiches Wissen aus verschiedenen Gebieten. Es wurde in TIGER interdisziplinär erarbeitet und als Hintergrundwissen in die Entwicklung der Strategie und der App integriert. Das Hintergrundwissen umfasst Hinweise zu generellen und/oder ortsbezogenen Befürchtungen von Bürgern zu Geothermieanwendungen, zu technologiespezifischen Wissensbedarfen, zu standortgebundenen und technischen Aspekten geothermischer Projekte, zu Kommunikations- und Interaktionsbedarfen, zur Eignung von Kommunikationsformaten für bestimmte Zwecke sowie zum Umgang mit Massenmedien (Reimer et al. 2015).

Der Ansatz unterstützt Projektbetreiber sowie lokale Entscheider (Bürgermeister, Vertreter der Kommune, andere staatliche Institutionen) bei der Entwicklung einer Kommunikations- und Interaktionsstrategie, die auf die Bedürfnisse des jeweiligen Projektes und Standorts zugeschnitten ist. Er bietet insbesondere Antworten auf Fragen wie die folgenden: Wer (Stakeholder) sollte wann (in welcher Projektphase) wie worüber informiert werden? Welches Thema ist für wen relevant? Wer benötigt welche Information? Welche potentiellen Risiken bestehen? Wie sollten diese an Bürger bzw. Anwohner kommuniziert werden?

Die Entwicklung einer projektbezogenen Kommunikationsstrategie erfordert Festlegungen zu Zielen, Inhalten und Anlässen der Kommunikation, zu Zielgruppen und zeitlichem Vorgehen, zu Maßnahmen und Formaten, zu Ansprechpartnern und Budgets (Reimer et al. 2015). Die Planung der Strategie muss frühzeitig einsetzen; die Umsetzung muss nachgehalten, iterativ überprüft und gegebenenfalls nachjustiert werden. Wesentliche Orientierungspunkte der strategischen Planung resultieren aus dem Zusammenspiel von Projektverlauf, Standortbedingungen und Kommunikationsanlässen.

In TIGER bilden der Projektlebenszyklus und seine Meilensteine die Grundlage für das Planen, Umsetzen und Nachjustieren von Maßnahmen und Inhalten in der Zeit. Oberflächennahe Projekte umfassen Phasen wie Vorbereitung/Planung, Erkundung, Bohrung, Einbau und Anschluss sowie Betrieb. Jede Phase hat ihre „typischen" Aufgaben. Bei bzw. vor Projektbeginn müssen vorab festzulegende Zielgruppen über die Ziele, Inhalte und den Ablauf des Geothermieprojekts sowie die genutzte Technologie informiert werden. Je nach Standortvoraussetzungen bzw. Vorgeschichte sollten frühzeitig vor Ort Maßnahmen etabliert werden, die den Abgleich von Interessen, Zielen und Befindlichkeiten ermöglichen. Im Projektverlauf verlagern sich Kommunikationsaufgaben auf Informationen zum aktuellen Projektstand, zu Ort und Zeit der nächsten geplanten Maßnahmen oder zum öffentlichen Austausch über Maßnahmen in Onlineforen. Im Projektverlauf kann es zu unvorhergesehenen bzw. nicht planbaren Ereignissen kommen, die eine schnelle Reaktion und eine effiziente Risikokommunikation erfordern. Jede Phase hat damit ihre eigene Themen, Risiken und Herausforderungen.

Teil der Strategieentwicklung ist eine sorgfältige Analyse des Standorts. Studien zeigen, dass die lokalen Bedingungen starken Einfluss auf die Wahrnehmung von Technologien haben (vgl. Abschn. 23.2). Hilfreich scheinen u. a. Informationen, die den Bewohnern eines bestimmten Gebiets helfen, den Stellenwert eines technischen Vorhabens in seinem Bezug zum örtlichen Umfeld zu verstehen und einzuordnen, vor dem Hintergrund ihres Selbst- und Fremdbilds im eigenen sozialen und kulturellen Umfeld (Renn 2015). Die standortspezifische Ausrichtung der Kommunikationsstrategie hat weitreichende Konsequenzen für die Behandlung von Themen, Argumentationslinien und die Adressierung von Zielgruppen (Trevisan et al. 2013). Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die Befindlichkeit vor Ort zu kennen und den richtigen Ton zu finden.

Die genutzte Technologie, das Projekt und die Standortbedingungen bestimmen maßgeblich die Festlegung von Zielgruppen der Kommunikationsstrategie. Eine wesentliche Anforderung ist, potentielle Perspektivendivergenzen zu erkennen und diese in der Planung von Maßnahmen und Argumenten zu berücksichtigen. Das übergeordnete Ziel ist, einen möglichst offenen Dialog zwischen den beteiligten Parteien zu initiieren, auf Augenhöhe zu führen und konsequent nachzuhalten. Relevant sind Zielgrößen wie wahrgenommene Transparenz und Seriosität sowie das Gefühl, als involvierter Partner ernst genommen zu werden.

Die zu lösenden Aufgaben erfordern verschiedene Formen der Interaktion mit den Zielgruppen. Studien belegen, dass Bürger nicht nur informiert werden wollen, sie wünschen und erwarten (gefühlte) Möglichkeiten der aktiven wie passiven Partizipation (Hübner und

Hahn 2013; Hübner und Pohl 2014; Renn 2015). Insofern geht es um das Planen und Abstimmen der Trias von Informieren (einseitige Kommunikation), Interaktion (zweiseitige Formen wie Dialog) und Partizipieren (gefühltes Mitbestimmungsrecht) (Goldschmidt et al. 2012). Die Fallstudien in TIGER zeigen, dass das Verhältnis der drei Kommunikationsbereiche, ihre Inhalte und Aufgaben abhängig von der jeweils erreichten Projektphase, den Bedingungen vor Ort sowie extern geführten Debatten um eine Technologie und ihre Nutzung variieren (Trevisan et al. 2013; Wirtz-Brückner et al. 2015).

Kommunikationsstrategien für geothermische Projekte adressieren meist heterogene Zielgruppen, die sich in ihren Präferenzen für Kommunikationsformate (bezogen auf Anlässe und Aufgaben) unterscheiden. Um sie in ihrer Heterogenität zu erreichen, empfiehlt die TIGER-Strategie eine cross- und multimediale Kommunikations- und Informationsstrategie (Reimer et al. 2015, Wirtz-Brückner et al. 2015). Die Kommunikationsformate (Mailings, Flyer, Treffen, Bürgerworkshop, Social-Media-Inhalt) müssen auf die jeweilige Projektphase, die zu lösenden Aufgaben sowie Präferenzen und Bedarfen der Zielgruppe abgestimmt werden. Für Informationsaufgaben zu Beginn eines Projekts eignen sich „passiv-monologische" Formen (Flyer, Broschüren, Mailings) als Wurfsendung für Haushalte, für Verständigungsprozesse, die divergierende Perspektiven thematisieren und Verständnisbarrieren abbauen wollen, eignen sich eher „aktiv-dialogische" Formen wie Bürgerforen und Blogs, für das Informieren über den aktuellen Projektstand digitale Echtzeitformate (z. B. in Facebook).

23.3.3 Kommunikationsgrundsätze

Für die Umsetzung der Kommunikationsstrategie wurden in TIGER Kommunikationsgrundsätze (Borg und Bauer 2017) und -regeln entwickelt. Sie überführen empirische Erkenntnisse in praktische Ratschläge, wie:

Kommunikationsgrundsätze

- Geothermieprojekte sollten von Anfang an durch Kommunikation und PR nach außen begleitet werden.
- Für die kommunikative Begleitung sollte ein angemessenes Budget bereitgestellt werden (ca. 0,5 bis 1 % des Projektbudgets).
- Es sollte eine Projektgeschichte entwickelt werden, die das geplante technische Projekt und den Betreiber (Motivation, Umstände, Zeitplan, Ziele des Unternehmens) vorstellt.
- Es sollte ein Ansprechpartner bestimmt werden, der das Projekt nach außen vertritt, die lokalen Gegebenheiten kennt und Kontakt zu Anwohnern, örtlichen Entscheidern und der lokalen Presse hält.

- Es sollte frühzeitig festgelegt und iterativ überprüft werden, wer wie wann über welche Wege (Kommunikationsformate und -kanäle) kontaktiert und informiert werden soll.
- Für Meilensteine sollten Kommunikationsanlässe definiert werden.
- Es sollten Regeln für die Risikokommunikation entwickelt werden.

Der TIGER-Ansatz umfasst sogenannte „Goldene Regeln", die auf Befunden zur öffentlichen Wahrnehmung und Akzeptanz von Technologien basieren. Dazu ein Beispiel: Viele neue Technologien sind weitgehend unbekannt. Die Bürger wissen wenig darüber, wie sie funktionieren, welche Vorteile sie bringen und welche potentiellen Risiken sie bergen. Nichtwissen ist ein Nährboden für Vermutungen, Ängste und Meinungsmache. Wie in Abschn. 23.2 beschrieben, können sich Kommunikationsmaßnahmen, die Wissen und Argumente neutral-sachlich vermitteln, positiv auf Akzeptanzbildungsprozesse auswirken. Informationen, die sich auf „objektive" Quellen stützen, insbesondere wissenschaftliche Studien, genießen höheres Ansehen als Informationen, die durch die Industrie generiert werden – Wissenschaftler gelten als unabhängig und damit vertrauenswürdig (Ruddad et al. 2005). Dies bestätigt die Einsicht, dass der Aufbau von Vertrauen wesentlich für den Erfolg der Projektkommunikation ist (Kluge et al. 2015). „Goldene Regeln", die den Aufbau von Vertrauen unterstützen, sind u. a.:

Goldene Regeln

- Erzeuge Vertrauen durch objektives Informieren.
- Beziehe alle Stakeholder kontinuierlich ein (Anwohner, Kommune, Presse).
- Kommuniziere transparent; praktiziere eine offene Informationspolitik.
- Betone die Vorteile einer Technologie, ohne ihre Nachteile zu verschweigen.

Die kommunikative Begleitung geothermischer Vorhaben sollte z. B. betonen, dass Geothermie einen wertvollen Beitrag zum Portfolio erneuerbarer Energien leistet und so das gute Renommee erneuerbarer Energien nutzen.

23.3.4 Kommunikationstools

Die allumfassende Digitalisierung des professionellen, öffentlichen und privaten Lebens legt nahe, stärker als bisher digitale Kommunikations- und Interaktionsformate zu nutzen. Sie eignen sich insbesondere für flächendeckende Maßnahmen, für die Vermittlung von

Hintergrundwissen sowie für interaktive Formen der Vermittlung von Wissen und Argumenten. Die TIGER-Strategie nutzt dieses Potential durch eine Web-App für Geothermie sowie Empfehlungen für den Einsatz von Facebook (vgl. Abschn. 23.3.5).

Die App hilft Entscheidern und Kommunikationsexperten, regionale Aspekte sowie die Anforderungen einer bestimmten Projektphase angemessen zu berücksichtigen. Interessierte Bürger können sie nutzen, um sich sachbetont oder spielerisch über Geothermieanwendungen zu informieren. Die App ist online verfügbar – über die TIGER-Website (www.tiger-geothermie.de), in App-Stores als „TIGER-App“ oder über einen QR-Code (vgl. Abb. 23.4).

Die App umfasst drei Teile: Wissen, Toolbox und Spiel. Der Teil Wissen adressiert die breite Öffentlichkeit. Er stellt Basiswissen für Laien in Form von kurzen, gut verständlich formulierten Texten zu ausgewählten Themen bereit (z. B. „Was ist geothermische Energie?“), die durch anschauliche Illustrationen und weiterführende Links ergänzt werden (vgl. Abb. 23.5).

Die Toolbox richtet sich an Projektmanager und Institutionen. Sie liefert filterbasiert hilfreiche Hinweise für effektive Kommunikationsstrategien durch konkrete standort- und projektphasenbezogene Empfehlungen. Die Struktur orientiert sich an den Projektphasen einer geothermischen Anlage. Nach Auswahl der Projektphase gibt die Toolbox durch Wahl der betreffenden Teilphase Empfehlungen für Inhalte, Vorgehen und geeignete Medien der Kommunikation sowie Hinweise, zu welchem Zeitpunkt welche Zielgruppen angesprochen werden sollen. Die Empfehlungen werden ergänzt durch Checklisten (z. B. zur Pressearbeit), die die praktische Umsetzung der einzelnen Aspekte unterstützen.

Die Empfehlungen beziehen sich auf den Regelfall (Regelkommunikation) oder auf Ereignisse (Ereigniskommunikation) (Abb. 23.6). Sie instruieren, wann (Ereignis) wer welche Information in welchem Medienformat erhalten sollte, z. B. im Falle von Produktions- und Fördertests wie Thermal Response Tests. Sie erzeugen Abstimmungsbedarf (zwischen Betreiber, Kommune und Anwohnern), kreieren Informationsbedarf (z. B. zur Art der technischen Umsetzung sowie zu Ort, Zeitpunkt, Umfang und Folgen einer Maßnahme) und erfordern die Benennung einer Kontaktperson (für Rückfragen).

Der dritte Teil der App ist als *serious game* konzipiert. Interessierte Laien eignen sich spielerisch in der Interaktion mit der App Wissen über technische Aspekte an und üben Perspektivwechsel. Das Wissen wird im Spielverlauf angewandt und so vertieft.

Abb. 23.4 QR-Code TIGER-App

Abb. 23.5 Erklärungstext der Web-App

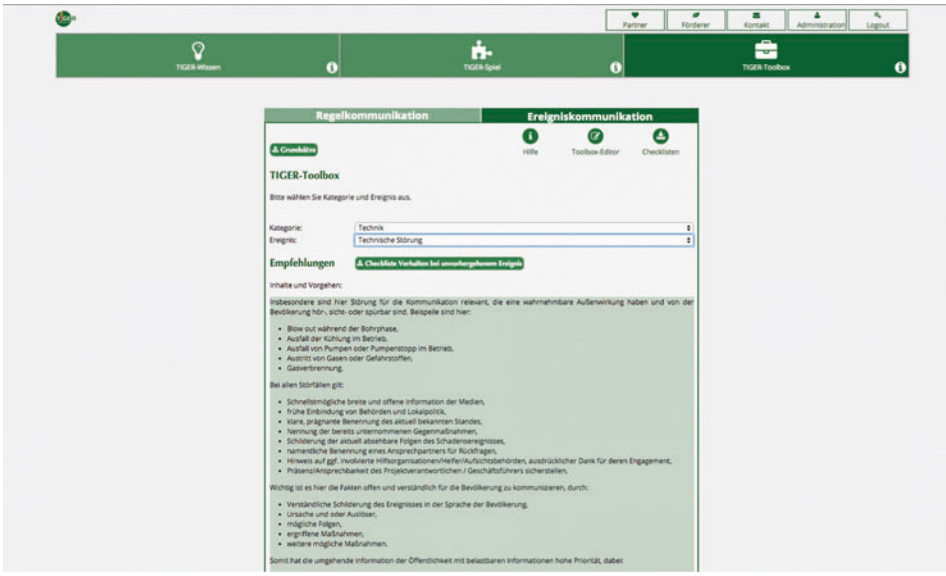


Abb. 23.6 Toolbox der Web-App mit Empfehlungen

Abb. 23.7 Szene aus dem TIGER-Spiel

Übergeordnetes Ziel ist es, die Spielwelt mit Erneuerbarer Energie aus Tiefer Geothermie zu versorgen. In verschiedenen Szenarien kann der Spieler geothermische Anlagen bauen und betreiben. Sein Erfolg hängt dabei wesentlich von der Akzeptanz der Bevölkerung ab. Durch verschiedene Aktivitäten kann er seine Reputation erhöhen und so erfolgreicher werden. Die Errichtung einer geothermischen Anlage und die Hürden und Herausforderungen, die sich im Spielverlauf ergeben, spiegeln dabei die realen Bedingungen und die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt wider (vgl. Abb. 23.7).

23.3.5 (Digitale) Medien

Studien von TIGER indizieren, dass Projektflyer und Informationsbroschüren nach Zeitungsartikeln die bevorzugte Informationsart sind (Kluge et al. 2015). Sie erreichen eine breite lokale Zielgruppe und bieten die Möglichkeit zur Darstellung des eigenen Unternehmens, z. B. beim Start größerer Projekte. Andere Studien zeigen, dass die medialen Präferenzen von Zielgruppen stark differieren, abhängig von ihrem Bezug zu Projekt und Technologie und übergeordneten Interessen (z. B. sich informieren versus etwas verhandeln versus eine Information weiterverwerten) (Jakobs und Mauelshagen 2015). Insgesamt zeigt sich, dass das Interesse an digitalen Kommunikationsformaten deutlich gestiegen ist.

Das Portfolio nutzbarer digitaler Formate ist breit. Für Information mit großer Reichweite bieten sich Websites an mit Informationsmaterial als Downloads oder Blogs an, für den Austausch zu Technologien und über das Projekt eignen sich dagegen Blogs und Foren. Insbesondere Social-Media-Anwendungen wie Facebook können gezielt als Teil der Kommunikationsstrategie genutzt werden, etwa für Zwecke wie den Aufbau von

Transparenz, Vertrauen und Communities (Wirtz-Brückner et al. 2015). Sie eignen sich nicht als Leitmedium, aber als ergänzendes Kommunikationsformat.

Das Kommunikationspotential von Facebook differiert je nach Art der Komponente (Wirtz-Brückner et al. 2015): Fanseiten eignen sich z. B. für die breite Streuung von News. Sie ermöglichen eingeschriebenen Nutzern, sich zeitaktuell über Projektabschnitte, lokale Events (z. B. Paneldiskussionen) oder Vorfälle zu informieren. Bei Vorkommnissen können sie für Zwecke der proaktiven Kommunikation (z. B. Warnungen) als auch der reaktiven Kommunikation (z. B. Entschuldigung) genutzt werden und sind dann Teil der lokalen Beziehungsgestaltung. Unternehmen können sie für Promotionszwecke nutzen, z. B. für die pointierte Darstellung lokaler Vorteile einer Technologieanwendung, und durch Links zu renommierten Institutionen Seriosität implizieren. Die Komponente Event eignet sich für die Ankündigung von Offline-Events oder für die gezielte Adressierung ausgewählter Zielgruppen. Die Ankündigung entscheidungsrelevanter Vorgänge vermittelt den Eindruck von Transparenz; die Einladung zu Veranstaltungen zeigt Partizipationsmöglichkeiten an. Die Komponente Groups ermöglicht den Austausch in einer geschützten Umgebung. Die Nutzung der Group-Komponente erfordert nutzerseitig Aktivität; das Ausmaß der Nutzung erlaubt Rückschlüsse auf die Aktualität eines Themas oder den Grad der Betroffenheit der Teilnehmer. Moderierte Gruppendiskussionen erhöhen die Qualität des Austausches, bedingen aber entsprechende personale Ressourcen.

Internetbasierte Formate bieten darüber hinaus eine wertvolle Ressource für die Analyse von Stakeholdergruppen. In TIGER wurden (linguistische) Text und Web-Mining-Methoden eingesetzt, um Hinweise auf standort- und gruppenbezogene Haltungen zu Geothermie zu erhalten (vgl. dazu den Überblick in Trevisan und Jakobs 2015). Die Analyse von Äußerungen in (lokal verankerten) Blogs und Foren sowie in Facebook liefert wertvolle Hinweise auf öffentlich wahrgenommene Risiken und Potentiale einer Technologie, aber auch zum Einfluss bereits laufender Diskussionen im Internet auf die Meinungsbildung vor Ort. Für die Entwicklung von Argumentationslinien ist es wichtig zu wissen, welche Eigenschaften einer Technologie *(topic analysis)* wie (*sentiment analysis*) von wem (*stakeholder analysis*) wo (*site analysis*) wahrgenommen und bewertet werden, womit sie verglichen werden, welche Gruppen welche Argumente (*argument analysis*), wie sich die Diskussion im Laufe der Zeit verändert (*trend analysis*) und wie sie durch Ereignisse von außen beeinflusst wird (Reimer et al. 2015; Trevisan et al. 2015).

23.3.6 Krisenkommunikation

Strategische Kommunikation schließt – insbesondere im Falle größerer Projekte – die Planung von Krisenkommunikation ein, um im Falle eines unvorhergesehenen Ereignisses kommunikativ adäquat und schnell reagieren zu können. Dazu gehören alle kommunikativen Maßnahmen vor oder während einer Krise zur Meisterung oder Verhinderung einer Krise (Ditges et al. 2008). Grundsätzlich sollten für eine transparente Kommunikation alle Ereignisse nach außen kommuniziert werden. Der Zeitpunkt ist erfolgskritisch, vor

allem die ersten 24 Stunden nach Eintreten des Ereignisses sind wichtig. Je „sichtbarer“ bzw. „spürbarer“ ein Ereignis ist, desto unmittelbarer sollte die Öffentlichkeit informiert werden, um Vertrauen zu erhalten oder zu schaffen.

Die eigentliche Krisenkommunikation beginnt damit, dass potenzielle Ursachen für Krisen erkannt und darauf bezogene Vorgehensweisen definiert werden. Grundsätzlich gilt:

Krisenkommunikation

- Rollen und Kompetenzen regeln (Krisenstab, Mediensprecher): Wer spricht wann mit wem über was?
- Angemessen und schnell reagieren (bei Bedarf binnen Stunden).
- Klar informieren: Nicht wider besseren Wissens abstreiten, nur gesicherte Informationen veröffentlichen bzw. darauf hinweisen, dass eine Information (noch) nicht abgesichert ist, z. B. weil die Ursachenfindung Zeit erfordert. In diesem Fall sollten, wenn möglich, Zeitfenster benannt werden.
- Überblick bewahren: Ein Krisenjournal führen (wann ist was passiert, wer hat welche Informationen wann gegeben, welche Reaktionen gab es).
- Nach der Krise: Selbstkritisch alle Abläufe analysieren, um daraus zu lernen.

Studien zeigen immer wieder, dass sich Akteursgruppen in der Einschätzungen von Risiken unterscheiden, etwa Laien und Experten (u. a. Digmayer et al. 2015). Dies ist in der kommunikativen Behandlung von Ereignissen ebenso zu berücksichtigen wie der Einfluss von Emotionalität auf die Bewertung von Vorkommnissen (Wiedemann 2013). Risikokommunikation sollte dezidiert die Sicht von Laien adressieren. Hier passieren in der Regel entscheidende Fehler, wenn Experten die durch Laien wahrgenommenen Risiken gegenüber der Öffentlichkeit banalisieren, anstatt sich angemessen mit ihnen auseinanderzusetzen.

23.4 Fazit

Damit Oberflächennahe Geothermie als fester Bestandteil der Energiewende verankert werden kann, ist eine intensive Beschäftigung der Branche mit dem Thema Akzeptanz und Kommunikation unabdingbar. Wesentlicher Bestandteil für den Erfolg und die langfristige Umsetzung geothermischer Projekte ist die (zumindest hinnehmende) Akzeptanz der Technologie in der Bevölkerung. Wie auch im Falle anderer Technologien ist davon auszugehen, dass insbesondere Transparenz und Vertrauen entscheidende Faktoren im Sinne von *hidden driv*ers sind. Hier muss die Branche – insbesondere vor dem Hintergrund der

Ereignisse in Staufen und deren immer noch starken Wirkung auf die Wahrnehmung und Berichterstattung – erneut Vertrauen in die Technologie „erarbeiten“. Ein wesentliches Mittel der Vermittlung von Transparenz und Dialogbereitschaft ist eine Kommunikationsstrategie, die über die Informationsvermittlung hinaus den offenen Dialog zwischen den beteiligten Parteien fördert. Institutionen, Politik und Betreiber von Geothermieprojekten sollten eine regelmäßige, zeitnahe, die Unterschiede von Zielgruppen und Standorten berücksichtigende Kommunikation anstreben, die durch objektive Wissensvermittlung Vertrauen schafft und kritische Aspekte nicht verschweigt. Dabei gibt es nicht *das* Vorgehen, sondern immer nur ein sich an Technologie, Situation, Standort und Stakeholdern ausrichtendes Rahmenkonzept.

Literatur

acatech: Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen. Anmerkungen zu einem (aktuellen) Problem. acatech Position (2010)

Achterberg, P., Houtman, D., van Bohemen, S., Manevska K.: Unknowing but supportive? Predispositions, knowledge, and support for hydrogen technology in the Netherlands. J. Hydrog. Energy **35**(12), 6075–6083 (2010)

Arning, K., Kowalewski, S., Ziefle, M.: Modelling user Acceptance of wireless medical technologies. In: Godara, B. et al. (Hrsg.) Wireless Mobile Communication and Healthcare, LNCS, 61, S. 146–153. Springer, Berlin (2013)

Arning, K., Kowalewski, S., Ziefle, M.: Health concerns vs. mobile data needs: Conjoint measurement of preferences for mobile communication network scenarios. Int. J. Hum. Ecol. Risk. Assess. **20**(5), 1359–1384 (2014)

Arning, K., Gaul, S., Ziefle, M.: Same same but different. How service contexts of mobile technologies shape usage motives and barriers. In: Leitner, G., Hitz M., Holzinger, A. (Hrsg.) HCI in Work & Learning, Life & Leisure, USAB 2010, LNCS 6389, S. 34–54. Springer, Berlin (2010)

Aven, T., Renn, O.: On the risk management and risk governance of petroleum operations in the barents sea area. Risk Anal. **32**(9), 1561–1575 (2012)

Baard, P.: Risk-reducing goals: Ideals and abilities when managing complex environmental risks. J. Risk Res. **19**(2), 164–180 (2016)

Bolk, P., Katzenbach, R., Waberseck, T., Steinbach, C.: Entwicklung des neuen, qualifizierten Winterdienstsystems QuaWiDiS®für Personenverkehrsflächen durch die Nutzung regenerativer Energien. Schlussbericht. http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/19W3027A_-_Abschlussbericht.pdf (2007). Zugegriffen: 05. Apr. 2016

Borg, A., Bauer, M.: TIGER-Kommunikationskonzept Tiefe Geothermie. Springer Spektrum, Wiesbaden (2017)

Bostrom, A., Morgan, M. G., Fischho, B., Read, D.: What do people know about climate change? 1. Mental Models. Risk Anal. **14**(6), 959–970 (1994)

Bosch, S., Peyke, G.: Gegenwind für die Erneuerbaren – Räumliche Neuorientierung der Wind-, Solar- und Bioenergie vor dem Hintergrund einer verringerten Akzeptanz sowie zunehmender Flächennutzungskonflikte im ländlichen Raum. Raumforsch. Raumordn. **69**(2), 105–118 (2011)

Bundesverband Wärmepumpe e.V.: Talking cards. https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/erdwaerme/argumente-fuer-erdwaerme/ Zugegriffen: 04. Apr. 2016

Butenweg, J., Kramer, B.: Herrenknecht zu Staufen „Da waren Nichtkönner am Werk“. BZ-Interview 18.11.2014. Badische Zeitung Online . http://www.badische-zeitung.de/wirtschaft-3/

herrenknecht-zu-staufen-da-waren-nichtkoenner-am-werk–94844978.html (2014). Zugegriffen: 04. Apr. 2016
Cataldi, R.: Social acceptance of geothermal projects: problems and costs. Proc. European Summer School on Geothermal Energy Applications. Oradea/RO, 343–351 (2001)
Davis, F. D.: Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Q. **13**(3), 319–340 (1989)
de Chazal J., Quétier F., Lavorel S., Van Doorn A.: Including multiple differing stakeholder values into vulnerability assessments of socio-ecological systems. Glob. Environ. Change **18**(3), 508–520 (2008)
Devine-Wright, P.: Beyond NIMBYism: Towards an integrated framework for understanding public perceptions of wind energy. Wind energy **8**(2), 125–139 (2005)
Devine-Wright, P., Batel, S.: Explaining public preferences for high voltage pylon designs: An empirical study of perceived fit in a rural landscape. Land Use Policy **31**, 640–649 (2013)
Digmayer, C., Trevisan, B., Jakobs, E.-M.: Medusa and Pandora meet the Web 2.0: How Risk Types influence the Communication in Social Media. In: Proceedings of the ProComm 2015, 12.-15.07.2015, Limerick (IRL): 171–178 (2015)
Ditges, F., Höbel, P., Hofmann, T: Krisenkommunikation. UKV Verlagsgesellschaft, Konstanz (2008)
Dowd, A.-M., Boughen, N., Ashworth, P., Carr-Cornish, S.: Geothermal technology in Australia: Investigating social acceptance. Energy Policy **39**(10), 6301–6307 (2011)
Emmann, C. H., Arens, L., Theuvsen, L.: Individual acceptance of the biogas innovation: A structural equation model. Energy Policy **62**, 372–378 (2013)
Firestone, J., Kempton, W., Krueger, A.: Public acceptance of offshore wind power projects in the USA. Wind Energy **12**(2), 183–202 (2009)
Flynn, J., Slovic, P., Mertz, C. K.: Gender, race, and perception of environmental health risks. Risk Anal., **14**(6), 1101–1108 (1994)
Forsa: Umfrage zum Thema „Erneuerbare Energien“ 2009. Studie im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin. https://www.unendlich-viel-energie.de/presse/nachrichtenarchiv/2009/forsa-umfrage-mehrheit-der-bundesbuerger-ist-fuer-ausbau-erneuerbarer-energien-bei-unverminderter-foerderung (2009). Zugegriffen: 19. Nov. 2017
Goldschmidt, R., Scheel, O., Renn, O.: 2012: Zur Wirkung und Effektivität von Dialog- und Beteiligungsformaten. Stuttgarter Beiträge zur Risiko- und Nachhaltigkeitsforschung, Nr. 23. Universität Stuttgart. http://www.dialogik-expert.de/de/forschung/forschungsberichte.pdf (2008). Zugegriffen: 31. März 2015
Goldschmidt, R., Scheel, O., Renn, O.: Zur Wirkung und Effektivität von Dialog- und Beteiligungsformaten. Stuttgarter Beiträge zur Risiko- und Nachhaltigkeitsforschung, Nr. 23. Universität Stuttgart (2012)
Groothuis, P. A., Groothuis, J. D., Whitehead, J. C.: Green vs. green: Measuring the compensation required to site electrical generation windmills in a viewshed. Energy Policy **36**(4), 1545–1550 (2008)
Herrmann, V., Herrmann, R. A.: Geotechnische Risiken bei der Herstellung von Erdwärmesonden-Bohrungen: Lösungen durch „Geothermische Kategorien“? 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, München (2013)
Hübner, G., Hahn, Chr.: Akzeptanz des Stromnetzausbaus in Schleswig-Holstein. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Halle. http://www.buergerdialog-stromnetz.de/sites/default/files/mediathek/hubner_hahn_bericht_2013.pdf (2013). Zugegriffen: 31. März 2015
Hübner, G., Pohl, J.: Akzeptanz der Offshore-Windenergienutzung. Abschlussbericht. Forschungsinitiative „Research at alpha ventus“ (RAVE). Halle. http://klima.today/wp-content/uploads/2014/11/Projektbericht_offshore.pdf (2014). Zugegriffen: 31. März 2015

Huijts, N. M. A., Molin, E. J. E., Steg, L.: Psychological factors influencing sustainable energy technology acceptance: A review-based comprehensive framework. J. Renew. Sustain. Energy **16**(1), 525–531 (2012)

Jakobs, E.-M., Mauelshagen, Chr.: Information Strategies for DC Technologies. Abschlussbericht zum FEN Projekt. RWTH Aachen University (2015)

Joffe, H.: Risk: From perception to social representation. Br. J. Soc. Psychol. **42**(1), 55–73 (2003)

Kluge, J., Kowalewski, S., Ziefle, M.: Inside the user's mind – Perception of risks and benefits of unknown technologies, exemplified by geothermal energy. In: V.G. Duffy (Hrsg.) DHM 2015, Part I, LNCS 9184, S. 324–334. Springer International Publishing, Switzerland (2015)

Kluge, J., Ziefle, M.: As Simple as possible and as complex as necessary. In: Nah, FH., Tan, CH. (Hrsg.) HCI in Business, Government, and Organizations: Information Systems. S. 171–182. Springer, Cham. (2016, July). http://doi.org/10.1007/978-3-319-39399-5_17

Kowalewski, S., Arning, K., Minwegen, A., Ziefle, M., Ascheid, G.: Extending the engineering trade-off analysis by integrating user preferences in conjoint analysis. Expert Syst. Appl. **40**(8), 2947–2955 (2013)

Kowalewski, S., Borg, A., Kluge, J., Himmel, S., Trevisan, B., Eraßme, D., Ziefle, M., Jakobs, E.-M.: Modelling the influence of human factors on the perception of renewable energies. Taking geothermics as an example. In B. Amala, B. Dalgetty (Hrsg.) Advances in Human Factors, Software and System Engineering S. 155–162. AHFE Conference (2014)

Kraeusel, J., Möst, D.: Carbon Capture and Storage on its way to large-scale deployment: Social acceptance and willingness to pay in Germany. Energy Policy **49**, 642–651 (2012)

Kubota, H., Hondo, H., Hienuki, S., Kaieda, H.: Determining barriers to developing geothermal power generation in Japan: Societal acceptance by stakeholders involved in hot springs. Energy Policy **61**, 1079–1087 (2013)

Leiserowitz, A.: Communicating the risks of global warming: American risk perceptions, affective images, and interpretive communities. In: Moser, D. (Hrsg.) Creating a Climate for Change: Communicating Climate Change And Facilitating Social Change. Cambridge University Press, S. 44–63 (2007)

Leucht, M.: Soziale Akzeptanz von Tiefer Geothermie in Deutschland – Das Meinungsbild in den Printmedien. bbr Sonderheft 2010, 42–49 (2010)

Lubbadeh, J.: Nach Erdwärme-Bohrung: Eine Stadt zerreißt. Spiegel Online Wissenschaft. http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/nach-erdwaerme-bohrung-eine-stadt-zerreisst-a-589944.html (2008). Zugegriffen: 05. Apr. 2016

Popovski, K.: Political and public acceptance of geothermal energy. IGC2003 – Short Course. Geothermal training programme. Iceland, The United Nations University. http://www.os.is/gogn/ytja/JHS-Skjol/IGC2003ShortCourse/03Popovski.pdf (2003). Zugegriffen: 19. Nov. 2017

Renn, O.: An ethical appraisal of hormesis: Toward a rational discourse on the acceptability of risks and benefits. Am. J. Pharmacol. Toxicol. **3**(1), 168–184 (2008a)

Renn, O.: Risk Communication: Insights and Requirements for Designing Successful Communication Programs on Health and Environmental Hazards. In: Heath, R. L., O'Hair, D. (Hrsg.) Handbook of Risk and Crisis Communication, S. 80-98. Taylor and Francis, London (2008b)

Renn, O.: The social amplification/attenuation of risk framework: Application to climate change, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change **1**(1), (2011)

Renn, O. (Hrsg.): Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschafen e. V., München (2015)

Reimer, E., Jakobs, E.-M., Borg, A., Trevisan, B.: New Ways to Develop Professional Communication Concepts. In: Proceedings of the ProComm 2015, 12.–15.07.2015, Limerick (IRL): 97–103 (2015)

Ruddad, M., Sautter, A., Renn, O., Pfenning, U., Ulmer, F.: Abschlussbericht zum Forschungsbericht „Untersuchung der Kenntnis und Wirkung von Informationsmaßnahmen im Bereich Mobilfunk

und Ermittlung weiterer Ansatzpunkte zur Verbesserung der Information verschiedener Bevölkerungsgruppen.“ http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/risikokommunikation/risikokommunikation_abges/risiko_035_AB.pdf (2005). Zugegriffen: 31. März 2015

Sellke, P., Renn, O.: risk governance of pervasive computing technologies. Int. J. Technol. Knowl. Soc. **4**(1), 215–224 (2008)

Sengers, F., Raven, R. P., Van Venrooij, A. H. T. M.: From riches to rags: Biofuels, media discourses, and resistance to sustainable energy technologies. Energy Policy **38**(9), 5013–5027 (2010)

Schively, C.: Understanding the NIMBY and LULU Phenomena: Reassessing our knowledge base and informing future research. J. Plan. Lit. **21**(3), 255–266 (2007)

Slovic, P., MacGregor, D., Peters, E.: Imagery, Affect, and Decision Making (SSRN Scholarly Paper No. ID 1589800). Social Science Research Network, Rochester, NY (2003)

Siegrist, M.: The influence of trust and perceptions of risks and benefits on the acceptance of gene technology. Risk Anal. **20**(2), 195–204 (2000)

Sovacool, B. K., Lakshmi Ratan, P.: Conceptualizing the acceptance of wind and solar electricity. Renewable and Sustainable Energy Rev **16**(7), 5268–5279 (2012)

Trevisan, B., Eraßme, D., Hemig, T., Kowalewski, S., Kluge, J., Himmel, S., Borg, A., Jakobs, E.-M., Ziefle, M.: Facebook as a source for human-centred engineering. Web Mining-based reconstruction of stakeholder perspectives on energy systems. In: Proceedings of the 1st International IBM Symposium on Human Factors, Software, and Systems Engineering (AHFE 2014), 19.–23.07.2014, Krakau (PL), 180–191 (2014)

Trevisan, B., Eraßme, D., Jakobs, E. M.: Web Comment-based Trend Analysis on Deep Geothermal Energy, Proceedings of the IPCC (IEEE), 15.–17.07.2013, Vancouver (CA) (2013)

Trevisan, B., Digmayer, C., Reimer, E., Jakobs, E.-M.: Communication of new energy forms: Ways to identify topics and stakeholders. In: Proceedings of the ProComm 2015, 12.–15.07.2015, Limerick (IRL) 163–170 (2015)

Trevisan, B., Jakobs, E.-M.: Linguistisches Text Mining. In: Keller, B. Klein, H.-W.,Tuschl, S. (Hrsg.): Zukunft der Marktforschung. Entwicklungschancen in Zeiten von Social Media und Big Data. S. 167–185. Springer Gabler, Heidelberg (2015)

Wallquist, L., Holenstein, M.: Engaging the public on geothermal energy. In: Proceedings World Geothermal Congress, 2015, Melbourne (2015)

Wiedemann, P. M.: Gesellschaftliche Akzeptanz von Geothermie: Was sollte und was kann Risikokommunikation dazu beitragen? Vortrag anlässlich der IGC in Freiburg, 16. März 2013. (2013)

Wirtz-Brückner, S., Jakobs, E.-M., Kowalewski, S., Kluge, J., Ziefle, M.: The Potential of Facebook for Communicating Complex Technologies using the example of Deep Geothermal Energy. In: Proceedings of the IEEE International Professional Kommunikation Conference (ProComm'15) (2015)

Würtele, M., Sprinke, P., Eugster, W.: GeoVerSi Geothermie sorgt für Verkehrssicherheit. Studie. http://www.geoversi.nrw.de/Studie_Stand_16_06_2005.pdf (2005). Zugegriffen: 05. Apr. 2016

Wüstenhagen, R., Wolsink, M., Bürer, M. J.: Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. Energy policy **35**(5), 2683–2691 (2007)

Zaunbrecher, B. S., Kowalewski, S., Ziefle, M.: The Willingness to Adopt Technologies: A Cross-Sectional Study on the Influence of Technical Self-efficacy on Acceptance. In: Human-Computer Interaction. Applications and Services. S. 764–775 Springer International Publishing, Berlin (2014)

Zaunbrecher, B. S., Arning, K., Özalay, B., Natemeyer, H., Ziefle, M.: Pitfalls when Placing Electricity Pylons - The Influence of Age on Acceptance. In: Zhou, J., Salvendy, G. (Hrsg.), Human Aspects of IT for the Aged Population. Design for Aging, S. 282–293. Springer International Publishing, Berlin (2015)

Zaunbrecher, B., Arning, K., Falke, T., Ziefle, M.: No pipes in my backyard? Preferences for local district heating network design in Germany. Energy Res. Soc. Sci. **14**, 90–101 (2016a)

Zaunbrecher, B., Stieneker, M., De Doncker, R. W., Ziefle, M.: Does transmission technology influence acceptance of overhead power lines? An empirical study. 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (Smartgreens 2016) (2016b)

Zaunbrecher, B., Kluge, J., Ziefle, M.: Exploring mental models of geothermal energy among laypeople in Germany as hidden drivers for acceptance. 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, in press. (2016c)

Arbeits- und Gesundheitsschutz

24

Mathias Bauer

Inhaltsverzeichnis

24.1 Vorbemerkungen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz 716
24.2 Gründe/Argumente für Arbeits- und Gesundheitsschutz 719
24.3 Grundlagen der Arbeits- und Sicherheitswissenschaft 720
24.4 Arbeits- und Gesundheitsschutzrecht 723
24.5 Gefährdungen und Belastungen bei Oberflächennaher Geothermie 731
24.6 Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagementsystem 735
Literatur 737

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird in den ersten drei Abschnitten auf allgemeine Grundlagen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz eingegangen, die gleichermaßen in allen Bereichen, wo Menschen arbeiten, Geltung haben. In drei weiteren Abschnitten wird dann auf den Bereich Oberflächennahe Geothermie fokussiert.

Der Verpflichtung zu Arbeits- und Gesundheitsschutz können sich kein Unternehmer, keine Führungskraft und kein Mitarbeiter entziehen. Dabei muss gesetzlich vorgeschriebener Arbeits- und Gesundheitsschutz nur dort in Form von Schutzmaßnahmen stattfinden, wo legal „bezahlte“ Arbeit stattfindet. Dagegen wird in vielen Unternehmen heute über die Mindestvorschriften hinaus etwas getan zur Vermeidung oder zumindest zur Verminderung von Verletzungen infolge von Arbeits- und Wegeunfällen mit oftmals einhergehenden Sachschäden, anerkannten und entschädigungspflichtigen Berufskrankheiten, eingeschränkter Leistungsfähigkeit bzw. befristetem Arbeitsausfall der Beschäftigten durch arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren.

Mathias Bauer (✉)
Institut of Mineral Resources Engineering (MRE), Lehr- und Forschungsgebiet Arbeits- und Gesundheitsschutz, RWTH Aachen University, Wüllnerstraße 2, 52062 Aachen
e-mail: lehrbeauftragte@bbk1.rwth-aachen.de

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_24

Dies trifft leider nicht auf die Masse der kleinen und mittleren Unternehmen zu, sodass diese nach wie vor ein deutlich erhöhtes Unfallrisiko in Form von vielfach erhöhten Unfallzahlen gegenüber Großunternehmen ausweisen. Dabei zeigt die Erfahrung, dass in die Produktion integrierter Arbeits- und Gesundheitsschutz bei richtiger Vorgehensweise Wertschöpfung und damit Wettbewerbssteigerung zur Folge hat. Es geht damit über die Erfüllung der moralischen, sozialen und gesetzlichen Verpflichtung zur menschengerechten Gestaltung von Arbeit hinaus bis zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit sowie einer Förderung des internen und externen Images des Unternehmens.

Arbeits- und Gesundheitsschutz ist insofern bei Oberflächennaher Geothermie nichts „Besonderes", hat aber gerade in der Bauphase durch Beteiligung von kleineren und mittleren Unternehmen – nicht selten noch durch Unterstützung bzw. Erbringung gewisser Eigenleistungen durch den privaten Bauherrn selbst – seine Besonderheiten, auf die entsprechend zu achten ist.

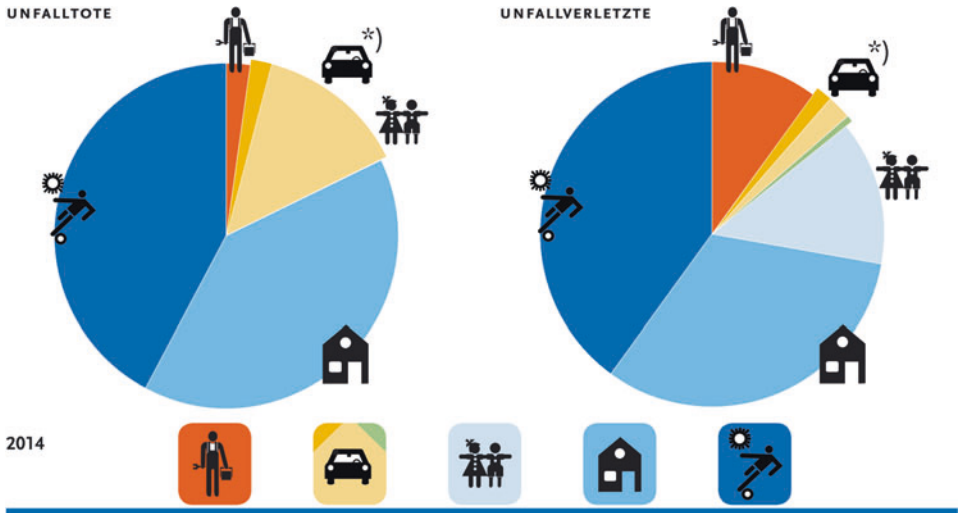
Schlüsselwörter
Arbeitssicherheit · Arbeitsschutz · Gesundheitsschutz · Gefährdung · Gesundheitsschutzmanagement

24.1 Vorbemerkungen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz

Sicherheit ist ein Begriff von komplexer Bedeutung und ermöglicht gerade wegen dieser Unschärfe eine starke Identifizierung und Bündelung von Meinungsgleichheit, denn wer könnte schon gegen Sicherheit in jeder Form sein. Doch absolute Sicherheit gibt es nicht, weder im politischen noch im alltäglichen Raum und eben auch nicht im Verhalten der Menschen untereinander – privat oder bei der Arbeit. Dabei gerät das damit verbleibende Risiko, das heißt die Möglichkeit des Eintretens eines Schadensfalles gleich welcher Art, Häufigkeit und Schwere, oft in den Bereich des nicht ständig Wahrgenommenen, in den Bereich des latenten Vorhandenseins.

Erst akute Ereignisse, wie die radioaktive Verseuchung durch den Reaktorunfall in Fukushima im März 2011, ein Flugzeugabsturz oder ein Autounfall eines Menschen aus dem nächsten Bekanntenkreis lassen das stets vorhandene Risiko bewusst werden. Diese Beispiele zeigen, Sicherheit betrifft viele Bereiche, beispielsweise Politik, Freizeit, Arbeitsplatz und Umwelt. Dabei ist es gerade in den Bereichen Straßenverkehr und berufliche Arbeitswelt seit vielen Jahren gelungen, die Anzahl der Ereignisse von Jahr zu Jahr zu verringern, während hingegen im Freizeit- und Privatbereich seit Jahren die Zahlen steigen: ein Trend, der seit vielen Jahren anhält. Eine Momentaufnahme für 2014 zeigt die Bundesstatistik in Abb. 24.1.

Unter Beachtung von Verweildauer, Teilnehmerzahl und Gefährdungsvielfalt ist demnach der Arbeitsplatz im Vergleich zum Straßenverkehr, zum Hausbereich und zur



Unfallkategorie	Arbeit	Verkehr*)	Schule	Hausbereich	Freizeit	Gesamt
Tödliche Unfälle	506	3.581	9	9.044	9.577	22.717
Unfallverletzte	1,00 Mio.	0,39 Mio.	1,34 Mio.[3]	3,15 Mio.	3,89 Mio.	9,77 Mio.

Abb. 24.1 Verteilung tödlicher Unfälle auf Lebensbereiche. (Quelle: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin)

Freizeitgestaltung als relativ sicherer Bereich zu werten. Gerade die stark steigenden Zahlen im häuslichen Bereich sind geprägt von vielfach sicherheitswidrigen privaten Arbeitstätigkeiten. Der stete Rückgang der Ereignisse in der Arbeitswelt zeugt u. a. von der hohen Dichte von arbeitssicherheitlichen Regelwerken, verbunden mit der unternehmerischen Fürsorgepflicht und der behördlichen Kontrolle. Dennoch bleibt auch am Arbeitsplatz eine gewisse Wahrscheinlichkeit einen Unfall zu erleiden, differenziert vom Risiko je nach Branche und vielfach je nach Größe des Unternehmens. Die Ziele und Schutzmaßnahmen für Arbeits- und Gesundheitsschutz der Menschen werden hierbei oftmals unter Begriffen wie Arbeitssicherheit, Arbeitsschutz, Betriebsschutz, Betriebssicherheit, Anlagensicherheit, Werksschutz und Verkehrssicherheit thematisiert.

Firmeninhaber, Betriebsleiter und weitere Führungskräfte haben hinsichtlich Arbeits- und Gesundheitsschutz oftmals folgende Fragen:

- Was ist zu tun?
- Wo steht das?
- Wer sagt das?
- Was kostet das?
- Was bringt das?

Arbeitssicherheit ist ein anzustrebender gefahrenfreier Zustand bei der Berufsausübung (Abb. 24.2, siehe ergänzende Beschreibung zu Begriffen in Bauer (1998)). Die auf den

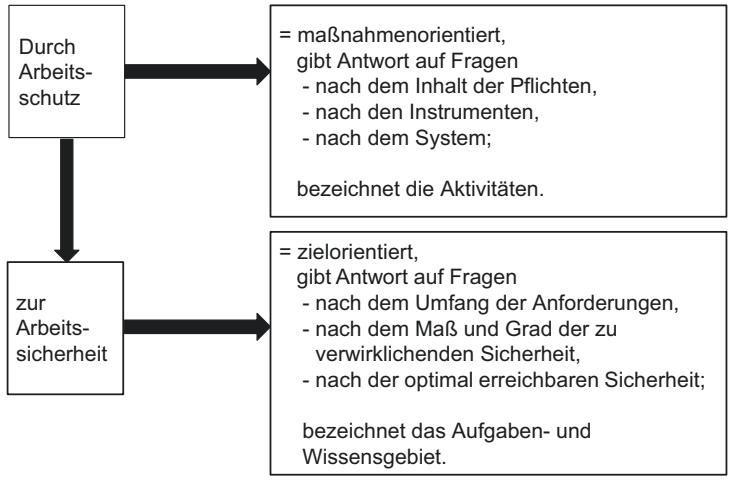


Abb. 24.2 Begriffliche Abgrenzung. (Bauer 1998)

Menschen bezogenen Auswirkungen von Gefährdungen und Belastungen sind Personenschäden als Folge von Verletzungen (Unfällen, neben den Arbeitsunfällen auch die Wegeunfälle, da in Deutschland der Bereich der Wegeunfälle versicherungsrechtlich den Arbeitsunfällen gleichgestellt ist), Berufskrankheiten und von sonstigen schädigenden Einflüssen auf seine Gesundheit.

Mit dem zunehmend an Bedeutung gewinnenden Begriff Gesundheitsschutz kommt hierbei den gesundheitsfördernden Maßnahmen eine steigende Bedeutung zu. Gesundheit bedeutet mehr als die Abwesenheit von Krankheit. Sie schließt körperliches und seelisches Wohlbefinden – einschließlich der Befähigung und Bereitschaft, ein wirtschaftlich und sozial aktives Leben zu führen – mit ein.

Die Arbeitswelt unterliegt einem rasanten Wandel. Dadurch verändern sich fortlaufend die Arbeitsbedingungen und die Anforderungen an die Beschäftigten. Diese Veränderungen bringen immer wieder neuartige und veränderte Gefährdungen und Belastungen für die Beschäftigten mit sich. Als Beispiel sind neben den „klassischen" physischen, chemischen und biologischen Gefährdungsfaktoren die psychischen Belastungen zu nennen, die sich in den letzten Jahren in einem deutlichen Anstieg der Erkrankungen mit psychosomatischen Ursachen äußern. Arbeits- und Gesundheitsschutz darf von daher nicht nur gleichgesetzt werden mit akuten Ereignissen und damit mit dem Unfallgeschehen. Nicht zuletzt wegen der steigenden wirtschaftlichen Bedeutung von Schäden mit latentem Ursachencharakter, d. h. vor allem von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Berufskrankheiten, hat sich in der Europäischen Union von daher als Begriffspaar „Sicherheit und Gesundheitsschutz" (*safety and health*) durchgesetzt. In Deutschland ist vielfach von dem Ziel Arbeit sicher zu gestalten (Arbeitssicherheit) die Rede, was durch konkrete Schutzmaßnahmen mit Arbeits- und Gesundheitsschutz umschrieben wird.

24.2 Gründe/Argumente für Arbeits- und Gesundheitsschutz

Der Verpflichtung zu Arbeits- und Gesundheitsschutz können sich kein Unternehmer, keine Führungskraft und kein Mitarbeiter entziehen. Die Gründe zum Handeln sind unterschiedlicher Art, so ist Arbeits- und Gesundheitsschutz (Bauer und Engeldinger 2004):

- humanitäres Anliegen, weil es Pflicht aus moralischer/sozialer/ethischer Verantwortung ist, auf Sicherheit und Gesundheit der eigenen Person und der Mitarbeiter zu achten.
- rechtlicher Zwang, weil Vorschriften – die befolgt werden müssen – die Sicherheit am Arbeitsplatz und sichere Verhaltensweisen zwingend vorschreiben und zur Rechtssicherheit aller Betroffenen beitragen.
- wirtschaftliche Notwendigkeit, weil Unfälle, Berufskrankheiten und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren neben dem persönlichen Leid für die Betroffenen mit vermeidbaren Kosten für den Betrieb verbunden sind.
- beeinflussend auf das Image, weil die Öffentlichkeit zunehmend Interesse zeigt, welches Unternehmen hinter welchem Produkt steht.

Folgende positive Auswirkungen sind für Betrieb, Führungskräfte und Mitarbeiter aufgrund von Schutzmaßnahmen für die Sicherheit und die Gesundheit der Beschäftigten zu nennen: Arbeits- und Gesundheitsschutz

- hilft rationalisieren, weil Schutzmaßnahmen Unfälle, Berufskrankheiten und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren verhüten und zugleich Störanfälligkeiten im Arbeitsablauf beseitigen und damit die Produktivität steigern.
- schafft transparente und gerichtsfeste Organisation, weil Unternehmer und Führungskräfte gesetzlich verpflichtet sind, auf klare Abgrenzung von Aufgaben und Kompetenzen und damit von Verantwortung sowie auf eindeutige Regelungen zu achten, was wiederum dem Arbeitsablauf zugute kommt.
- macht Verantwortung klar, weil gezieltes Führen in Arbeitssicherheit Führungstraining am praktischen Beispiel ist und sich dadurch Führungskräfte im Führungsverhalten für Produktion und Arbeitsablauf üben.
- verhindert Haftung und Sanktion, weil pflichtgemäßes Führungsverhalten verantwortungsbewusstes Handeln ist und den Vorwurf des fahrlässigen oder vorsätzlichen Handelns oder Unterlassens und somit rechtliche Nachteile für Vorgesetzte oder Betrieb ausschließt.
- stärkt Leistung und Qualität, weil Sicherheitsbewusstsein bei Führungskräften und Mitarbeitern das Arbeitssicherheitsniveau bzw. die Sicherheitskultur im Unternehmen bestimmt und damit zugleich das Arbeitsergebnis maßgeblich beeinflusst.

Die Ziele des Arbeits- und Gesundheitsschutzes gehen demnach heute weit über die Vermeidung oder zumindest die Verminderung von Verletzungen infolge von Arbeits- und Wegeunfällen mit oftmals einhergehenden Sachschäden, anerkannten und entschädigungspflichtigen Berufskrankheiten, Leistungsfähigkeit bzw. befristetem Arbeitsausfall der Beschäftigten durch arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren hinaus.

Die Erfahrung zeigt, dass in die Produktion integrierter Arbeits- und Gesundheitsschutz bei richtiger Vorgehensweise Wertschöpfung und damit Wettbewerbssteigerung zur Folge hat. Es geht damit über die Erfüllung der moralischen, sozialen und gesetzlichen Verpflichtung zur menschengerechten Gestaltung von Arbeit hinaus bis zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit sowie einer Förderung des internen und externen Images des Unternehmens (Bauer 2002a).

24.3 Grundlagen der Arbeits- und Sicherheitswissenschaft

Entscheidend für einen erfolgreichen Arbeits- und Gesundheitsschutz ist die ganzheitliche Betrachtung des Arbeitssystems. Die Einführung von Arbeits- und Gesundheitsschutz kann nur dann erfolgreich sein, wenn sie in ein umfassendes Konzept eingebunden ist, das den Einsatz und die Gestaltung von Technik die Gestaltung von Organisation und die Entwicklung von Mitarbeitern gemeinsam zu optimieren versucht. Die postulierte gegenseitige Abhängigkeit der Bereiche untereinander ist dabei zwingend vorausgesetzt, um ein optimales Zusammenwirken zu ermöglichen.

Der häufig genutzte TOP-Ansatz stellt eine einfache und anschauliche Darstellung aller Bereiche eines Unternehmens dar (Abb. 24.3). T steht für die genutzte Technik, O für die Organisation und P für Personal. In der neueren Literatur und in den Unternehmen

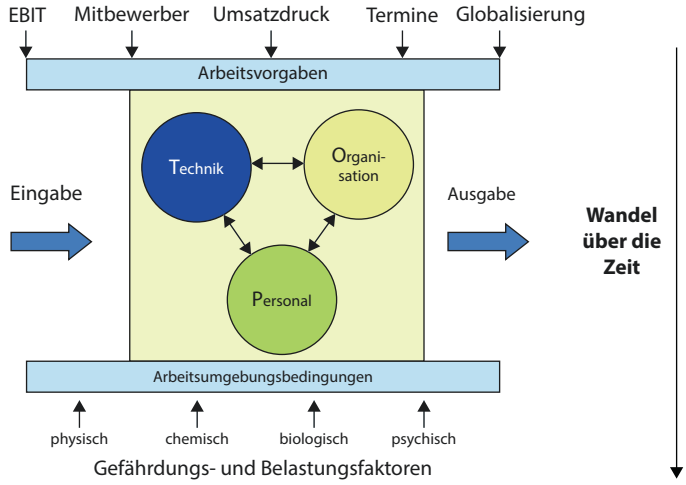


Abb. 24.3 Komplexes Arbeitssystem. (Geändert nach DGUV, Sifa-Ausbildung, Bauer 2002b)

wird in den letzten Jahren zunehmend auch von TOM statt von TOP gesprochen, also das P durch ein M für Mensch ersetzt. Diese Schreibweise zeigt die Entsachlichung des arbeitenden Menschen in der Betrachtung von Unternehmen und spiegelt die Anfänge des Paradigmenwechsels in den Arbeitswissenschaften vom technikzentrierten Standpunkt hin zur Humanisierung der Arbeitswelt wieder. Nach modernem Verständnis von Arbeits- und Gesundheitsschutz steht klar der arbeitende Mensch in seiner Wechselwirkung zur Technik und zur Organisation im Mittelpunkt der Betrachtung.

In Abb. 24.4 sind die zu den übergeordneten Bereichen Organisation, Mensch, Technik zählenden einzelnen Faktoren präzisiert.

In der Betrachtungsweise des Arbeits- und Gesundheitsschutzes nach TOM sind in allen drei Bereichen und deren Unterpunkten die jeweils potenziellen Ressourcen, Gefährdungen und Belastungen zu erfassen und zu beurteilen. Neben dem Schwerpunkt auf den Ressourcen und Gefährdungen im technischen Bereich sind zur Festlegung von Schutzmaßnahmen im Betrieb vor dem Hintergrund der ganzheitlichen, systemischen Betrachtungsweise auch die Aspekte im organisatorischen und personellen Bereich zu erfassen und zu beurteilen:

- Die *Technik*, also die Arbeitsbedingungen bezogen auf Arbeitsumgebungsfaktoren (Lärm, Temperatur etc.) und die Arbeitsmittel, also die Maschinen, Geräte, Möbel, Arbeitsstoffe usw. inkl. der Ergonomie.
- Die *Organisation*, also die Aufbauorganisation bezogen auf Hierarchien und die damit verbundenen Befugnisse und Zuständigkeiten, die Ablauforganisation bezogen auf Prozessgestaltung und die Informations- und Kommunikationsstrukturen sowie die Gestaltung von Arbeitstätigkeiten und -aufgaben.
- Die *Menschen*, also das soziale Gefüge im Betrieb bezogen auf das Verhältnis der Mitarbeiter untereinander und das Mitarbeiter-Vorgesetzten-Verhältnis (Unterstützung, Partizipation), sowie auf die Individuen bezüglich ihrer fachlichen Qualifikation, ihrer Fähigkeiten und individuellen Ressourcen.

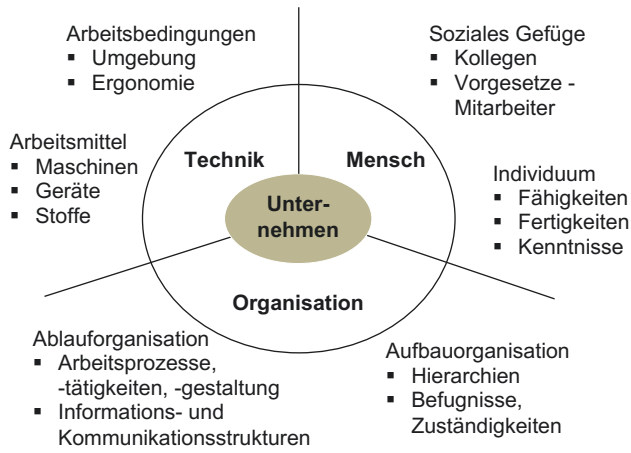


Abb. 24.4 Das erweiterte TOM-Modell. (Borg et al. 2012)

Unter der salutogenetischen Leitfrage „*Was erhält Betriebe sicher, produktiv und gesund?*“ wird von daher hier empfohlen, sich bewusst von der in den Betrieben überwiegend angewandten defizitorientierten Betrachtungsweise abzuwenden, die lediglich durch das Aufzeigen von Fehlern und Mängeln versucht, Verbesserungen einzuführen. Um eine prospektive und die Annäherung an Arbeits- und Gesundheitsschutz erleichternde Sicht für alle Beteiligten zu erreichen, ist es besser, sich nicht nur direkt auf Mängel, sondern auch auf die Ressourcen in allen Bereichen des oben beschriebenen Arbeitssystems zu konzentrieren. Zur Vermeidung eines Ereignisses bzw. zur Verbesserung der Gegebenheiten ist dabei das „Verursachungsmodell“ dienlich (Abb. 24.5).

Erst das zeitliche und räumliche Zusammentreffen von Mensch und Gefahren lassen den Zustand der Gefährdung und damit auch der Belastungen sowie daraus folgernd von Beanspruchungen entstehen. Zum Ereignis kann es aber erst bei gleichzeitiger Verknüpfung mit vorliegenden Mängeln kommen. Die Wahrscheinlichkeit, mit der mit dem Eintreten eines Ereignisses zu rechnen ist, wird mit dem Risiko (als Wahrscheinlichkeit des Eintretens differenziert nach Häufigkeit und Schwere, gemäß DIN ISO 31000) beschrieben. Dabei gilt für den Unternehmer das Gebot der Risikominimierung (Abb. 24.6).

Demnach besteht die unternehmerische Pflicht eines Anlagenbauers bzw. -betreibers darin, soviel relative Sicherheit zu garantieren, dass im Maximum die Gefahrenschwelle (und damit Risiko 2) nicht überschritten wird. Das heute hierzu im Betrieb anzuwendende Hauptarbeitsinstrument zur Feststellung, wo man sich auf dem Kontinuum befindet, um dann über ggf. notwendige Schutzmaßnahmen entscheiden zu können, nennt man die Gefährdungs- und Belastungsbeurteilung (GB) bzw. im Bergbau das Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument (SGD), auf die im Folgenden noch eingegangen wird.

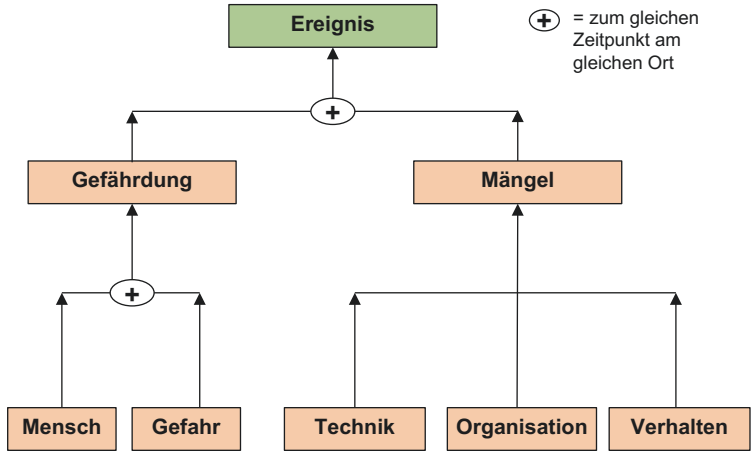


Abb. 24.5 Das Verursachungsmodell

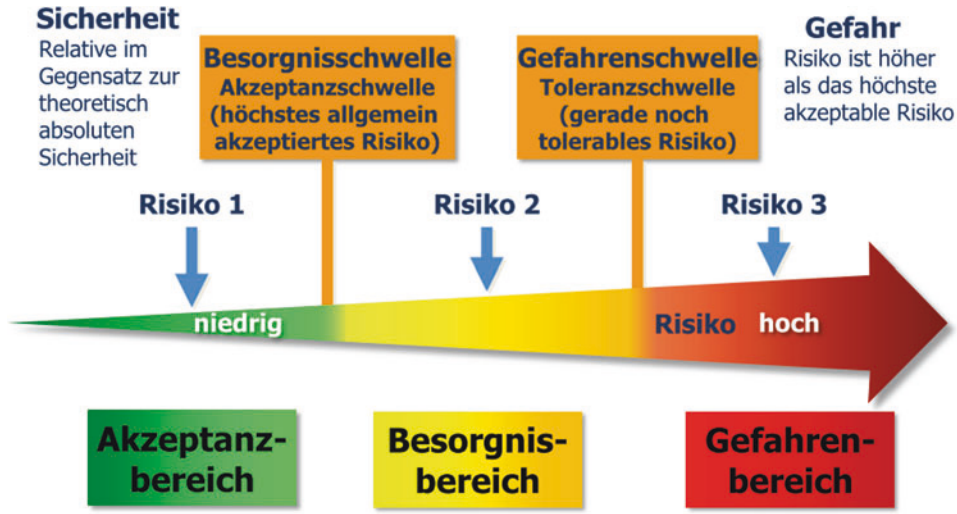


Abb. 24.6 Modell zur Risikoverminderung (nach DGUV, Sifa-Ausbildung, geändert Bauer und Neu (2016))

24.4 Arbeits- und Gesundheitsschutzrecht

Für die Planung, den Bau, den Betrieb und den späteren Rückbau von Oberflächennahen Geothermieanlagen tritt insofern eine Besonderheit auf, als neben der jeweiligen Landesbehörde für Arbeitsschutz („Gewerbeaufsichtsamt“) mit dem gewerblichen Arbeitsschutzrecht bei Bohrungen >100 m Tiefe die Bergbehörde mit dem speziellen Bergrecht greift, unabhängig der Frage, ob die Anlage zur Erdwärmenutzung auf einem Privatgrundstück oder zur gewerblichen Nutzung gebaut wird (s. Kap. 9). Lediglich entfällt bei grundstücksbezogener privater Nutzung für den Eigenverbrauch die ansonsten erforderliche Bergbauberechtigung, da Erdwärme als bergfreier Bodenschatz in Deutschland festgelegt ist. Bei gewerblicher Nutzung ist eine Bergbauberechtigung erforderlich. Das bringt zumindest in der Planungs- und Bauphase eine größere Herausforderung und vermehrten Arbeitsaufwand durch zum Teil auch parallele Genehmigungsverfahren. Damit ist Arbeits- und Gesundheitsschutz bei Oberflächennaher Geothermie nichts „Besonderes“, hat aber seine Besonderheiten, auf die entsprechend zu achten ist.

Arbeit in jeglicher Form ohne Gefahren und Belastungen für den arbeitenden Menschen gab und gibt es nicht. Gerade im Bereich der Rohstoff gewinnenden und verarbeitenden Industrie wurden dabei die Berufsbilder in der Vergangenheit als „schwere“ Berufe bezeichnet, wobei unter „schwer“ ein relativ hohes Risiko für Sicherheit und Gesundheit des Arbeitnehmers verstanden wurde. Die Beschreibungen von Unfällen und durch die Arbeit verursachten Krankheiten und erste Vorschläge zu entsprechenden Schutzmaßnahmen – festgehalten in ersten Rechtsvorschriften – gab es bevorzugt im Bergbau bereits seit dem Mittelalter.

Der Schwerpunkt der Rechtsregelwerke lag in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts in der Durchführung von technischen Schutzmaßnahmen, was nicht zuletzt bis heute in der Begrifflichkeit „sicherheitstechnische Betreuung“ und in der Forderung nach „technischer“ Ausbildung (Meister, Techniker, Ingenieur) bei den einzusetzenden Fachkräften für Arbeitssicherheit ersichtlich ist. Mit Abarbeitung der sicherheitstechnischen Defizite in den Betrieben und mit zunehmender Bedeutung des Verhaltens der Beschäftigten als Hauptursache neben organisatorischen Mängeln an dem Unfallgeschehen treten neue Aufgaben in den Vordergrund, sodass auch zwischenzeitlich vorgenommene Änderungen der gesetzlichen Regelwerke diesem Trend weg von korrektivem Vorgehen hin zu einem präventiven Arbeitsansatz Rechnung tragen.

Diese historisch begründete erhöhte Bedeutung der Unfallverhütung und im weiteren Sinne auch der Betriebssicherheit zeigt sich beispielsweise auch heute noch im Bergrecht. In keinem der Rechtsregelwerke wird dort der Begriff der Belastung verwendet, vielmehr sind es ausschließlich die Begriffe Gefahr und Gefährdung. Dies belegt den aus früherer Zeit stammenden dominanten Einfluss der akut gegenüber den latent auf den Menschen einwirkenden Schädigungspotenziale. Siehe hierzu zu einzelnen Gefährdungsfaktoren weitere Ausführungen in den angegebenen Literaturstellen (Bauer und Engeldinger 1993; Bauer 1993b, 1994, 1996; Levin et al. 1994; Homberg und Bauer 1995).

Wie oben angeführt können insbesondere die Herstellung des Bohr- und Betriebsplatzes, die Errichtung des Bohrgerüsts, die Niederbringung der Bohrungen und die Bohrlochtests unter das Bergrecht fallen (s. Kap. 9 und Tschauder 2014; Bauer et al. 2014). Eine weitere Besonderheit – insbesondere bei Erstellung von Erdwärmeanlagen im privaten Sektor – ist das oftmals gemeinsame Wirken von Firmen und zugleich von privater Eigenleistung durch den Bauherrn, was nicht ohne Auswirkung auf das Risiko bleibt. Während die privaten Aktivitäten des Bauherrn ohne rechtliche Vorgaben – was den Arbeits- und Gesundheitsschutz anbelangt – laufen, so wird die den Arbeitsschutz betreffende Aufgabenstellung für den Unternehmer im Falle der Anwendung des Bergrechts sehr treffend formuliert durch § 2 Allgemeine Pflichten der Allgemeinen Bundesbergverordnung (ABBergV 1996):

> (1) Zur Gewährleistung der Sicherheit und zum Schutz der Gesundheit der Beschäftigten hat der Unternehmer die jeweils erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der die Arbeit berührenden Umstände zu treffen. Die Maßnahmen müssen darauf ausgerichtet sein, dass
>
> 1. die Arbeitsstätten so geplant, errichtet, ausgestattet, in Betrieb genommen, betrieben und unterhalten werden, dass die Beschäftigten die ihnen übertragenen Arbeiten ausführen können, ohne ihre eigene Sicherheit und Gesundheit oder die der anderen Beschäftigten zu gefährden;
> 2. Arbeitsstätten, die mit Beschäftigten belegt sind, der Beaufsichtigung durch eine verantwortliche Person unterliegen;
> 3. die mit einem besonderen Risiko verbundenen Arbeiten nur fachkundigen Beschäftigten übertragen und entsprechend den Anweisungen ausgeführt werden;
> 4. alle zu erteilenden Sicherheitsanweisungen für alle Beschäftigtengruppen geeignet und verständlich sind;

5. angemessene Einrichtungen zur Leistung von Erster Hilfe bereitstehen;
6. die erforderlichen Sicherheitsübungen in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt werden.

Ergänzt wird die ABBergV durch weitere Regelwerke (z. B. Gesundheitsschutzbergverordnung und Tiefbohrverordnung, Bauer und Engeldinger 1993; Bauer 1993a), wobei der Vorteil im Bergrecht neben einer relativ überschaubaren Anzahl von Regelwerken gegenüber dem Gewerberecht zudem in dem sogenannten Betriebsplanverfahren besteht. D. h. ein Großteil der erforderlichen Schutzmaßnahmen wird explizit durch die zuständige landesspezifische Bergbehörde in den jeweiligen Betriebsplänen (u. a. Rahmenbetriebsplan, Sonderbetriebsplan) eingefordert.

Im gewerblichen Bereich wird das heutige Arbeitsschutzrecht stark durch die Einflussnahme der Europäischen Union geprägt. Die europäischen Staaten haben sich im Laufe der Zeit von einer überwiegend ökonomisch ausgerichteten Interessengemeinschaft zu Beginn der 50er Jahre hin zu einer politischen Gemeinschaft entwickelt. Hierbei zählt im Kernbereich europäischer Sozialpolitik der Arbeitsschutz dazu. Bereits der Amsterdamer Vertrag von 1997 und sein Vorgänger, der Maastrichter Vertrag von 1992, enthalten in den Artikeln 95 (früher 108 a) und Artikel 137 (118 a) diese Neuausrichtung für den Arbeitsschutz. Erhöhung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes von Beschäftigten bei der Arbeit ist das Ziel. Das in den letzten Jahren stark überarbeitete Arbeitsschutzrecht spiegelt dabei die Leitgedanken wieder:

- Deregulierung,
- Prävention,
- Stärkung der Eigenverantwortung des Unternehmers,
- Stärkung der Eigenverantwortung der Beschäftigten.

Wesentliche Basis ist das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG 1996), das – vergleichbar der ABBergV – in § 3 Grundpflichten des Arbeitgebers formuliert:

(1) Der Arbeitgeber ist verpflichtet, die erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der Umstände zu treffen, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten bei der Arbeit beeinflussen. Er hat die Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen und erforderlichenfalls sich ändernden Gegebenheiten anzupassen. Dabei hat er eine Verbesserung von Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten anzustreben.
(2) Zur Planung und Durchführung der Maßnahmen nach Absatz 1 hat der Arbeitgeber unter Berücksichtigung der Art der Tätigkeiten und der Zahl der Beschäftigten
1. für eine geeignete Organisation zu sorgen und die erforderlichen Mittel bereitzustellen sowie
2. Vorkehrungen zu treffen, dass die Maßnahmen erforderlichenfalls bei allen Tätigkeiten und eingebunden in die betrieblichen Führungsstrukturen beachtet werden und die Beschäftigten ihren Mitwirkungspflichten nachkommen können.
(3) Kosten für Maßnahmen nach diesem Gesetz darf der Arbeitgeber nicht den Beschäftigten auferlegen.

Ergänzend gelten umfangreich zu nennende weitere staatliche Regelwerke (z. B. das Produktsicherheitsgesetz und die ergänzenden Verordnungen, die Gefahrstoffverordnung, die Baustellenverordnung, die Arbeitsstättenverordnung, die Betriebssicherheitsverordnung, ggf. auch die Strahlenschutzverordnung etc.), die spezielle Themenbereiche von Arbeits- und Gesundheitsschutz mit Schutzmaßnahmen bewehren (Bauer 2008).

Durch das sogenannte „Duale Arbeitsschutzrecht“ in Deutschland kommen noch ergänzend Vorgaben aus dem Bereich der zuständigen Berufsgenossenschaften, die allerdings im Rahmen der Neuordnung des Arbeitsschutzrechtsystems seit Jahren in der Bedeutung abnehmen – durch Aufhebung vieler bislang verbindlich geltenden Unfallverhütungsvorschriften und Ersatz vielfach entsprechender Technischer Regeln. Ergänzend einzuhalten sind noch die Vorgaben aus dem Bereich der privatrechtlichen Organisationen, die anerkannte Regeln der Technik und gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse festschreiben, insbesondere durch Normen.

In dem durch all diese Rechtsregelwerke geschaffenen Rechtsrahmen muss bzw. kann dann der Unternehmer selbst noch geltendes autonomes Recht für den Betrieb festlegen, z. B. in Form von Betriebsanweisungen, und dabei auch über Mindestvorschriften hinausgehen. Einen Überblick über das zutreffende Regelwerk mit entsprechenden Regelungsbeispielen zeigt Tab. 24.1.

Sowohl das Arbeitsschutzgesetz als auch das Bundesberggesetz sowie die ergänzenden Regelwerke schreiben hierbei für jeden Betrieb eine Arbeitssicherheitsorganisation verbindlich vor. Eine gut aufgebaute Arbeitssicherheitsorganisation bindet insofern jeden Menschen im Betrieb ein, siehe Abb. 24.7. Eine wesentliche Stütze für den Unternehmer in seiner Verantwortung für den Arbeits- und Gesundheitsschutz sind hierbei die Sicherheitsfachkraft und der Betriebsarzt, die beide – ohne Übernahme von Verantwortung – dem Leiter des Betriebes direkt unterstellt, diesen in der Wahrnehmung seiner Aufgaben und Befugnisse (= Verantwortung) beraten und unterstützen. Die zutreffenden Regelwerke, in denen die Organisation und die Aufgaben beschrieben sind, sind das Arbeitssicherheitsgesetz (ASiG) und die jeweilige berufsgenossenschaftsspezifische DGUV-Vorschrift 2. Die im Bergrecht ansonsten geltende Bergverordnung über den arbeitssicherheitlichen und betriebsärztlichen Dienst (BVOASi) findet in Bereichen des Bergbaus für Geothermieanlagen keine Anwendung, da im § 1 Geltungsbereich grundsätzlich von dieser Verordnung „Bohrungen, die über 100 m in den Boden eindringen und nicht unter § 2 BbergG fallen und somit nicht zum Beispiel der Aufsuchung und Gewinnung von bergfreien und grundeigenen Bodenschätzen dienen“, ausgenommen sind. Hier gilt durchgehend die DGUV-Vorschrift 2 der jeweils zuständigen Berufsgenossenschaft.

Bei Vorhandensein mehrerer Firmen auf dem Betriebsgelände haben sowohl das ArbSchG als auch die ABBergV die Verantwortung eindeutig geregelt. Folgend die Formulierung der ABBergV in § 4 Zusammenarbeit der Unternehmer:

> (1) Werden Beschäftigte mehrerer Unternehmer zeitlich und örtlich gemeinsam in einem Betrieb tätig, so ist jeder Unternehmer für den Bereich verantwortlich, der seinem Weisungsrecht unterliegt. Die Unternehmer haben bei den zur Gewährleistung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes erforderlichen Maßnahmen zusammenzuarbeiten. Sie haben ihre

Tab. 24.1 Übersicht über das Regelwerk Arbeitsschutz mit Beispielen

Staat/Bergbehörde/Gewerbeaufsicht	Berufsgenossenschaft	Privatrechtliche Organisationen	Unternehmer
Grundsätzliches	**Grundsätzliches und Spezielles**	**Technische Details**	**Betriebsspezifisches**
Gesetz, z. B.: • Arbeitsschutzgesetz • Arbeitssicherheitsgesetz • Betriebsverfassungsgesetz • Chemikaliengesetz • Bundesberggesetz	Sozialgesetzbuch VII (SGB VII)	Allgemein anerkannte Regeln der Technik und gesicherte arbeitswissenschaft-liche Erkenntnisse, z. B.: • ISO-Normen • EU-Normen • DIN-Normen • VDE-Bestimmungen • VDI-Richtlinien • DVGW • GtV	Grundsätze, z. B.: • Grundsätze für Arbeitssicherheit • Betriebsanweisung, z. B.: • Maschinennutzung Lärmschutz Plan, z. B.: • Lärmmessplan • Vibrationsmessplan Empfehlungen, z. B.: • Achtsamkeit auf dem Weg zur Arbeit
Verordnungen, z. B.: • Gefahrstoffverordnung • Arbeitsstättenverordnung • Allgemeine Bundesbergverordnung	DGUV-Vorschriften (UVV), z. B.: Vorschrift 38 Bauarbeiten		
Technische Regeln, z. B.: • Arbeitsstättenrichtlinie • TRGS, TRBS • Verwaltungsvorschriften	DGUV-Regeln, Informationen, Grundsätze, z. B.: BGR 101-004 kontaminierte Bereiche		

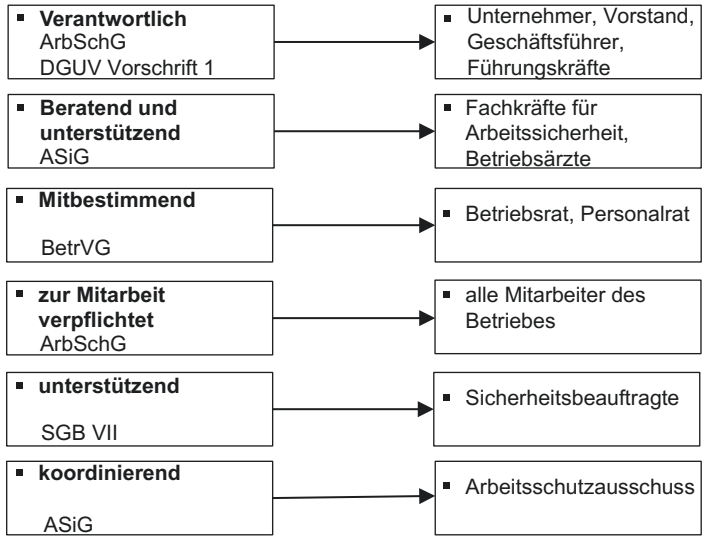


Abb. 24.7 Beteiligte an der betrieblichen Arbeitssicherheitsorganisation

Beschäftigten über die bei den Arbeiten möglichen Gefahren für Sicherheit und Gesundheitsschutz in dem Betrieb zu unterrichten und angemessene Anweisungen zu erteilen.
(2) Der Unternehmer, dem die Verantwortung für den Betrieb nach Absatz 1 Satz 1 obliegt, hat alle Maßnahmen für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten zu koordinieren und hierüber in seinem Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument die erforderlichen Einzelheiten festzulegen.

Dies betrifft auf einer Anlage für Oberflächennahe Geothermie beispielsweise das Sicherstellen einer Personal- und einer Sachorganisation. Nachstehend sind jeweils auszugsweise Beispiele genannt, die je nach betrieblicher Situation nach Bergrecht oder nach Gewerberecht zu organisieren sind:

Personalorganisation, z. B.:

- Verantwortliche Personen (zum Teil bestellt nach BBergG) gemäß Organigramm des Unternehmens,
- Fachkraft für Arbeitssicherheit und Betriebsarzt (ASiG, DGUV-Vorschrift 2),
- Sicherheitsbeauftragte (DGUV-Vorschrift 1 Grundsätze der Prävention, SGB VII),
- Arbeitsschutzausschuss (ASiG, ArbSchG),
- Ersthelfer (DGUV-Vorschrift 1),
- Elektrofachkraft (DGUV-Vorschrift 3 Elektrische Anlagen und Betriebsmittel),
- Kranführer (DGUV-Vorschrift 52 Krane),
- Gabelstaplerführer (DGUV-Vorschrift 70 Fahrzeuge, VDI 3313),
- Beschäftigte bei Schweißarbeiten (DGUV-Vorschrift 1).

Sachorganisation, z. B.:

- Verbandbuch und Unfallmeldung (DGUV-Vorschrift 1, Aufzeichnung von Erste-Hilfe-Leistungen),
- Erste Hilfe (DGUV-Vorschrift 1, Erste-Hilfe-Material),
- Arbeitsmedizinische Untersuchungen (DGUV-Vorschrift 6 Arbeitsmedizinische Vorsorge),
- Persönliche Schutzausrüstung (PSA-Benutzungsverordnung),
- Flucht- und Rettungsplan (ArbStättV),
- Brand- und Explosionsschutz (BetrSichV, GefStoffV etc.),
- Sanitär-, Pausen-, Sozialräume (ArbStättV),
- Arbeitsmittel (BetrSichV, TRBS),
- Gefahrstoffe (GefStoffV, TRGS),
- Unterweisungen (aus der Gefährdungsbeurteilung),
- CE-Kennzeichnung (Maschinenrichtlinien, BetrSichV),
- Anschlagmittel (DGUV-Vorschrift 52 Krane, BetrSichV).

Da insbesondere in der Planungs- und Bauphase zumeist Arbeiten parallel laufen und auch – je nach Projektgröße – mehrere Firmen gleichzeitig beteiligt sein können, kann das je nach Tiefe der Bohrung bei einer Oberflächennahen Geothermieanlage zu Arbeitsbereichen mit Tätigkeiten führen, in denen das Gewerberecht und zu solchen, in denen das Bergrecht anzuwenden ist. Damit sind auch mehrere Behörden in der Antragstellung zuständig, z. B. zum Errichten und Ausführen des Gewinnungsbetriebs die Bergbehörde und zum Errichten und Führen der Anlage die Raumordnungs- bzw. Baubehörde. Zudem können zeitgleich mehrere Berufsgenossenschaften (BG) involviert sein, da z. B. der Betreiber als gegründete Gesellschaft der Verwaltungs-BG oder aber auch der BG Energie Textil Elektro zugehörig ist, die Bohrfirma bei der BG Rohstoffe und chemische Industrie sowie beteiligte Handwerkerfirmen bei der Maschinenbau- und Metall-BG oder dergleichen versichert sind.

Reale Beispiele eines derartigen Bohrbetriebsplatzes zur Erstellung entsprechender Bohrungen zeigen Abb. 24.8 und 24.9.

Ist der Auftraggeber zum Bau einer solchen Oberflächennahen Geothermieanlage eine Privatperson, so hat sie mit den vorhergehenden Vorschriften zu Arbeits- und Gesundheitsschutz und daraus entstehenden Verantwortlichkeiten weitestgehend nichts zu tun. In dem Falle stehen die einzelnen Firmen allein in der Pflicht, die gesetzlichen Auflagen zu erfüllen. Der Auftraggeber sollte sich allenfalls im Sinne einer „moralischen“ Verantwortung zum Handeln verpflichtet sehen, wenn er feststellt, dass es auf der Baustelle zu – nach seinem Urteilsvermögen – erkennbaren Verstößen im Arbeits- und Gesundheitsschutz kommt. In diesem Falle wäre es angebracht, dass er diesbezügliche Kritiken zum Beispiel als Frage formuliert an den Bauleiter stellt. Verantwortlich zum Handeln im Sinne eines der genannten Regelwerke ist er nicht.

Abb. 24.8 Beispiel eines Bohrbetriebsplatzes für eine spätere Oberflächennahe Geothermieanlage. (Quelle: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Schleswig-Holstein)

Abb. 24.9 Beispiel einer Baustelle zum Bau einer Oberflächennahmen Geothermieanlage an einem Privathaus. (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Anders ist der Fall gelagert, wenn der Auftraggeber zum Bau einer solchen Anlage eine gewerbliche Person ist, zum Beispiel als juristische Person im Falle einer GmbH. Dann ist er als Veranlasser des Geschehens auch mit in der Verantwortungskette für Arbeits- und Gesundheitsschutz. Dies bedeutet auch, dass er als „Herrscher" über die Fläche die Koordination gegenseitiger Gefährdungen bei Vorhandensein mehrerer Firmen auf dem Gelände sicherzustellen hat. Dies muss er gemäß der Verantwortung nach Handelsgesetzbuch unabhängig der Frage tun, ob er die Fläche besitzt, geleast oder gemietet hat. Ihm obliegt die Einweisung in das Gelände inkl. der Besonderheiten (z. B. mögliche Gefährdungen durch andere Arbeiten) und die Sicherstellung der Verkehrssicherungspflicht (z. B. im Rahmen einer Baustellenordnung) sowie eine fortlaufende Vergewisserung, dass die einzelnen Beschäftigten der anderen Arbeitgeber entsprechende Anweisungen hinsichtlich der Gefahren für ihre Sicherheit und Gesundheit während ihrer Tätigkeit in diesem Betrieb erhalten haben („sekundäre Überwachungspflicht", § 8 ArbSchG). Er kann diese Arbeiten selbstverständlich delegieren, zum Beispiel an ein ausführendes Ingenieurbüro, bleibt aber auch in diesem Fall zumindest in der stichprobenartigen Kontrollverantwortung, ob die übertragenen Aufgaben auch erfüllt werden.

24.5 Gefährdungen und Belastungen bei Oberflächennaher Geothermie

Die Gefährdungs- und Belastungsbeurteilung (GB) bzw. im Bergrecht das Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument (SGD) wurde bereits als das Hauptarbeitsinstrument zur Sicherstellung von Arbeits- und Gesundheitsschutz genannt. Die ABBergV schreibt hierzu in § 3 Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument (substanziell vergleichbar dem Inhalt von §§ 5 und 6 ArbSchG):

> (1) Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass als Maßnahme nach § 2 Abs. 1 Satz 1 und 2 ein Dokument über Sicherheit und Gesundheitsschutz (Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument) nach Maßgabe der Sätze 3 und 5, einschließlich der zusätzlichen Anforderungen des Anhangs 3 Nr. 1.1.1 bis 1.1.4, vor Aufnahme der Arbeit erstellt wird. Zur Erstellung des Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokuments können auch andere im Betrieb vorhandene Unterlagen verwendet werden. In dem Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument hat der Unternehmer darzulegen, dass unter Berücksichtigung der in Betracht kommenden Umstände und der Beurteilung der Arbeitsbedingungen die jeweils erforderlichen Maßnahmen, die der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz der Beschäftigten dienen, rechtzeitig getroffen werden. Das Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument muss im Betrieb verfügbar sein. Aus ihm muss mindestens hervorgehen, dass
>
> 1. die Gefährdungen, denen Beschäftigte, auch besonders gefährdete Beschäftigtengruppen, an den jeweiligen Arbeitsstätten ausgesetzt sind, ermittelt und einer Beurteilung unterzogen worden sind und zu welchen Ergebnissen die Beurteilung von Gefährdungen geführt hat;
> 2. angemessene Maßnahmen in technischer, organisatorischer und personeller Hinsicht für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten getroffen werden;

3. die Arbeitsstätten und die Ausrüstung sicher gestaltet, betrieben und instandgehalten werden;

die Beschäftigten in geeigneter Weise über die Gefahren für Sicherheit und Gesundheit sowie die Schutzmaßnahmen und Maßnahmen zur Gefahrenverhütung an den jeweiligen Arbeitsstätten unterrichtet werden.

Entsprechend gilt es, zuerst einmal für die einzelnen Phasen der Entstehung einer Oberflächennahen Geothermieanlage die Tätigkeiten zu erfassen, mögliche Gefährdungen und Belastungen zu erkennen sowie entsprechende Schutzmaßnahmen festzulegen und fortlaufend zu überprüfen, ob weitere Verbesserungen nötig bzw. möglich sind. Dies muss jeder Unternehmer für seine Beschäftigten tun, bei gegenseitiger möglicher Gefährdung ist im Rahmen der erforderlichen Koordination der Zusammenarbeit entsprechend Absprache zu treffen. Zur Veranschaulichung, welche Gefährdungen und Belastungen bei welchen Tätigkeiten auftreten können, erweist sich das vereinfachte Ursache-Wirkungs-Schadens-Modell in Abb. 24.10 als hilfreich.

Für die einzelnen Phasen der Entstehung und für den späteren Betrieb der Wärmeanlage können dann nach Einteilung der entsprechenden Haupt- und Teiltätigkeiten die Gefährdungs- und Belastungsbeurteilungen erstellt werden. Hierbei können andere vorhandene Dokumente im Betrieb einbezogen bzw. es kann darauf verwiesen werden. Ein Beispiel für eine derartige Dokumentation zeigt Abb. 24.11 für das Begehen der Baustelle durch Betriebsfremde während der Bauphase.

Ausgehend von den erstellten Dokumenten kann dann bei regelmäßig stattfindenden Sicherheitsbegehungen auf dem Betriebsgelände eine Überprüfung der umzusetzenden Maßnahmen stattfinden und eine fortlaufende ergänzende Dokumentation erstellt werden (Abb. 24.12), die allen Führungskräften zugeht.

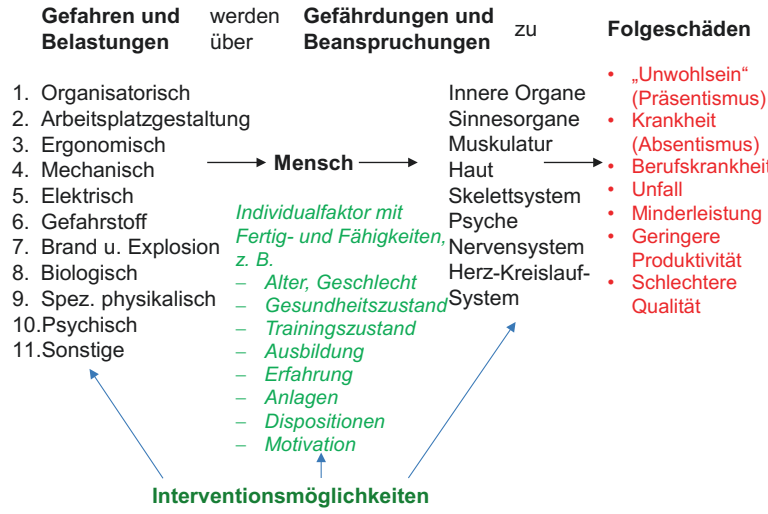


Abb. 24.10 Vereinfachtes Ursache-Wirkungs-Schadens-Modell

Gefährdungs- und Belastungsbeurteilung
(Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument nach ArbSchG §§ 5, 6 bzw. ABBergV § 3)

Betrieb/Abteilung: Muster-Anlage Geothermie **Betriebspunkt/Arbeitsplatz:**

Tätigkeit: Besuch von Betriebsfremden Zum Handlungsbedarf **Stand:** 10.06.2016

Nr.	A 017	Arbeitsplatz/ Teiltätigkeit	Mögliche Gefährdungen und Belastungen	Risiko / Dringlichkeit rot	gelb	grün	Handlungsbedarf	Schutzziel/ Quelle	Notwendige Maßnahmen / Empfehlungen	Beauftragter Termin	Kontrolle (am) Datum
1		Info zum Aufenthalt auf der Baustelle der Muster-Anlage. Unterweisung zum Informations-rundgang.	Unsachgemäßes Verhalten und Körperverletzung.		x			ABBergV bzw. ArbSchG, DGUV Vorschrift 1	Nur entsprechend informierte und unterwiesene sowie gesunde Personen zur Begehung zulassen. Zeitgleich darf sich immer nur eine Besuchergruppe auf der Anlage befinden. Den Besuchern die Merkblätter aushändigen, sie einweisen und von ihnen unterschreiben lassen.		
2		Aufenthalt auf der Baustelle.	Stolpern, Ausrutschen.		x			ArbStättV	Hinweis für Begleitpersonen: Unbedingt darauf achten, dass die Besucher diszipliniert die Anweisungen befolgen. Begehung nur mit Sicherheitsschuhen erlaubt.		
									Darauf achten, dass pro max. 4 Besucher mindestens eine Begleitperson anwesend ist.		
3		Auf dem Besucherweg.	Stolpern, Ausrutschen, Anstoßen, Allgemeine Gefährdungen.		x			Merkblatt für Besucher der Muster-Anlage	Darauf achten, dass Fotoapparate, Handys, Handtaschen und andere Gegenstände nicht mitgenommen werden.		
									Auf das Verbot des Essens, Rauchens und Trinkens unbedingt achten.		

Abb. 24.11 Beispiel für eine Gefährdungs- und Belastungsbeurteilung bzw. ein Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument (Auszug)

Ansonsten weisen Oberflächennahe Geothermieanlagen keine besonders von anderen Unternehmen herausragenden Gefährdungen und Belastungen aus, die es erforderlich machen würden, auch als besondere Risiken darauf zu verweisen, wie das bei anderen Themen inkl. der Umweltrisiken durch Erschütterungen und dgl. der Fall ist (Abb. 24.13). So ist es auch nicht verwunderlich, dass bei den Arbeitsunfällen – wie in vielen anderen Unternehmen auch – als Hauptverletzungsursachen Werkzeug, Ausrüstung, fallende Gegenstände, Rutschen, Stolpern, Fallen und Hebearbeiten zu nennen sind.

Von daher sind auch Geothermieanlagen bei entsprechendem Engagement im Arbeits- und Gesundheitsschutz mit geringem Risiko zu betreiben. Zu den erfolgreichen „Pflichtwerkzeugen“ zählen neben dem Basisinstrument der vorgestellten Gefährdungs- und Belastungsbeurteilung auf jeden Fall mündliche Ein- und Unterweisungen, schriftliche Betriebsanweisungen mit Sicherheitskennzeichnungen auf der Baustelle, Sicherheitsbegehungen, Sicherheitskurzgespräch („5-Minuten-Gespräch“) direkt vor Aufnahme gefährlicher Arbeiten, Beobachten und Ansprechen, Konsequenzen mit „Lob/Tadel“ und eine intensive Auseinandersetzung mit eingetretenen Ereignissen oder Beinaheunfällen im Sinne einer angestrebten kontinuierlichen Verbesserung.

Insbesondere das Engagement und die Einstellung der Führungskräfte, beginnend mit der Unternehmens-/Betriebsleitung, sind letztendlich ausschlaggebend für den jeweiligen Erfolg im Arbeits- und Gesundheitsschutz. Von daher ist besonderes Augenmerk auf eine regelmäßige Einbindung dieser Führungskräfte auch in die Rückmeldung der

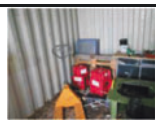
A + S - Analyse und Arbeits(platz)beurteilung gemäß den gesetzlichen Arbeitsschutzvorschriften									
Nr	Gebäude/ Arbeitsbereich/ Arbeitsplatz/Tätigkeit	1	2	3	Ist-Zustand am: Begehung am	Bemerkung Empfohlene Maßnahmen	Quellen	Verant-wortung/ Termin	Kontrolle durch/ Termin
	Bohrplatz				15.06.2016				
1					Stolpergefahr durch zu geringe Trittfläche und Höhendifferenz Türkante/Stufe.	Vor Container für ausreichende Trittfläche auf gleichem Niveau sorgen.			21.07.2016 Podest erstellt
2					Stolpergefahr durch Schläuche und Kabel im Verkehrsweg.	Schläuche und Kabel am Rand ggf. in einem Kabelkanal verlegen. Bei Kreuzen des Verkehrsweges überfahrbaren Schutzkanal benutzen.	DGUV Vorschrift 1, ASR 8/1, DGUV Regel 108-003		21.07.2016 Schläuche weggeräumt
3					Sicherung des Zugangs (Bügel) zum Fahrkorb defekt.	Reparieren vor nächstem Einsatz.			21.07.2016 Hubbühne repariert
4					Feuerlöscher sind geprüft.		BGR 133 DGUV Information 205-001 ASR 13/1.2		
5					Gefahr durch herabfallende Gegenstände.	Gelagerte Gegenstände gegen Absturz sichern, Auflastgrenzen beachten.	ArbStättV		Läuft, Behälterbox soll angeschafft werden
6					Fehlende Ordung sowie Stolpergefahr und Stoßkanten.	Aufräumen und Verkehrsweg im Container gewährleisten.			21.07.2016 Aufgeräumt

Abb. 24.12 Beispiel für einen Auszug aus einem Sicherheitsbegehungsprotokoll

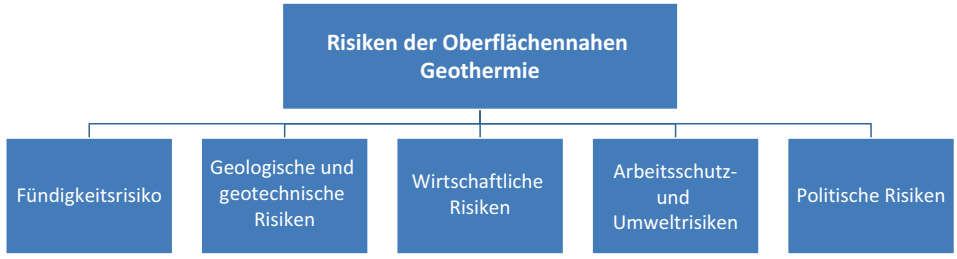


Abb. 24.13 Risiken der Oberflächennahen Geothermie (nach Bundesverband Geothermie)

Ergebnisse wichtig. Generell, aber gerade in kleinen Unternehmen, spielt hier die Vorbildfunktion durch den direkten Vorgesetzten eine sehr große Rolle. Abb. 24.14 zeigt ein Beispiel mit einem Auszug an „Werkzeugen“ im Arbeits- und Gesundheitsschutz für eine

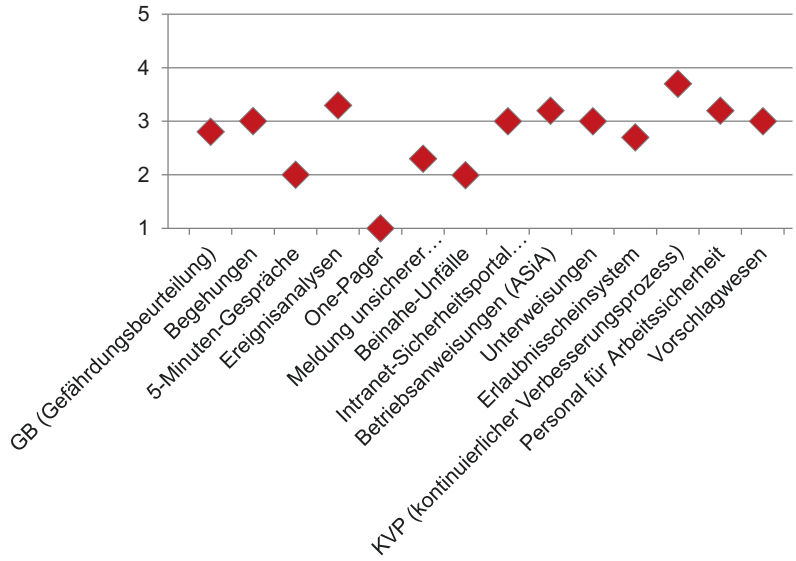


Abb. 24.14 Monitoring der „Qualität der Werkzeuge“ im Arbeits- und Gesundheitsschutz (1 sehr gut, 5 sehr schlecht)

Geothermieanlage. In diesem Falle wird jedes Mal nach einer Begehung etc. eine Einstufung der Ist-Situation vorgenommen, im Beispiel mit einer 5-poligen Skalierung (z. B. 1 sehr gut, 5 sehr schlecht), sodass sofort die Qualität auch ablesbar ist. Derartiges Vorgehen erweist sich zur Steuerung der Aktivitäten als sehr nutzbringend.

24.6 Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagementsystem

Erfolge sind meist das Ergebnis richtig geplanter Maßnahmen, die konsequent in die Praxis umgesetzt wurden. Entsprechend müssen die Maßnahmen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz, die erfolgreich umgesetzt werden sollen, geplant und organisiert sein. Dabei reicht es nicht aus, sich auf das eigene Interesse der Mitarbeiter oder den „guten Willen“ des Unternehmers zu verlassen. Die Aufgaben zu Arbeits- und Gesundheitsschutz müssen eindeutig beschrieben und in die Betriebsstruktur beim Bau einer Oberflächennahen Geothermieanlage eingegliedert werden. Intensität und Umfang der eingesetzten Instrumente für Arbeits- und Gesundheitsschutz sind natürlich in Abhängigkeit von der Größe des Projektes zu sehen, ob es sich um den Bau einer kleinen Anlage für den privaten Hausgebrauch handelt oder um eine größere Anlage mit entsprechend umfangreicheren und über längeren Zeitraum anstehenden Arbeiten. Im Sinne eines fortlaufenden Verbesserungsprozesses bieten sich insofern auch Übersichtsbilder an, in denen immer wiederkehrend Risiken

Abb. 24.15 Monitoring der betriebsrelevanten Faktoren, hier für die Planungsphase einer Geothermieanlage, mit 1 sehr schlecht, 10 ausgezeichnet. (Wetscherkowski und Bauer)

für den Betrieb beurteilt werden. Im Abb. 24.15 ist ein derartiges Bild für die Planungsphase einer Oberflächennahen Geothermieanlage dargestellt. Hinter den einzelnen Items werden entsprechende Kriterien definiert, anhand derer dann die Situation aktuell zwischen im Beispiel 1 (sehr schlecht) und 10 (ausgezeichnet) beurteilt werden kann. Durch Festlegung entsprechender Maßnahmen kann folgernd die Situation zielgerichtet weiterentwickelt werden. Damit werden auch die Themen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes stärker in den Fokus aller Führungskräfte gerückt.

Gefragt sind demnach methodische Lösungen, die es dem Betrieb ermöglichen, den Gedanken des systematischen Arbeits- und Gesundheitsschutzhandelns in alle betrieblichen Organisationsebenen wirksam hineinzutragen, bei allen Tätigkeiten zu berücksichtigen und durch geeignete Maßnahmen umzusetzen. Diese Aufgabe kann und darf nicht dem Zufall überlassen sein. Sie muss vielmehr im Sinne der Vorschriften des Arbeitsschutzgesetzes bzw. Bundesberggesetzes organisiert werden, d. h. Arbeits- und Gesundheitsschutz muss vom Arbeitgeber gemanagt werden.

Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagement nutzt dem Betrieb und den Beschäftigten. Ein Managementsystem ist hierbei nichts anderes als ein systematisiertes Führungs- und Organisationssystem (siehe hierzu weiterführende Literatur in Bauer 1997, 1998; Bauer und Neu 2016; Bauer und Michahelles 1995a, b, c, 1997). Hinter dem „hochtrabenden" Begriff des Managementsystems verbergen sich also in Summe die Führungsaufgaben,

wie planen, entscheiden, delegieren und kontrollieren, die systematisiert und organisiert wahrgenommen werden müssen. Wichtig ist vor allem, dass Kern- und Standardprozesse formalisiert werden müssen. Systematisierte und standardisierte Regelungen für diverse Arbeitsabläufe sollten getroffen und am besten schriftlich vereinbart werden. Hierbei ist ein zertifiziertes Managementsystem durchaus von Vorteil. Gerade im Bereich der Bohrunternehmen sind etliche Anbieter bereits heute nicht nur nach DIN EN ISO 9001 im Qualitätsmanagement zertifiziert, sondern haben auch weitere Zertifizierungen, z. B. nach D-A-CH-Gütesiegel oder nach DGW W 120, DIN EN ISO 14001 oder Safety Certificate Contractor (SCC).

Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagement – mit oder ohne einer anerkannten, externen Zertifizierung – ist damit gleichbedeutend mit systematischem Arbeitsschutzhandeln. Mit vertretbarem Aufwand kann durch ein systematisches Handeln die Führungsaufgabe Arbeitssicherheit erfüllt werden:

- Arbeits- und Gesundheitsschutz als Führungsaufgabe aktiv wahrnehmen,
- Arbeitssicherheitsorganisation aufbauen,
- Arbeitsbedingungen beurteilen und Schutzmaßnahmen umsetzen (GB, SGD),
- Arbeits- und Gesundheitsschutz in die Betriebsabläufe einbeziehen,
- Kontinuierlich überprüfen und aus Fehlern lernen.

Wer in diesem Sinne als Verursacher des Baus von Oberflächennahen Geothermieanlagen darauf achtet, dass Arbeits- und Gesundheitsschutz in der Planung und Umsetzung ein fester Bestandteil unternehmerischer Verantwortung ist, leistet auch durch Vermeidung von in der Vergangenheit immer wieder aufgetretener öffentlichkeitswirksamer Ereignisse einen Beitrag zur weiteren Verbreitung dieser sehr sinnvollen regenerativen und damit auch umweltschonenden Energieversorgung.

Literatur

Allgemeine Bundesbergverordnung (ABBergV) (1996)

Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) (1996)

Bauer, M.: Eine Verordnung verändert den betrieblichen Alltag: Die Umsetzung der GesBergV bei Saarberg. In: Arbeit und Sicherheit 46, Nr. 9, S. 8–9, Verlag Glückauf GmbH, Essen (1993a)

Bauer, M.: Gefahrstoffen den Schrecken nehmen. In: Zeitschrift des Saarberg-Konzerns, Nr. 7, S. 11, Saarbergwerke AG, Saarbrücken (1993b)

Bauer, M.: Ergonomie am Bildschirmgerät. In: Arbeit und Sicherheit 47, Nr. 1/2, S. 9, Verlag Glückauf GmbH, Essen (1994)

Bauer, M.: Einbindung des Arbeitsschutzes bei der Planung und vor der Beschaffung. Herausgeber: Wolfgang Jäger. In: Loseblattwerk Betriebliche Arbeitssicherheit – Rechtsgrundlagen, Praxis, Dokumentation, 15. Ergänzungslieferung 6, ecomed verlagsgesellschaft, Landsberg (1996)

Bauer, M.: Motivation durch Partizipation als wesentlicher Bestandteil modernen Arbeitsschutzes. In: Loseblattwerk Betriebliche Arbeitssicherheit – Rechtsgrundlagen, Praxis, Dokumentation, 21. Ergänzungslieferung 12, S. 1–9, ecomed verlagsgesellschaft, Landsberg (1997)

Bauer, M.: Entwicklung eines Arbeitssicherheits-Managementsystems für den deutschen Steinkohlenbergbau am Beispiel der Saarbergwerke AG, Aachener Beiträge zur Rohstofftechnik und Wirtschaft, S. 15, Verlag Mainz (1998). ISBN 3-86073-650-7

Bauer, M.: Arbeits- und Gesundheitsschutz. Aachener Beiträge für Consulting, Business und Management, Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen (2002a). ISBN 3-89653-282-0.

Bauer, M.: Stand und Perspektiven eines modernen Arbeitsschutzkonzepts im Bergbau. In: Tagungsband der AGiB anlässlich Symposiums „Arbeits- und Gesundheitsschutz im Steinkohlenbergbau" S. 231–235, Homburg April (2002b)

Bauer, M.: Arbeits- und Gesundheitsschutz, 3. Aufl. (2008)

Bauer, M., Engeldinger, A.: Die Umsetzung der Gesundheitsschutz-Bergverordnung bei der Saarbergwerke AG. In: Kompaß 103, Nr. 6, S. 280–286, Bergbau-Berufsgenossenschaft und Bundesknappschaft, Bochum (1993)

Bauer, M., Engeldinger, A.: Arbeits- und Gesundheitsschutz in klein- und mittelständischen Unternehmen. In: Handbuch Arbeitsschutz 2004, S. 177–214. DWD, München (2003). ISBN 3-87156-576-8

Bauer, M., Michahelles, R.: Sicherheitsmanagement I – Sicherheitsmanagement ist Chefsache. In: Der Karriereberater, Nr. 2, S. 169–184. VBU-Verlag Beste Unternehmensführung GmbH, Bonn (1995a)

Bauer, M., Michahelles, R.: Sicherheitsmanagement II – Sicherheitsmanagement ist Mitarbeitersache. In: Der Karriereberater,Nr. 5, S. 185–200. VBU-Verlag Beste Unternehmensführung GmbH, Bonn (1995b)

Bauer, M., Michahelles, R.: Sicherheitsmanagement III – DerSicherheitsexperte als Coach. In: Der Karriereberater, Nr. 7, S. 191–208. VBU-Verlag Beste Unternehmensführung GmbH, Bonn (1995c)

Bauer, M., Michahelles, R.: Motivation durch Arbeitssicherheitsmanagement. In: Loseblattwerk Betriebliche Arbeitssicherheit – Rechtsgrundlagen, Praxis, Dokumentation, 21. Ergänzungslieferung 12/1997, S. 1–31. ecomed verlagsgesellschaft, Landsberg. (1997)

Bauer, M., Neu, T.: Pflichtenübertragung im Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz und bei Umweltmanagementsystemen. In: Künftige Anforderungen an den arbeits- und Gesundheitsschutz in der Nichteisen-Metallurgie. S. 15–28, Heft 140, GDMB Juli (2016). ISBN 978-3-940276-70-4

Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T.: Handbuch Tiefe Geothermie, Springer Spektrum, Berlin (2014). ISBN 978-3-642-54510-8

Borg, A., Wilde, J., Dziadus, D., Pieper, C., Boczek, B., Bauer, M.: Sicherheitskultur – gelebte Sicherheit bei der BASF SE. In: Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit, S. 41–44, Asanger Verlag, Kröning (2012)

Homberg, F., Bauer, M.: Lärm- und Schwingungsschutz im Steinkohlenbergbau, Teil 1. In: Bergbau 46, Nr. 1, S. 11–17, Makossa Werbe- und Verlagsgesellschaft mbH, Gelsenkirchen (1995)

Levin, G., Bauer, M. et al.: Neue Strategien der Unfallverhütung. In: Tagungsband der Arbeitsgemeinschaft des Saarlandes zur Erforschung und Förderung des Gesundheitsschutzes im Bergbau e. V. anlässlich der wissenschaftlichen Tagung vom 27.-29. S. 210–220, Saarbrücken April (1994)

Tschauder, A., Hübner, H., Auer, E.: Genehmigungsverfahren von Geothermiekraftwerken. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg (2014)

Oberflächennahe Geothermie in Österreich 25

Johann Goldbrunner

Inhaltsverzeichnis

25.1 Einleitung 740
25.2 Rechtliche Grundlagen 741
25.3 Probleme bei der Herstellung von Erdwärmesonden 741
25.3.1 Geologisch bedingte Ursachen 741
25.3.2 Technisch bedingte Ursachen 743
25.4 Konflikt mit wasserwirtschaftlichen Interessen 744
25.5 Anzahl der Erdwärmesonden in Österreich 745
25.5.1 Erdgekoppelte Heizungs-WP nach Leistungssektoren 746
Literatur 752

Zusammenfassung

In Österreich wurden bis Ende 2014 kumuliert 37.763 Erdwärmesondenprojekte fertiggestellt, für die 6,24 Mio. Bohrmeter niedergebracht wurden. Die gesamte Entzugsleistung der Sonden lässt sich mit 312 MW abschätzen; unter Zugrundelegung einer Jahresarbeitszahl von 3,5 resultiert daraus eine thermische Gesamtleistung der österreichischen Erdwärmesondenanlagen von rund 440 MW. Wie im gesamteuropäischen Markt lässt sich auch in Österreich eine deutliche Abnahme des Anteils der erdgekoppelten (= Erdwärmesonden + Flachkollektoren) an den jährlich neu installierten Wärmepumpenanlagen feststellen: Betrug der Anteil 2007 noch 76,1 %, so sank er 2014 auf 35,9 %.

Durch die Novelle des Wasserrechtsgesetzes 2011 wurde die Errichtung von Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Erdwärmesonden) mit Tiefen von weniger als 300 m in Österreich bewilligungsfrei gestellt,

Johann Goldbrunner (✉)
Geoteam Ges.m.b.H., Bahnhofgürtel 77, A-8020 Graz, Österreich
e-mail: goldbrunner@geoteam.at

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_25

jedoch wurden Gebiete mit gespannten und artesisch gespannten Grundwasservorkommen und wasserrechtlich besonders geschützte Bereiche von der Bewilligungsfreiheit ausgenommen. Das Bundesgesetz wird durch die einzelnen Bundesländer unterschiedlich interpretiert; so gibt es Länder, in deren gesamtem Gebiet Bewilligungspflicht gilt, und andere, die das gesamte Landesgebiet bewilligungsfrei gestellt haben. Über eine Tiefe von 300 m ist unabhängig von einer wasserrechtlichen Genehmigung eine bergbehördliche Bewilligung erforderlich.

Die Probleme bei der Herstellung von Erdwärmesonden haben geologische und technische Ursachen. Spektakuläre Schadensfälle betrafen das Erschließen von seichten brennbaren Gasvorkommen. Die mangelnde Qualität bei der Ausführung der Bohrarbeiten und der Verfüllung der Erdwärmsonden birgt ein nicht unbeträchtliches Konfliktpotential mit den Interessen der Trinkwasserwirtschaft. Im Bundesland Steiermark führte die mangelhafte Ausführung von Erdwärmesonden zur Ausweisung von Ausschlussgebieten für deren Errichtung, in denen artesische Drücke von $> 0{,}3$ bar zu erwarten sind.

Schlüsselwörter

Erdwärmesonden · bohrtechnische Probleme · Konflikte Wasserwirtschaft · Statistik

25.1 Einleitung

Das Bundesgebiet Österreichs umfasst eine Fläche von 83.879 km^2 bei einer Wohnbevölkerung von 8,51 Mio. im Jahr 2014 (Statistik Austria 2015). Circa zwei Drittel des Staatsgebietes werden von den Ostalpen eingenommen, die Höhen von beinahe 4000 m (Zentralalpen, Großglockner) erreichen können. Naturgemäß konzentriert sich die Besiedelung und damit der Wärmebedarf auf die großen Alpentäler und die Beckenbereiche im Norden und Osten des Bundesgebietes. Kaltschmitt und Streicher (2009) gehen bei ihrer Ermittlung des technischen Angebotspotenzials der Oberflächennahen Geothermie Österreichs davon aus, dass nur 1760 km^2 und damit ca. 2,1 % des Bundesgebietes als Gebäuden unmittelbar zuzuordnende Freiflächen angesehen werden können. Aufgrund der gegebenen Gebäudestrukturen, der Bebauungsdichte in den Städten und sonstiger Restriktionen (Keller, unterirdische Leitungen) unterstellen die Autoren, dass nur ein knappes Drittel der Flächen tatsächlich für die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie zur Verfügung stehen. Unter diesen Prämissen errechnen die Autoren ein technisches Angebotspotenzial von 80 PJ/a für Erdwärmekollektoren und 560 PJ/a für Erdwärmesonden, wobei eine Sondenlänge von 100 m und eine Fläche pro Sonde von 36 m^2 herangezogen wurden.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Nutzung der Oberflächennahen Geothermie durch erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, wobei der Schwerpunkt auf den Erdwärmesonden (EWS) liegt.

25.2 Rechtliche Grundlagen

Mit der Novelle 2011 des Wasserrechtsgesetzes (BGBl. I Nr. 14/2011) wurde eine wesentliche Änderung in der Bewilligungspraxis von Erdwärmesonden eingeführt. Damit wurden Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefsonden) bewilligungsfrei gestellt, sofern sie eine Tiefe von 300 m nicht überschreiten oder in Gebieten mit gespannten und artesisch gespannten Grundwasservorkommen bzw. in wasserrechtlich besonders geschützten Gebieten und in geschlossenen Siedlungsgebieten ohne zentrale Trinkwasserversorgung errichtet werden (31c Abs. 5 lit-b). In den letztgenannten Fällen gilt die Anzeigepflicht mit einer Befristung der Bewilligung auf 25 Jahre.

Bei der wasserrechtlichen Anzeige eines Erdwärmesondenprojektes sind die geplanten Maßnahmen der Behörde drei Monate vor Inangriffnahme unter Vorlage von im Wasserrechtsgesetz in ihrem Umfang definierten Projektunterlagen anzuzeigen. Die Bewilligung gilt dann als erteilt, wenn die Behörde nicht innerhalb von drei Monaten ab Einlangen der Anzeige die Notwendigkeit der Durchführung eines Bewilligungsverfahrens schriftlich bekannt gibt. Ansonsten wird ein Verfahren mit mündlicher Verhandlung und Erlassung eines Bescheides durchgeführt.

Die Wasserrechtsnovelle wurde von den einzelnen Bundesländern unterschiedlich umgesetzt. So gilt eine Bewilligungspflicht für Tiefsonden im gesamten Gebiet der Bundesländer Kärnten, Salzburg, Tirol und Vorarlberg. In Oberösterreich und der Steiermark wurden Gebiete, in denen eine Bewilligungspflicht gilt, ausgewiesen und im Wasserbuch bzw. im digitalen Wasserinformationssystem ersichtlich gemacht. In Niederösterreich wurde die Errichtung von Erdwärmesonden im gesamten Landesgebiet bewilligungsfrei gestellt, während die Bundesländer Wien und Burgenland im Großteil ihres Landesgebietes eine Bewilligungspflicht vorsehen.

Für Erdwärmesonden mit einer Tiefe von über 300 m besteht sowohl eine wasserrechtliche als auch bergrechtliche Bewilligungspflicht; letztere bezieht sich auf die „bergbautechnischen Aspekte [....] des Suchens und Erforschens von Vorkommen geothermischer Energie (Erdwärme, Wärmenutzung der Gewässer) soweit hiezu Stollen, Schächte oder mehr als 300 m tiefe Bohrlöcher hergestellt oder benützt werden“ (Mineralrohstoffgesetz – MinroG). Die bergbautechnischen Aspekte beziehen sich unter anderem auf den technischen Zustand der Bohranlage, die Sicherheitseinrichtungen und auf die vom Betrieb der Bohranlage ausgehenden Emissionen und das eingesetzte Bohrverfahren.

25.3 Probleme bei der Herstellung von Erdwärmesonden

25.3.1 Geologisch bedingte Ursachen

In Österreich wurden bei Bohrungen zur Herstellung von Erdwärmesonden in einzelnen Fällen in der Molassezone (Alpenvorland) brennbare Gase erschlossen. Bei einer 2011

ausgeführten Erdwärmesondenbohrung in St. Pantaleon-Erla (Bundesland Niederösterreich, Molassezone) wurde der aufgetretene Blow-out auch in überregionalen Medien gemeldet, da dieser erst nach einiger Zeit durch Bohrtechniker der KW-Industrie unter Kontrolle gebracht werden konnte. Der Ausbruch erfolgte aus einer Tiefe von 98,5 m unter Gelände (Mayer und Sachsenhofer 2013). In der Nähe der Lokation war bereits 2005 ein ähnlicher Blow-out erfolgt, bei dem auch Bohrleute ernstlich zu Schaden kamen (Mayer und Sachsenhofer 2013.). Aufgrund dieser Schadensfälle wurde durch die Niederösterreichische Landesregierung eine Untersuchung und Dokumentation der bis einer Tiefe von 300 m aufgetretenen Anzeichen von Öl und Gas veranlasst. Allein im Bundesland Niederösterreich wurden insgesamt 65 Gas-, 12 Öl- und Gas- und 18 Ölanzeichen in diesem Tiefenbereich dokumentiert (Mayer und Sachsenhofer 2013, siehe Abb. 25.1).

Nach einem Blow-out in einer nur 38 m tiefen Aufschlussbohrung für eine neue U-Bahntrasse im südlichen Stadtgebiet von Wien (Bezirk Favoriten) war es mithilfe einer hochauflösenden Reflexionsseismik möglich, die gasführende Struktur zu identifizieren

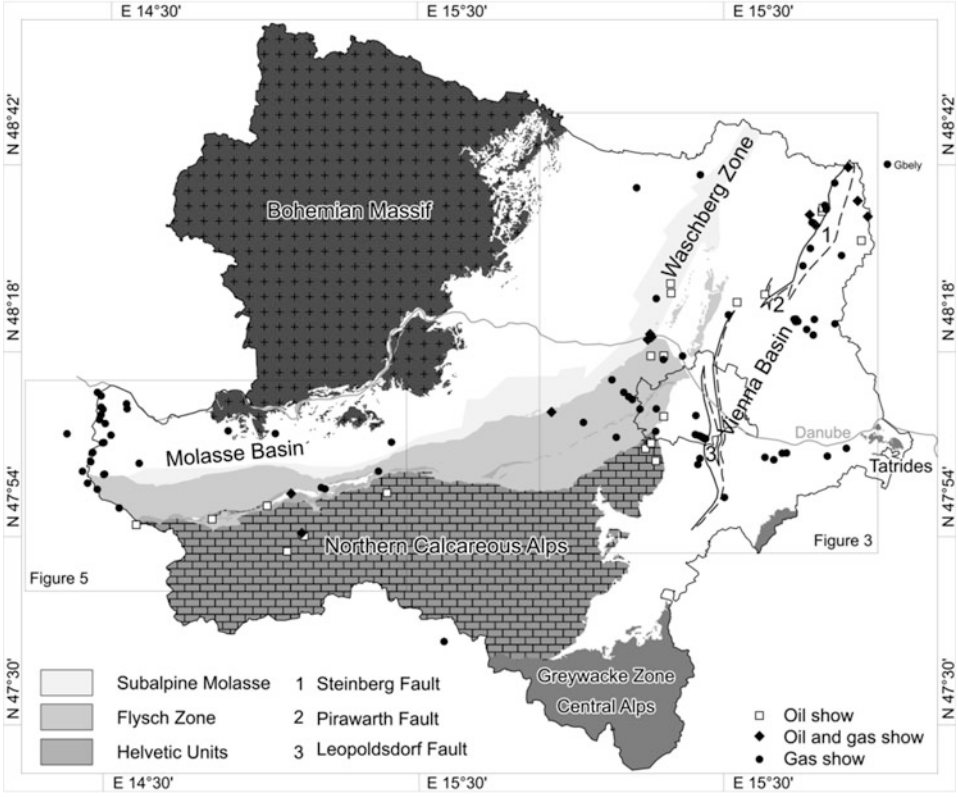


Abb. 25.1 Oberflächennahe Vorkommen von Öl und Gas im Bundesland Niederösterreich. (Mayer und Sachsenhofer 2013)

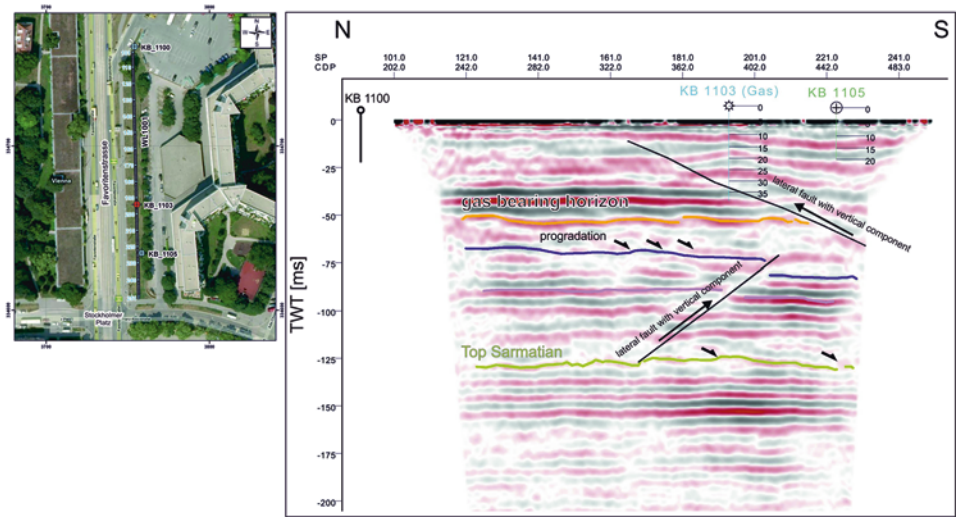


Abb. 25.2 Interpretierte seismische Sektion in der Zeitdomäne (TWT = Zweiwegezeit). Links: Lageplan des seismischen Profils und der Bohrlöcher. (Schreilechner und Eichkitz 2013)

(Schreilechner und Eichkitz 2013). Der gasführende Horizont hatte nur eine Mächtigkeit von 20 cm, war aber als *bright spot* im seismischen Profil erkennbar (Abb. 25.2).

In Österreich sind bis dato jedoch keine derart spektakulären Unglücksfälle wie z. B. in Staufen (Grimm et al. 2014) bekannt geworden.

25.3.2 Technisch bedingte Ursachen

Nach den Erfahrungen des Autors mit Erdwärmesondenprojekten in Österreich sind folgende bohrtechnische Probleme als Ursachen für die schlechte Ausführungsqualität von Erdwärmesonden zu nennen:

- Starke Abweichungen vom geplanten Bohrlochverlauf.
- Probleme bei der Sondenkomplettierung durch unregelmäßiges Kaliber infolge starker Auskesselungen und/oder Kaliberverengungen.
- Abweichungen zwischen Bohrtiefe und Sondentiefe durch Verbruch der Bohrlochwand.
- Nichtbeherrschen von artesischen Drücken.
- Mangelhafte Verfüllung der Erdwärmesonden.

Eine Analyse der Schadensfälle in Baden-Württemberg wurde durch Grimm et al. (2014) durchgeführt. Einige der dort gemachten Erfahrungen lassen sich auch auf Österreich übertragen.

25.4 Konflikt mit wasserwirtschaftlichen Interessen

In den großen Sedimentbecken, die nördlich, südlich und östlich der Ostalpen liegen (oberösterreichischer und niederösterreichischer Anteil an der Molassezone, Steirisches Becken, Wiener Becken, Anteil am Pannonischen Becken) treten in den paläogenen und neogenen Sedimenten der Beckenfüllungen Tiefengrundwässer auf, die sich aufgrund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften für die Trinkwasserversorgung eignen. Sie werden meist durch Bohrbrunnen mit Tiefen von bis zu 300 m (in Ausnahmefällen auch bis 500 m) erschlossen.

Nach dem Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan (BMLFUW 2010) wurden in den Bundesländern Oberösterreich, Steiermark und Burgenland 9 Tiefengrundwasserkörper ausgewiesen, davon haben fünf regionale und überregionale Bedeutung für die Wasserversorgung (Abb. 25.3).

Im Anteil des Bundeslandes Steiermark am Steirischen Becken sind 1625 in Betrieb befindliche Brunnen dokumentiert, die Tiefengrundwasser fördern. Der mit Pumpen entnommene Volumenstrom beträgt insgesamt 130 l/s, 210 l/s fließen artesisch aus. Im Südburgenland, das ebenfalls Anteile am Steirischen Becken hat, wurden 420 Brunnen (Stand 1998) erhoben. Im Oberösterreichischen Molassebecken sind 680 wasserrechtlich bewilligte artesische Brunnen dokumentiert (ÖWAV 2015). Mit Stand 1985 wurden jedoch über 1000 Einzelbrunnen erhoben (Goldbrunner 1988). Die große Brunnenanzahl zeigt die wasserwirtschaftliche Bedeutung der in den Sedimentbecken auftretenden Tiefengrundwasserkörper.

Da die Bohrungen zur Herstellung der Erdwärmesonden ähnliche Tiefen erreichen wie die Brunnenbohrungen, wird das Konfliktpotenzial erkennbar, das sich durch

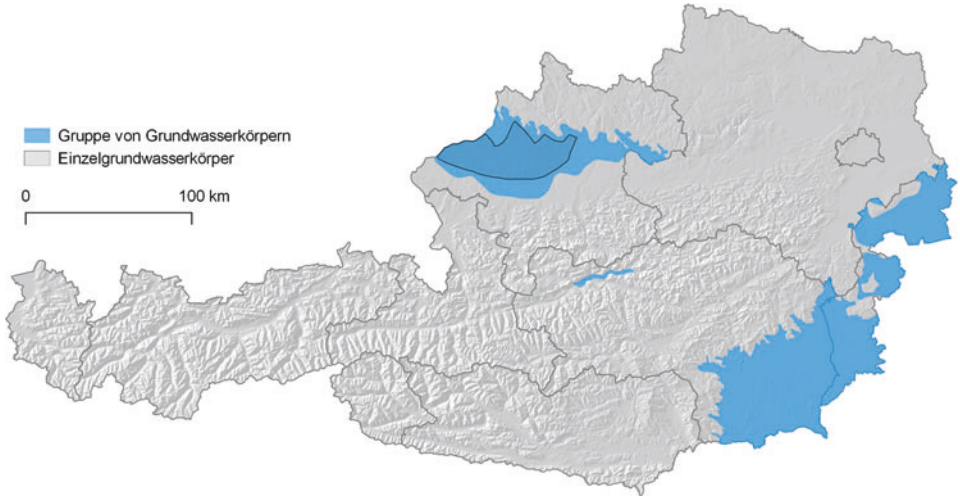


Abb. 25.3 Karte der Tiefengrundwasserkörper in Österreich. (Umgezeichnet nach BMLFUW 2010)

eine technisch minderwertige Ausführung von EWS-Bohrungen, insbesondere durch Kurzschließen von permeablen Horizonten mit unterschiedlichen Druckniveaus infolge mangelhafter Verfüllung, ergibt.

Die wasserwirtschaftlichen Probleme, die durch mangelhafte Ausführung von Erdwärmesonden entstanden sind, waren der Anlass, dass im Bundesland Steiermark Bereiche, in denen artesische Drücke von > 0,3 bar zu erwarten sind, zu Ausschlussgebieten für die Errichtung von Erdwärmesonden erklärt wurden (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2011).

25.5 Anzahl der Erdwärmesonden in Österreich

Eine exakte Darstellung der Anzahl der Erdwärmesonden in Österreich ist aufgrund der nur teilweise gegebenen wasserrechtlichen Bewilligungspflicht nicht möglich, eine größenordnungsmäßige Abschätzung ist jedoch durchführbar. Eine wertvolle Grundlage hierfür ist die Dokumentation der Entwicklung des österreichischen Wärmepumpenmarktes anhand der jährlichen Verkaufszahlen inländischer Hersteller- und Vertriebsfirmen (Fanninger 2006, 2007 und Biermayr 2008–2015). Bei den erdgekoppelten Wärmepumpensystemen wird zwischen Direktverdampfung (horizontale Kollektoren), Sole-Wasser-Systemen (Flachkollektoren, Erdwärmesonden) und Wasser-Wasser-Wärmepumpen (Grundwassernutzung) unterschieden. Letztere können den Wasserbüchern entnommen werden, da die Wärmenutzung von Grundwasser einen wasserrechtlichen Tatbestand darstellt.

Die von 1995 bis 2008 stetig steigenden Absatzzahlen von Wärmepumpenanlagen (WP-Anlagen) aller Kategorien zeigten im Zeitraum 2008–2011 aufgrund der Auswirkungen der Finanzkrise einen rückläufigen Trend. In den Jahren 2012–2014 war wieder eine Aufwärtsentwicklung am Wärmepumpenmarkt zu beobachten, die jedoch nur für die Luftwärmepumpen zutrifft. 2014 wurden in Österreich 19.378 Wärmepumpen verkauft, davon waren 9164 Luftwärmepumpen (Abb. 25.4).

Ausgehend von einer anzunehmenden 20-jährigen Betriebsdauer von Wärmepumpen waren mit Ende 2014 in Österreich insgesamt 222.966 Wärmepumpenanlagen in Betrieb. Davon gehörten knapp 65 % (144.553 Stück) zu den erdgekoppelten WP-Systemen.

Als Nutzungsart überwog bei den Neuinstallationen 2014 die Heizungswärmepumpe – zu diesem Sektor werden auch WP zur Wohnraumlüftung und Industrie-WP gezählt – mit einem Anteil von 73,8 % (14.292 Stück). Vor 20 Jahren verhielt sich dies umgekehrt, damals lag der Anteil der Warmwasser-WP (Brauchwasser-WP) bei über 77 %. Die Gesamtzahl der im Jahr 1994 errichteten WP-Heizungsanlagen lag bei lediglich 5895 Stück. In den Folgejahren nahm der Anteil der Heizungswärmepumpe an den Neuinstallationen laufend zu und übertraf 2001 mit einem Anteil von knapp über 57 % die Brauchwasser-WP. Seit 2012 ist dieser Trend leicht rückläufig und von 2013 auf 2014 ist wieder ein deutlicher Anstieg der Verkaufszahlen von Brauchwasser-WP zu verzeichnen.

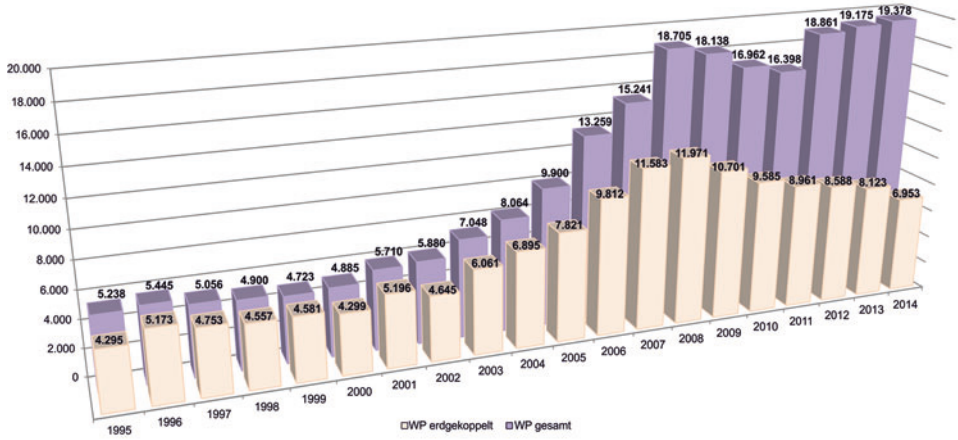


Abb. 25.4 Wärmepumpenmarkt in Österreich: Verkaufszahlen WP alle Kategorien (gesamt) und erdgekoppelte Systeme 1995–2014. (Macho 2010; Biermayr 2015)

Nach den Wärmequellen für Heizungs-WP (Abb. 25.5.) lag der Anteil der Flachkollektoren mit Direktverdampfung zwischen 1994 und 1999 im Durchschnitt bei über 61 % (2014 nur mehr bei 5,5 %!). Diese Dominanz wurde ab dem Jahr 2000 durch Sole-Wasser-Systeme, worunter auch die Erdwärmesonden fallen, abgelöst. Der Anteil dieser Systeme erreichte 2004 bis 2007 mit über 50 % seinen Höhepunkt. Seither ist der Anteil rückläufig und erreicht im Jahr 2014 nur mehr 25 %. Stattdessen stieg nunmehr ab 2007 der Marktanteil der Luft-Wasser-Systeme systematisch an, wodurch im zunehmenden Ausmaß Sole-Wasser-Systeme verdrängt wurden; 2014 lag der Anteil der Luft-Wasser-Systeme bei knapp 63 %. Biermayr geht davon aus, dass die Luft-Wasser-Systeme auch in Zukunft vor allem Sole-Wasser-Systeme verdrängen werden. Als Gründe für diese Entwicklung führt der Autor die geringeren Investitionskosten von luftbasierten Systemen und die Verfügbarkeit von Luft als Wärmequelle an. Zum Teil hat sicherlich auch die Verunsicherung von Konsumenten in Bezug auf die Herstellung von Erdwärmesonden zu diesem Trend beigetragen.

Bei den erdgekoppelten Heizungs-WP (Abb. 25.6) führten die Direktverdampfer 1995 (67 %) bis 2002 (41 %) die Verkaufszahlen an. Die Sole-Wasser-Systeme gewannen seit 2000 (30 %) stetig an Bedeutung und erreichten 2014 einen Marktanteil von 70 % bei den erdgekoppelten Systemen. Der Anteil der Wasser-Wasser-WP schwankte in den betrachteten 20 Jahren zwischen 11 und 18 %.

25.5.1 Erdgekoppelte Heizungs-WP nach Leistungssektoren

Für den Zeitraum ab 2007 erfolgt in den jährlichen Marktstatistiken eine Differenzierung der erdgekoppelten Heizungswärmepumpen (inkl. Lüftungs- und Industriewärmepumpen)

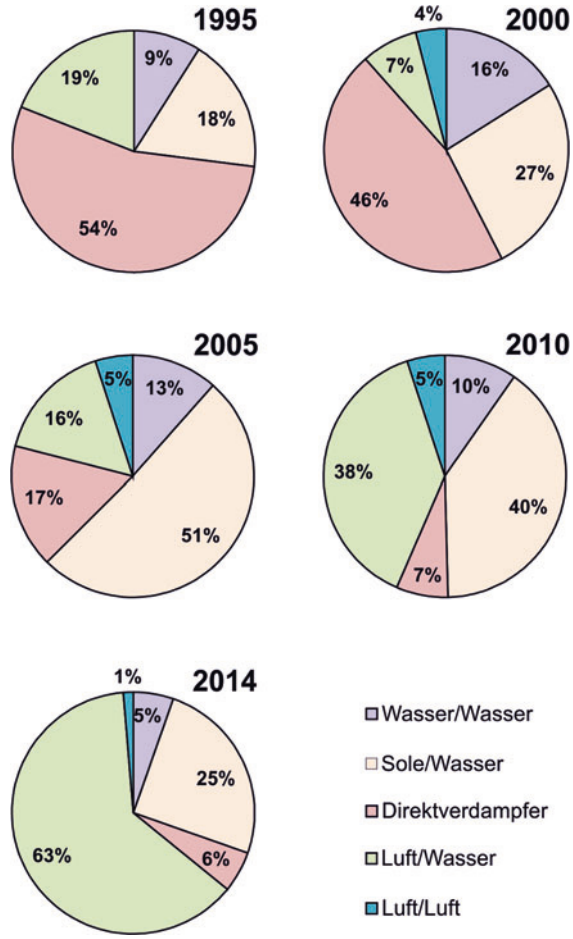


Abb. 25.5 Heizungs-WP (inkl. Wohnraumlüftung und Industrie-WP) in Österreich: %-Anteil nach Art der Wärmequellen. (Biermayr, 2009–2015)

nach Leistungsklassen, wobei ab 2012 eine weitere Differenzierungsstufe (bis 10 kW) eingeführt und die Unterteilung geändert (20–80 kW auf 20–50 kW und >80 kW auf >50 kW) wurde (Tab. 25.1 und 25.2). Weiter sind erstmals 2012 Industriewärmepumpen als größtes Leistungssegment angeführt.

Der größte Anteil der erdgekoppelten Heizungs-WP (82–92,6 %) liegt im Sektor der niedrigsten Leistungsklasse (bis 20 kW). Zwischen 2007 (82 %) und 2012 (92,6 %) ist hier ein kontinuierlicher Anstieg der Verkaufszahlen zu beobachten. Der 2013 in diesem Leistungssegment auf 87,3 % reduzierte Anteil erhöhte sich 2014 auf 88,6 %. In der nächst höheren Leistungsklasse (20–50 kW) ist zwischen 2012 (5,6 %) und 2013 (10 %) nahezu eine Verdopplung der WP-Anlagen zu verzeichnen. Der Anteil des Sektors der höchsten Leistungsklasse (>50 bzw. 80 kW und Industrie-WP) liegt zwischen 2007 (1,8 %) und 2014 (2,3 %) im Durchschnitt bei 1,8 %, jener des mittleren Leistungsbereiches bei 9,8 %.

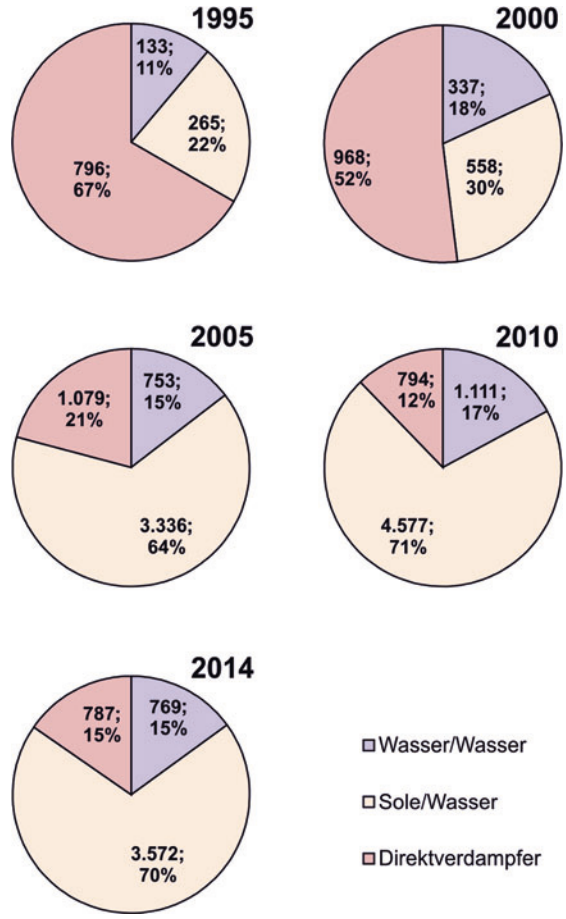


Abb. 25.6 Erdgekoppelte Heizungs-WP in Österreich: Verkaufszahlen und %-Anteil nach Art der Wärmequellen. (Biermayr 2009–2015)

Die in Tab. 25.1 aufgelisteten Zahlen für erdgekoppelte Heizungs-WP und die Jahresverkaufszahlen der Heizungs-WP gesamt verdeutlichen die schon erwähnte rückläufige Entwicklung am Wärmepumpenmarkt zwischen 2008 und 2011. Die nach einer Steigerung 2012 einsetzende Stagnation der Verkaufszahlen der Heizungs-WP (Tab. 25.2) steht im Gegensatz zur Entwicklung am Sektor der Warmwasser-WP. Der Anteil der erdgekoppelten WP-Systeme ist ab 2008 sinkend (siehe auch Abb. 25.4).

Macho (2011) hat im Rahmen seiner Diplomarbeit durch Anfragen bei Verwaltungsbehörden und Förderstellen und Recherchen bei Bohrfirmen eine Abschätzung der Anzahl der jährlich durchgeführten EWS-Projekte und der Gesamtbohrmeter für die Herstellung von Erdwärmesonden vorgenommen und die erarbeiteten Zahlen mit den Absatzzahlen der Wärmepumpen verglichen.

Er ermittelte für Ende 2010 eine Gesamtbohrstrecke für Erdwärmesonden von 4,17 Mio. Meter bei einer Anzahl von 25.219 fertiggestellten EWS-Projekten (Abb. 25.7).

Tab. 25.1 Erdgekoppelte Heizungswärmepumpen nach Leistungsklassen (2007–2011). (Biermayr 2009–2013)

Leistungsklassen		2007		2008		2009		2010		2011	
		Stk.	[%]	Stk.	[%]	Stk.	[%]	Stk.	[%]	Stk.	[%]
Bis 20 kW	W/W	998	12,04	1143	13,68	963	13,35	933	14,39	801	11,96
	S/W	4674	56,39	4961	59,39	4640	64,34	4204	64,86	4635	69,19
	Direktverd.	1124	13,56	1078	12,91	900	12,48	771	11,89	682	10,18
20–80 kW	W/W	356	4,30	302	3,62	194	2,69	166	2,56	169	2,52
	S/W	839	10,12	639	7,65	393	5,45	324	5,00	354	5,28
	Direktverd.	150	1,81	103	1,23	37	0,51	23	0,35	23	0,34
> 80 kW	W/W	59	0,71	49	0,59	35	0,49	12	0,19	6	0,09
	S/W	88	1,06	78	0,93	50	0,69	49	0,76	29	0,43
	Direktverd.										
Gesamt	W/W	1413	17,0	1494	17,9	1192	16,5	1111	17,1	976	14,6
	S/W	5601	67,6	5678	68,0	5083	70,5	4577	70,6	5018	74,9
	Direktverd.	1274	15,4	1181	14,1	937	13,0	794	12,2	705	10,5
Heizungs-WP erdgekoppelt		**8288 Stk.**		**8353 Stk.**		**7212 Stk.**		**6482 Stk.**		**6699 Stk.**	
Heizungs-WP gesamt		**10.884 Stk.**		**13.133 Stk.**		**12.286 Stk.**		**11.471 Stk.**		**12.259 Stk.**	
% Anteil erdgekoppelt		**76,1 %**		**63,6 %**		**58,7 %**		**56,5 %**		**54,6 %**	

W/W: Wasser/Wasser; S/W: Sole/Wasser; Direktverd.: Direktverdampfer

Tab. 25.2 Erdgekoppelte Heizungswärmepumpen nach Leistungsklassen (2012–2014). (Biermayr 2014–2015)

Leistungsklassen		2012		2013		2014	
		Stk.	[%]	Stk.	[%]	Stk.	[%]
bis 10 kW	W/W	304	4,56	267	4,40	227	4,43
	S/W	1990	29,84	1638	26,96	1476	28,78
	Direktverd.	336	5,04	283	4,66	299	5,83
10–20 kW	W/W	600	9,00	458	7,54	390	7,61
	S/W	2557	38,34	2226	36,64	1739	33,91
	Direktverd.	388	5,82	432	7,11	410	8,00
20–50 kW	W/W	116	1,74	148	2,44	101	1,97
	S/W	272	4,08	385	6,34	290	5,66
	Direktverd.	4	0,06	77	1,27	78	1,52
> 50 kW	W/W	41	0,61	73	1,20	49	0,96
	S/W	59	0,88	86	1,42	67	1,31
	Direktverd.						
Industrie-WP	W/W	1	0,01	2	0,03	2	0,04
	S/W	1	0,01				
	Direktverd.						
Gesamt	W/W	1062	15,9	948	15,6	769	15,0
	S/W	4879	73,2	4335	71,4	3572	69,7
	Direktverd.	728	10,9	792	13,0	787	15,3
Heizungs-WP erdgekoppelt		**6669 Stk.**		**6075 Stk.**		**5128 Stk.**	
Heizungs-WP gesamt		**14.646 Stk.**		**14.340 Stk.**		**14.292 Stk.**	
% Anteil erdgekoppelt		**45,5 %**		**42,4 %**		**35,9 %**	

W/W: Wasser/Wasser; S/W: Sole/Wasser; Direktverd.:Direktverdampfer

Auf Basis der erhobenen Daten geht Macho davon aus, dass im Durchschnitt pro EWS-Projekt 2,2 Erdwärmesonden errichtet werden.

Zur Abschätzung der Gesamtbohrmeter an Erdwärmesonden wurden auf Grundlage des Ansatzes von Macho (2011) die aus den Marktstatistiken (Faninger 2006, 2007 und Biermayr 2008–2015) vorliegenden jährlichen Absatzzahlen (Stückzahl Sole-Wasser-Heizungswärmepumpen) für den Zeitraum 2001–2014 in Bohrmeter umgerechnet. Der Berechnung zugrunde gelegt wurden der für 2010 ermittelte Anteil der EWS-Projekte an den Sole-Wasser-Heizungs-WP von 70,5 % und eine Bohrmeteranzahl je Projekt von 165 m.

Die Berechnung ergibt für den Zeitraum 2001–2008 eine Steigerung bei der Neuerrichtung von EWS-Anlagen von 725 Stück (ca. 120.000 Bohrmeter; 2001) auf 4000 Projekte

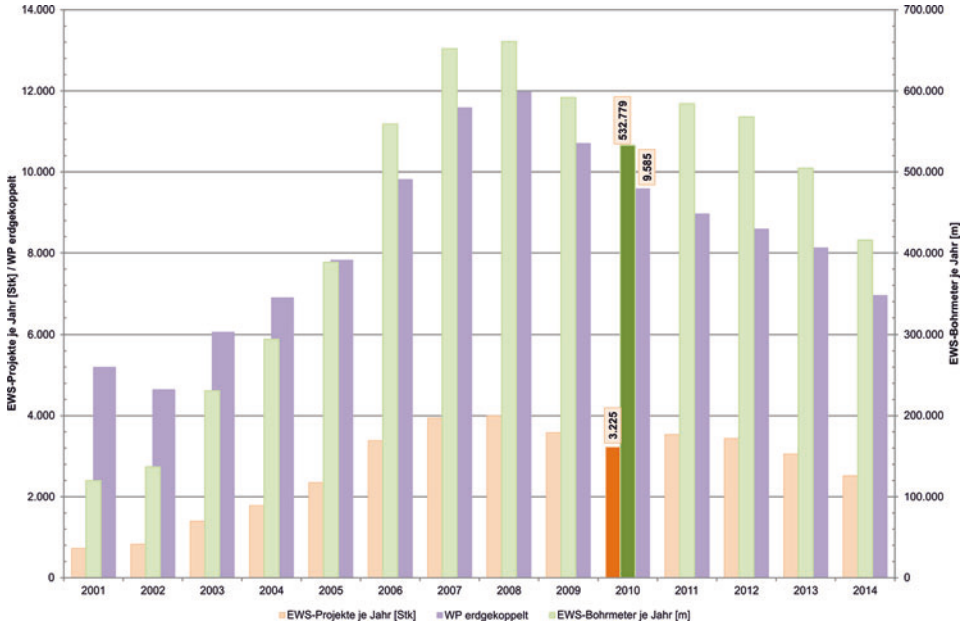


Abb. 25.7 Hochrechnung Entwicklung der EWS-Projekte (Anzahl, Bohrmeter) im Vergleich zur Anzahl der erdgekoppelten Wärmepumpen in Österreich (2001–2014, Ausgangspunkt: Daten für 2010; Macho 2011)

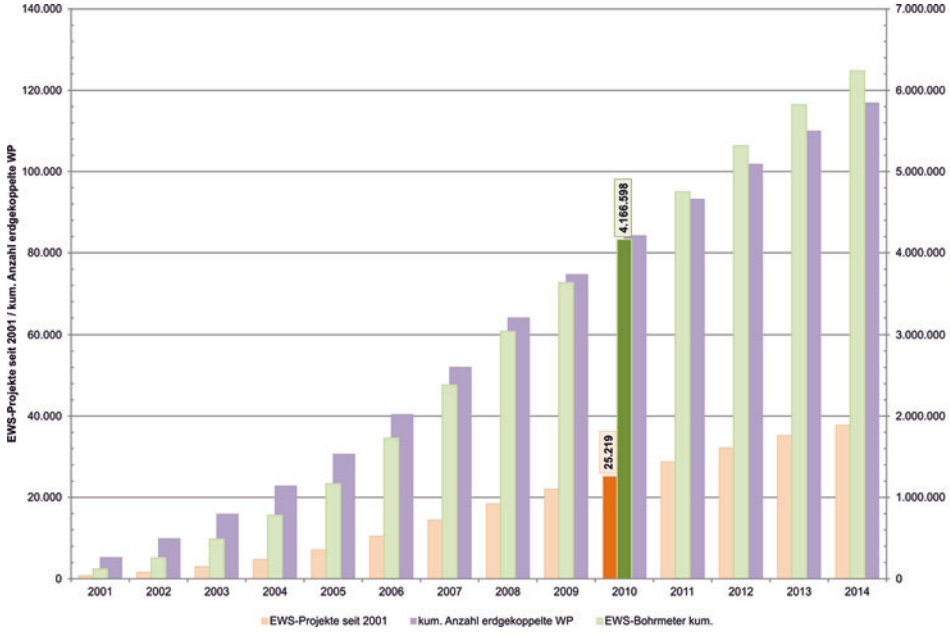


Abb. 25.8 Hochrechnung Entwicklung der EWS-Projekte (Anzahl, Bohrmeter) im Vergleich zur Anzahl der erdgekoppelten Wärmepumpen in Österreich (2001–2014, Darstellung der kumulativen Mengen, Ausgangspunkt: Daten für 2010; Macho 2011)

mit knapp 661.000 Bohrmetern (2008). Seit 2009 sind diese Zahlen rückläufig und erreichen 2014 nur mehr 2517 EWS-Projekte mit knapp 416.000 Bohrmetern. Mit Ende 2014 beträgt die rechnerisch ermittelte Gesamtbohrlänge für Erdwärmesonden in Österreich 6,24 Mio. Meter (Abb. 25.8). Damit wurden in den letzten 4 Jahren in Österreich näherungsweise 2 Mio. Meter Erdwärmesonden errichtet.

Macho (2011) zieht eine durchschnittliche spezifische EWS-Entzugsleistung je Bohrmeter von 50 W für seine Berechnungen heran. Daraus ergibt sich mit Stand 2010 eine errechnete installierte EWS-Entzugsleistung von insgesamt 208 MW, die sich bis 2014 auf 312 MW bei einem durchschnittlichen Zuwachs von 22 MW/Jahr gesteigert hat. Unter Berücksichtigung einer Jahresarbeitszahl von 3,5 resultiert daraus eine thermische Gesamtleistung der österreichischen Erdwärmesondenanlagen von rund 430 MW.

Literatur

Amt der Steiermärkischen Landesregierung: Strategiepapier. Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefsonden). FA19A Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft, im Einvernehmen mit den zuständigen Amtssachverständigen der FA17B und FA17C, 28 S., Graz (2011)

Biermayr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Weiss, W., Bergmann, I., Fechner, H., Glück, N.: Erneuerbare Energie in Österreich Marktentwicklung 2007. Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 19/2008, S. 65. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2008)

Biermayr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Weiss, W., Glück, N., Stukelj, S., Fechner, H.: Erneuerbare Energie in Österreich Marktentwicklung 2008. Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen, S. 75. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2009)

Biermyr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Ehrig, R., Strasser, C., Wörgetter, M., Prüggler, N., Fechner, H., Nurschinger, M., Weiss, W., Eberl, M.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2009. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 15/2010, S. 138. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2010)

Biermayr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Eberl, M., Ehrig, R., Fechner, H., Galosi, A., Kristöfel, C., Prüggler, N., Strasser, C., Weiss, W., Wörgetter, M.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2010. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 26/2011, S. 165. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2011)

Biermayr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Eberl, M., Ehrig, R., Fechner, H., Kristöfel, C., Neuhauser, P. E., Prüggler, N., Sonnleitner, A., Strasser, C., Weiss, W., Wörgetter, M.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2011. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 12/2012, S. 171. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2012)

Biermayr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Eberl, M., Ehrig, R., Fechner, H., Kristöfel, C., Leonhartsberger, K., Martelli, S., Strasser, C., Weiss, W., Wörgetter, M.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2012. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen.- Berichte aus Energie- und Umweltforschung 17/2013, S. 180. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2013)

Biermayr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Kristöfel, C., Leonhartsberger, K., Maringer, F., Moidl, S., Strasser, C., Weiss, W., Wörgetter, M.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2013. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 26/2014, S. 211. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2014)

Biermayr, P.: Marktentwicklung Wärmepumpen. In: Biermayr, P., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Kristöfel, C., Leonhartsberger, K., Maringer, F., Moidl, S., Schmidl, C., Strasser, C., Weiss, W., Wopienka, E.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2014. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 11/2015, S. 238. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2015)

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 – NGP 2009, S. 225. Wien www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/plan_gewaesser_ngp/nationaler_gewaesserbewirtschaftungsplan-ngp/ngp.html (2010). Zugegriffen: 12. Jan. 2016

Faninger G.: Der Wärmepumpenmarkt in Österreich 2005, S. 10. Kurzfassung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie BMVIT. Wien (2006)

Faninger G.: Der Wärmepumpenmarkt in Österreich im Jahr 2006. In: Faninger, G., Bergmann, I. & Kranzl, L.: Erneuerbare Energie in Österreich Marktentwicklung 2006. Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Erhebung für die Internationale Energie-Agentur (IEA). Berichte aus Energie- und Umweltforschung 11/2007, S. 144. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (2007)

Goldbrunner, J.: Tiefengrundwässer im Oberösterreichischen Molassebecken und im Steirischen Becken. Steir.Beitr.z.Hydrogeologie **39**, 5–94 (1988)

Grimm, M., Stober, I., Kohl, T., Blum, P.: Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg. Grundwasser **19**, 275–286 (2014)

Kaltschmitt, M., Streicher, W. (Hrsg.): Regenerative Energien in Österreich. Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung, S. 652. Springer Verlag, Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2009)

Macho, A.: Erdgekoppelte Wärmepumpen in Österreich, ihr Beitrag zum Energievorkommen, S. 146. Dipl.-Arbeit., FH Burgenland, Pinkafeld, 30.07.2011 (2011)

Mayer, J., Sachsenhofer, R. F.: Shallow Hydrocarbons in Lower Austria: A Drilling Hazard and a valuable Exploration Tool. Austrian Journal of Earth Sciences **106**(1), 62–71, 2013 (2013)

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband: Brunnen in gespannten Grundwässern – Neuerrichtung, Sanierung und Rückbau. ÖWAV-Regelblatt, Wien (2015)

Schreilechner, M., Eichkitz, C.: Imaging of a shallow gas horizon using high-resolution reflection seismic with urban Vienna, Austria. The Leading Edge, Special Section: Urban Geophysics. **32**(3), 284–290 (2013)

Statistik Austria: Statistisches Jahrbuch Österreich 2015., www.statistik.at/web_de/services/stat_jahrbuch/ (2015). Zugegriffen: 11. Dez. 2015

Oberflächennahe Geothermie in der Schweiz 26

Katharina Link und Roland Wyss

Inhaltsverzeichnis

26.1 Einleitung . . . 756
26.2 Bevölkerung . . . 757
26.3 Geologie, Auswirkung auf Nutzung . . . 758
26.4 Historische Entwicklung der Oberflächennahen Geothermie . . . 759
26.5 Vollzugshilfen, technische Normen . . . 759
26.5.1 BAFU-Vollzugshilfe «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund» . . . 762
26.5.2 SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden . . . 762
26.5.3 SIA-Norm 384/7 Grundwasserwärmenutzung . . . 763
26.6 Qualitätssicherung: Prüf- und Anlaufstellen, Zertifikate, Gütesiegel . . . 764
26.6.1 Qualitätssicherung in der Schweiz . . . 764
26.6.2 Schweizer Wärmepumpen-Testzentrum . . . 765
26.6.3 Wärmepumpendoktor . . . 765
26.6.4 FWS Fachpartner mit Zertifikat . . . 766
26.6.5 Wärmepumpen-Gütesiegel . . . 766
26.6.6 Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen . . . 766
26.6.7 Wärmepumpen-System-Modul . . . 767
26.6.8 Workshops Qualitätskontrolle, Informationsaustausch . . . 768
26.7 Rechtsgrundlagen . . . 770
26.8 Fördermaßnahmen . . . 771
26.9 Geothermische Energienutzung . . . 771

Katharina Link (✉)
GEOTHERMIE-SCHWEIZ, Informationsstelle Deutschschweiz, Rebstrasse 3,
CH-8500 Frauenfeld, Schweiz
e-mail: info@geo-future.expert

Roland Wyss
GEOTHERMIE-SCHWEIZ, Informationsstelle Deutschschweiz, Zürcherstrasse 105,
CH-8500 Frauenfeld, Schweiz
e-mail: wyss@rwgeo.ch

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_26

26.10 Aktueller Stand der Oberflächennahen Geothermiebranche 774
26.11 Forschung 774
26.12 Nachhaltigkeit im urbanen Bereich 775
26.13 Künftige Entwicklung 776
Literatur 777

Zusammenfassung

Die Oberflächennahe Geothermie in der Schweiz ist eine Erfolgsgeschichte mit bis zu zweistelligen Wachstumsraten. Die größten Einschränkungen bewirken Grundwasservorkommen als Trinkwasserreservoire. Verschiedene Vollzugshilfen und technische Normen unterstützen die fachgerechte Ausführung beim Bau von Anlagen. Die Qualitätssicherung hat einen enormen Stellenwert in der Schweiz. Prüf- und Anlaufstellen sowie verschiedene Zertifikate bzw. Gütesiegel sind die wichtigsten Qualitätssicherungsmaßnahmen. Die Schweizer Geothermiebranche verfolgt unter dem Dachverband Geothermie-Schweiz verschiedenste Projekte zur Förderung der Geothermie. Forschungsinnovationen werden vorangetrieben und auch die Nachhaltigkeit im urbanen Bereich ist jüngst in den Fokus der Schweizer Geothermiebranche gerückt. Die Oberflächennahe Geothermie wird in der Schweiz auch zukünftig eine wichtige Rolle bei der Gebäudeklimatisierung spielen. Dies beruht insbesondere auf hohem Umweltbewusstsein, verbreitetem Wissen über die Systeme sowie hoher Motivation und Innovationsfreudigkeit von Bauherren, Unternehmen und Interessenverbänden.

Schlüsselwörter

Geologie · Erdwärmesonden · Markt Schweiz · Qualitätssicherung · SIA-Norm, Gütesiegel · Nachhaltigkeit

26.1 Einleitung

Die Oberflächennahe Geothermie in der Schweiz ist eine Erfolgsgeschichte mit teilweise zweistelligen Zuwachsraten. Seit Jahren gehört die Schweiz zur Weltspitze: Nirgends auf der Welt ist eine höhere Dichte an oberflächennahen Anlagen zu finden. Neben den beliebten Erdwärmesonden (EWS) sind auch Grundwasserwärmenutzungen sowie Erdregister, Erdwärmekörbe und Geostrukturen zu finden. Die große Beliebtheit von EWS und die damit verbundene hohe Anlagendichte in den städtischen Regionen wirft in jüngster Zeit die Frage nach einer nachhaltigen Bewirtschaftung auf.

Erneuerbare Energie nimmt heute in der Schweiz eine wichtige Stellung ein. Seit dem Jahr 1990 ist die Energiepolitik in der Schweizerischen Verfassung verankert: der Bund und die Kantone setzen sich für eine ausreichende, breit gefächerte, sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung sowie für einen sparsamen und rationellen Energieverbrauch ein.

Erneuerbare Energiequellen sind im Wärmebereich für den Ersatz fossiler Brennstoffe gefragt, während die Schweizer Stromversorgung mit ungefähr 50 % Wasserkraft und ca.

50 % Atomkraft lange als klimafreundlich und damit zukunftsfähig eingestuft wurde. Die Energiestrategie 2050 des Bundes ist maßgeblich durch die Ereignisse von Fukushima und dem daraufhin im Jahr 2011 beschlossenen Ausstieg aus der Atomkraft durch den Schweizer Bundesrat geprägt. Die Energiestrategie 2050 ist insbesondere auf die Stromversorgung ausgerichtet und tangiert die Oberflächennahe Geothermie daher nur indirekt via die kantonalen Energiestrategien.

26.2 Bevölkerung

In der Schweiz leben aktuell (2016) gut 8,5 Mio. Menschen auf einer Landesfläche von rund 41.000 km^2(Abb. 26.1). Mit einer Wachstumsrate von über 1 % ist das Bevölkerungswachstum eines der größten in Europa. Der überwiegende Anteil der Bevölkerung lebt im Schweizer Mittelland, das sich von Genf im Westen über Bern und Zürich bis an den Bodensee erstreckt. Dadurch ergibt sich dort eine hohe bis sehr hohe Bevölkerungsdichte, welche in der Regel zwischen 200 bis über 2000 Einwohner pro Quadratkilometer liegt. Im Gegensatz dazu leben im Bereich der Alpen meist weniger als 50, und in den Voralpen und im Faltenjura im Nordwesten nur selten mehr als 100 Einwohner pro Quadratkilometer. Dies hat maßgeblichen Einfluss auf den Wärme- bzw. Kühlbedarf.

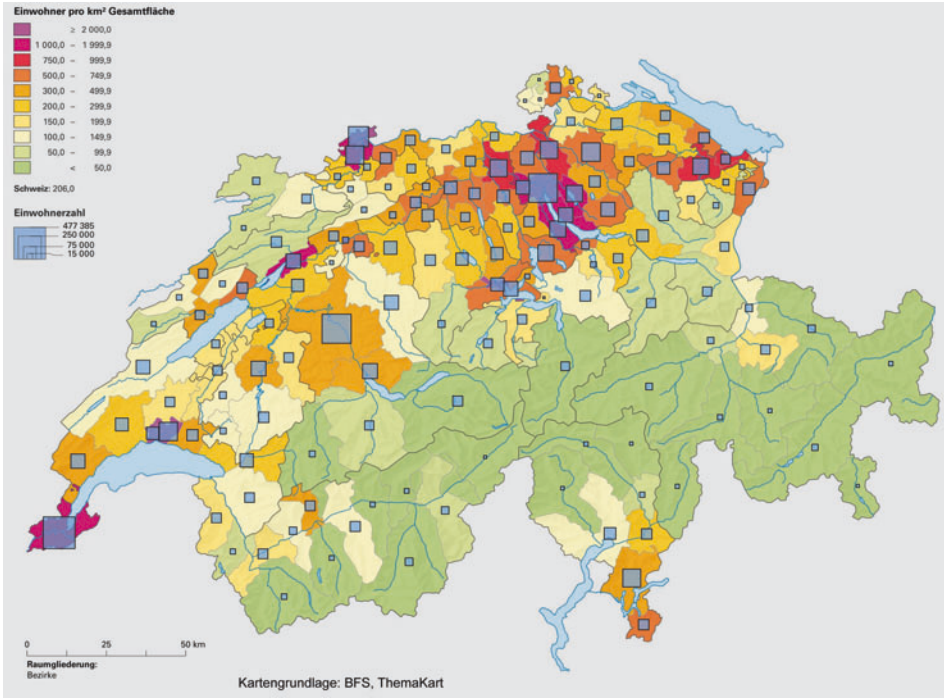


Abb. 26.1 Bevölkerungsdichte in der Schweiz im Jahr 2014. (Quelle: Bundesamt für Statistik BFS)

26.3 Geologie, Auswirkung auf Nutzung

Geologisch-tektonisch unterteilt sich die Schweiz grob in drei Bereiche (Abb. 26.2). Dies sind der Tafel- und der Faltenjura (auch Jura plissé genannt) im Nordwesten und Norden des Landes, das Schweizer Molassebecken (Mittelland) und das Südende des Oberrheingrabens (bzw. Fossé rhénan) sowie die Alpenregion, welche die gesamte südliche Hälfte der Schweiz einnimmt. Das kristalline Grundgebirge mit eingeschalteten permokarbonen Sedimenten tritt unmittelbar nördlich der Landesgrenze Schweiz-Deutschland im Schwarzwald zutage. Von dort fällt das Grundgebirge nach Süden unter dem Molassebecken in immer größere Tiefen ein. Erst in den Alpen tritt es in den Massiven wieder an der Erdoberfläche zutage. Das Grundgebirge wird überdeckt von den mächtigen Sedimenten des Mesozoikums, die im Jura an der Oberfläche anstehen. Im Gebiet des Molassebeckens überlagern, mit nach Süden zunehmender Mächtigkeit, tertiäre Sedimente das Mesozoikum. Lokal sind zudem quartäre Lockergesteine zu finden, die in manchen Regionen mehrere Hundert Meter mächtige Talfüllungen aufbauen können.

Diese Geologie der Schweiz ist mit möglichen Risiken bzw. Einschränkungen für die Oberflächennahe Geothermie verbunden.

Speziell im Jura sind vermehrt geologisch anspruchsvolle Gesteinseinheiten zu finden, die die Installation von oberflächennahen Anlagen erschweren oder verhindern.

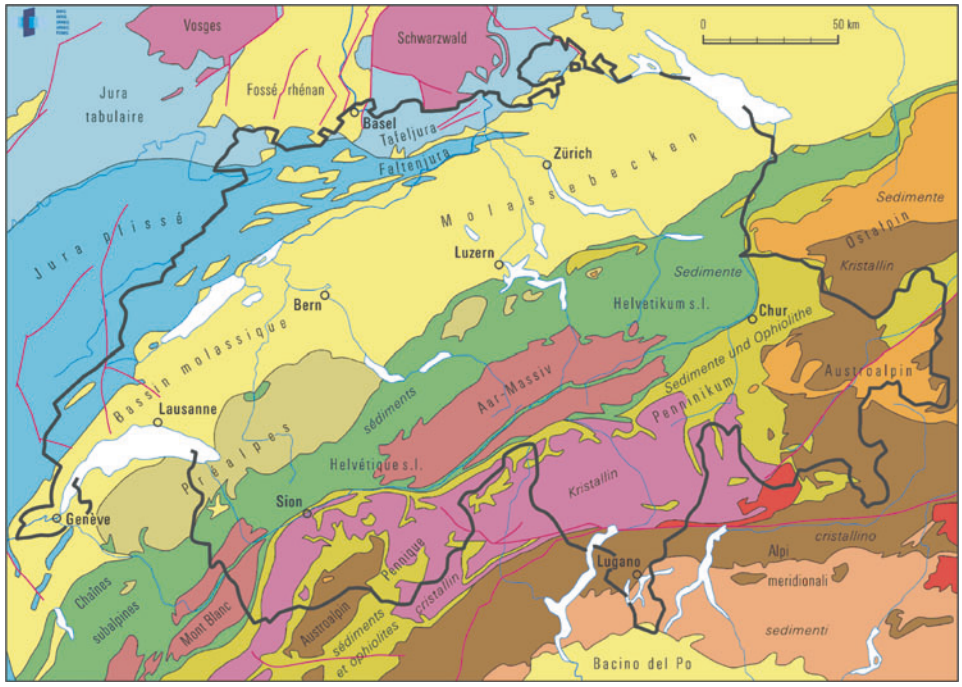


Abb. 26.2 Geologisch-tektonische Übersicht der Schweiz. (Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo)

Hierzu zählen zum Beispiel Karstgebiete oder quellfähige Gesteinsschichten (Anhydrit). Insbesondere in den Alpen sind hingegen Rutschungen ein Thema. Im gesamten Mittelland und den Voralpen, aber auch in den anderen Regionen der Schweiz, können oberflächennah Erdgasvorkommen vorliegen. Zudem sind in der ganzen Schweiz lokal Arteser möglich.

Im Schweizer Mittelland, im dem der überwiegende Teil der Bevölkerung lebt und wo damit das größte Potenzial für die Oberflächennahe Geothermie besteht, befinden sich in den Lockergesteinsserien der Täler teilweise mächtige Grundwasservorkommen. In der Schweiz kommt dem Schutz des Grundwassers als Trinkwasserreservoir oberste Priorität zu, sodass in diesen Teilen des Mittellandes zum großen Teil keine Bohrungen für Erdwärmesonden (EWS) oder auch Grundwassernutzungen möglich sind oder aber umfassendere Auflagen erfüllt werden müssen. Der Praxisvollzug unterscheidet sich deutlich von Kanton zu Kanton.

26.4 Historische Entwicklung der Oberflächennahen Geothermie

Die Erfolgsgeschichte der Oberflächennahen Geothermie in der Schweiz begann Anfang der 1980er Jahre. Aufgrund der steigenden Nachfrage erkannten Experten und Behörden die Notwendigkeit von Vollzugshilfen und technischen Normen (► Abschn. 26.5). Im Jahr 1990 schlossen sich die Förderer und Freunde der Geothermie zusammen und gründeten Geothermie-Schweiz, die Schweizerische Vereinigung für Geothermie. Erdwärmesonden (EWS) sind in der Schweiz mit großem Abstand die beliebteste Form der Oberflächennahen Geothermiesysteme, sie machen den allergrößten Teil der Sole-Wasser-Anlagen aus. Weitere Systeme wie Geostrukturen sind relativ selten in der Schweiz. Nach anfänglich niedrigen Zuwachsraten der Sole-Wasser-Anlagen nahmen diese seit Beginn der 1990er Jahre exponentiell zu. Im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrtausends erreicht der jährliche Zuwachs zweistellige Prozentwerte. In den letzten Jahren ging der jährliche Zubau an Anlagen zurück und lag zuletzt bei rund 5 % Wachstum (Abb. 26.3).

Die Erfolgsgeschichte der EWS-Anlagen spiegelt sich auch in der Statistik zur jährlich produzierten Heizenergie wider. Bereits seit Anfang der 1990er Jahre produzieren diese Systeme mehr Heizenergie pro Jahr als die in der Schweiz beliebten Thermalbäder (Abb. 26.4). Auch Grundwasserwärmenutzungen haben im Verlauf der letzten 25 Jahre zugenommen, allerdings ist deren Anteil aufgrund der restriktiven Gewässerschutzgesetzgebung immer noch relativ gering.

26.5 Vollzugshilfen, technische Normen

In den 1980er Jahren wurden in der Schweiz mehrere Tausend Erdwärmesonden installiert, wobei damals noch koaxiale Sonden eingesetzt wurden. Die Auslegung dieser mit Wärmepumpen gekoppelten Heizsysteme erfolgte damals weitgehend auf empirischer

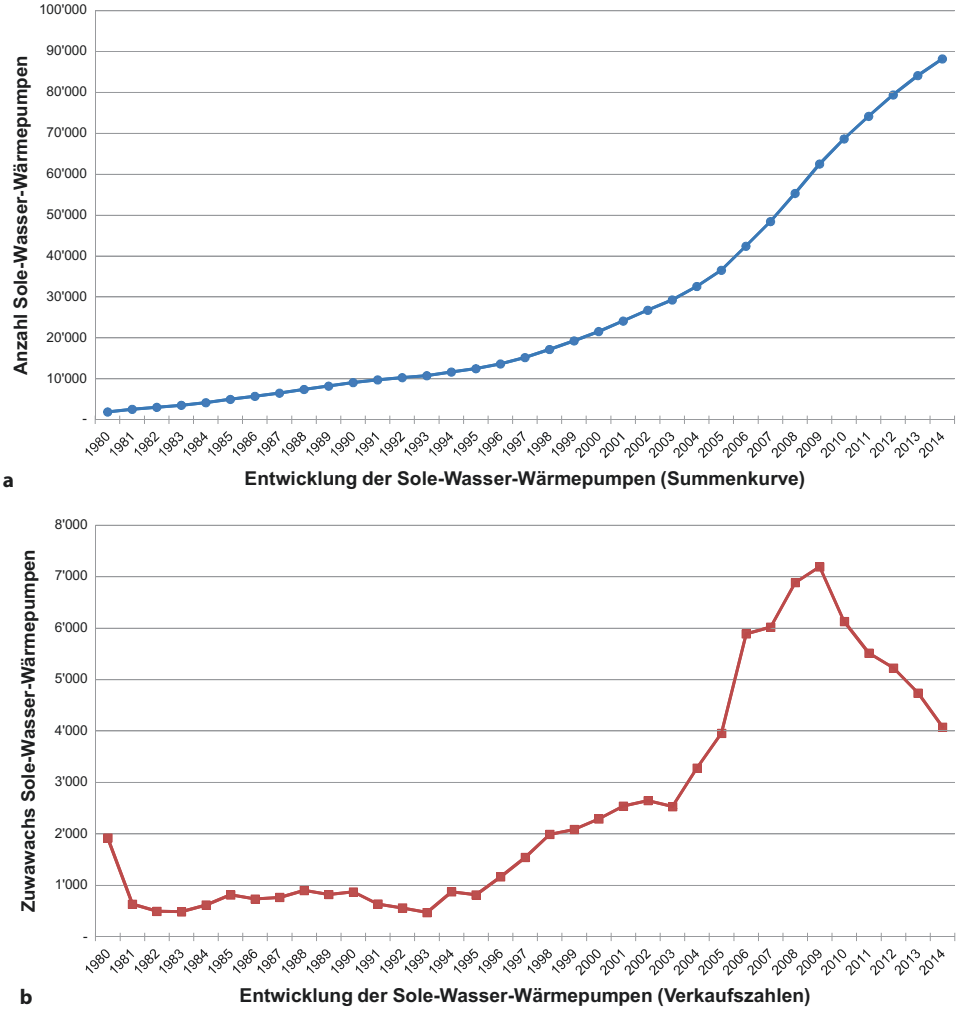


Abb. 26.3 Historische Entwicklung von Sole-Wasser-Systemen in der Schweiz seit 1980: Wachstumskurve (a) bzw. Verkaufszahlen in den einzelnen Jahren (b); Zahlen gemäß der Elektro-Wärmepumpen-Statistik bzw. der Schweizer Geothermie-Statistiken

Basis. Durch die zunehmende Anzahl an Anlagen wurden seit 1983 theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen solcher Systeme zu erarbeiten. Mithilfe der Messresultate (Betriebsdaten, Bodentemperaturprofile) wurden erste Computerprogramme „geeicht“, womit weitergehende Simulationsrechnungen durchgeführt werden konnten. Dazu gehören das Langzeitverhalten der EWS-Anlagen sowie die Temperaturentwicklung im umgebenden Erdreich. Seit 1984 sind in der Reihe *Dokumentation SIA* zahlreiche für die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie relevante Publikationen erschienen.

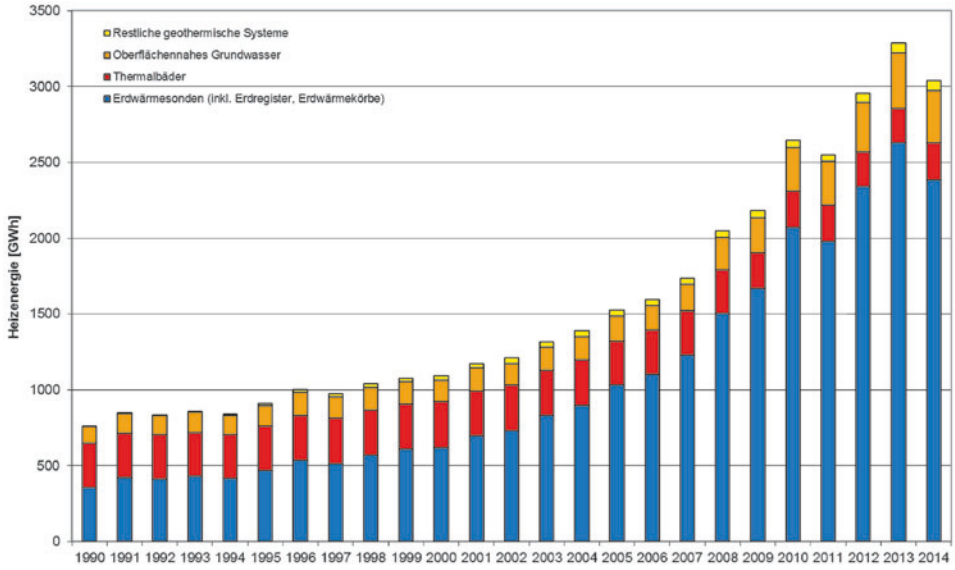


Abb. 26.4 Heizenergie (Wärmeproduktion, effektive Betriebsdaten) aller geothermischen Systeme seit 1990, basierend auf den Daten der Elektro-Wärmepumpen-Statistik und auf Angaben von Anlagebetreibern. (Quelle: Imhasly et al. 2015 [3])

1994 publizierte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine erste *Wegleitung für die Wärmenutzung mit geschlossenen Erdsonden*. Angesichts der starken Zunahme von EWS seit Mitte der 1990er Jahre wurde diese Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute überarbeitet. Die heute gültige Fassung von 2009 *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund* befasst sich mit den Anforderungen des Gewässerschutzes an Oberflächennahe Geothermieanlagen. Ziel ist, den qualitativen und quantitativen Schutz der Grundwasservorkommen zu gewährleisten. Dieser Aspekt ist in der Schweiz von zentraler Bedeutung.

Parallel zur Vollzugshilfe des BAFU wurde, initiiert durch die Geothermiebranche, vom Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein die SIA-Norm 384/6 *Erdwärmesonden* erarbeitet, welche die technischen Aspekte für Planung, Ausführung und Betrieb der verschiedenen Typen von Oberflächennahen Geothermieanlagen vollständig behandelt.

2015 wurde eine entsprechende Norm für *Grundwassernutzungen* herausgegeben (SIA-Norm 384/7). Hiermit sind die beiden häufigsten Nutzungsarten der Oberflächennahen Geothermie in der Schweiz definiert und die qualitativ hohen Ansprüche gesichert.

Ziel der beiden SIA-Normen ist, die Anforderungen und Qualitätskriterien an das Bauwerk sowie die Abgrenzung gegenüber anderen Gewerken zu regeln, um den Bauherren ein Gesamtsystem übergeben zu können, welches über die gesamte berechnete Lebensdauer funktioniert. Die Normen richten sich in erster Linie an Planer und Ausführende, die SIA-Norm *Erdwärmesonden* enthält aber auch Hinweise für Bauherren.

26.5.1 BAFU-Vollzugshilfe «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund»

Ziel der Vollzugshilfe *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund* des BAFU ist der qualitative und quantitative Schutz der Grundwasservorkommen. Sie richtet sich an die verantwortlichen Behörden sowie Fachleute im Bereich der Oberflächennahen Geothermienutzung.

Im Einzelnen erläutert die Vollzugshilfe folgende Aspekte:

- Regelungsbereich und Rechtsgrundlagen,
- Zulässigkeiten und Empfehlungen,
- Technische Kapitel zu den verschiedenen Nutzungen:
  - Erdwärmesonden
  - Erdregister, Wärmekörbe, Energiepfähle,
  - Grundwassernutzung.

In jedem der drei technischen Kapitel wird auf die jeweilige Problematik in Hinblick auf den Gewässerschutz, die Standortbeurteilung, die Gebietszulässigkeiten sowie auf allgemeine und spezifische Auflagen eingegangen.

Im Anhang finden sich Systembeschreibungen, Schemata, Vorlagen für Gesuchsformulare und Protokolle, Hinweise an die Bauherrschaft, eine Liste geeigneter Wärmeträgerflüssigkeiten, die Anforderungen an die Hinterfüllung von Erdwärmesonden sowie Empfehlungen zum Bewilligungsverfahren.

26.5.2 SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden

Die vom Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein herausgegebene SIA-Norm 384/6 *Erdwärmesonden* gilt für alle geschlossenen Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfelder bis in eine Tiefe von 400 m unter der Erdoberfläche. Die Norm umfasst das Heizen und Kühlen von Gebäuden, die unterirdische Wärmespeicherung, den Betrieb mit und ohne Wärmepumpe, den monovalenten Betrieb oder eine Kombination mit anderen Energiequellen.

Die Norm beschränkt sich auf den Primärkreislauf von Sole-Wasser-Wärmepumpen (Erdwärmesondenkreis), die Systemgrenze bildet der Eingang der Wärmepumpe. Die Auslegung der Wärmepumpe und des Wärmeverteilungsnetzes ist nicht Bestandteil der Norm.

Die Planung, Ausführung und der Betrieb haben in der Schweiz nach der SIA-Norm 384/6 zu erfolgen. Die Norm erläutert folgende Aspekte im Detail:

- Geltungsbereich,
- Verständigung (Definitionen, Begriffe, Einheiten etc.),
- Projektierung,

- Berechnung und Auslegung (Anforderungen an die Auslegung, Berechnung, Hydraulikberechnung, Systemoptimierung etc.),
- Anforderungen an Baustoffe und Konstruktion (Rohrmaterial, Verbindungstechnik, Abdichtung, Wärmedämmung, Wärmeträger, Sicherheitseinrichtung, Messgrößen Betrieb),
- Ausführung (Bohrausrüstung, Bohrung, Einbau, Hinterfüllung, Anschluss und Füllen der Sonde, Dokumentation auf der Anlage),
- Prüfungen (Erdwärmesonde, Rohrverbindungen, Frostschutz),
- Betrieb und Wartung (Wartung, Abweichung Wärmebedarf, Bauheizung, Bauaustrocknung, Stilllegung).

Normative und informative Vorlagen und Vorgaben sind im umfassenden Anhang enthalten:

- Protokolle und Bohrprofil,
- Prüfungen (Durchfluss-, Dichtheitsprüfung),
- Kennwerte (Bodentemperatur, Bodenoberflächentemperatur, Boden- und Stoffkennwerte, Wärmeträger),
- Projektierungshinweise (Bewilligung, Geologie, Berechnungsverfahren einfache bzw. komplexe Verfahren, Druckverlustberechnung),
- Ausrüstung der Bohrunternehmung (Standardausrüstung, Ausrüstung bei Arteser- bzw. Gasintervention),
- Ausführung (Bohrverfahren, Hinterfüllung, Anschluss der Sonde, Spüldauer).

Aktuell finden Überlegungen statt, die SIA-Norm 384/6 zu überarbeiten, um insbesondere den Aspekt der Nachhaltigkeit im urbanen Raum angemessen zu berücksichtigen.

26.5.3 SIA-Norm 384/7 Grundwasserwärmenutzung

Aufgrund der stetig steigenden Anzahl an Grundwassernutzungen wurde die SIA 384/7 *Grundwasserwärmenutzung* erarbeitet. Die Norm umfasst alle untertägigen Anlagenteile sowie die obertägigen Teile bis zum Verdampfer bzw. Wärmeüberträger. Die Norm geht auf Heizen und Kühlen von Gebäuden oder Prozessen ein, nicht jedoch auf die saisonale Wärme- oder Kältespeicherung, da es hierfür spezieller hydrogeologischer Voraussetzungen und Planungen bedarf.

Die Grundwassernutzungsnorm geht ein auf:

- Geltungsbereich,
- Verständigung (Definitionen, Begriffe, Indizes etc.),
- Projektierung (Nutzungsarten, Wasserrecht, Grundwasserschutz, Bewilligungsverfahren, Standortfaktoren, hydrogeologische Voraussetzungen und Standorterkundung),

- Berechnung und Auslegung (Anforderungen Dimensionierung, hydraulische Brunnenbemessung, technische Bemessung für Entnahmebrunnen, technische Bemessung für Rückgabebrunnen und Versickerungsanlagen, Abstand zwischen Entnahme und Rückgabe, Abschätzung der hydraulischen und thermischen Reichweiten der thermischen Nutzung),
- Anforderungen an Anlagen (Allgemeine Anforderungen, Entnahmebrunnen, Förderbrunnen, Förderpumpe, Rohrleitungen und Filtertechnik, Anlagenprinzip und Wärmeüberträger, Rückgabebauwerk),
- Ausführung, Prüfung und Betrieb (Brunnenbau, Entsandung und Brunnenentwicklung, Rückgabebauwerk, weitere Anlagenbauteile, Abnahme und Übergabe der Anlage, Betrieb und Instandhaltung),
- Stilllegung.

Im Anhang sind informative und normative Angaben und Vorlagen zu folgenden Themen zu finden:

- Organisation,
- Protokolle,
- Brunnen und Rückgabebauwerke,
- Prozesse und Kennwerte,
- Projektierungshinweise,
- Anforderungen an die Wasserbeschaffenheit,
- Hinweise zur Filter- und Bohrtechnik,
- Nachweis der Sandfreiheit.

Die Norm enthält keine Aussagen zu wasserrechtlichen Belangen sowie den kantonalen Konzessions- und Bewilligungsverfahren einschließlich deren Umsetzungen.

26.6 Qualitätssicherung: Prüf- und Anlaufstellen, Zertifikate, Gütesiegel

26.6.1 Qualitätssicherung in der Schweiz

Die Sicherung der hohen Qualität und Effizienz ist in der Schweiz ein elementares Anliegen der Branche, der Fachvereinigungen Geothermie-Schweiz und Wärmepumpen Schweiz (FWS) sowie des Bundes und der Kantone.

Mit folgenden Prüf- und Anlaufstellen bzw. Zertifikaten und Gütesiegeln soll die Qualitäts- und Effizienzgewährleistung garantiert werden:

- Wärmepumpen-Testzentrum,
- Wärmepumpendoktor der FWS,

- FWS Fachpartner mit Zertifikat,
- Wärmepumpen-Gütesiegel,
- Gütesiegel Erdwärmesonden-Bohrfirmen,
- Wärmepumpen-System-Modul.

Die Zertifizierung und Gütesiegelverleihung erfolgt durch die Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS; www.fws.ch). Förder- und Anreizprogramme des Bundes, der Kantone und der Energieversorgungsunternehmen sind in der Regel an das Wärmepumpen-Gütesiegel gebunden.

26.6.2 Schweizer Wärmepumpen-Testzentrum

Das Wärmepumpen-Testzentrum Buchs (WPZ) ist ein akkreditiertes Prüfzentrum nach EN 17025 und bietet umfassende Prüfleistungen auf dem Gebiet der Wärmepumpentechnik für Produktions- und Handelsunternehmen dieser Branche an.

Die Leistungsprüfung des WPZ umfasst die Ermittlung der Heizleistung sowie der wärmeseitigen Leistungszahlen (COP-Werte). Berücksichtigt werden die Anforderungen der internationalen Prüfnormen EN 14511, EN 14825 oder EN 16147 und die erweiterten Anforderungen des Prüfreglementes der European Heat Pump Association (EHPA) oder des EcoLabels. Mit der am WPZ durchgeführten Wärmepumpenprüfung kann das internationale Gütesiegel erlangt werden.

Das WPZ bietet folgende anerkannte Prüfverfahren:

- EHPA-Prüfreglement,
- EcoLabel-Prüfreglement,
- ErP-Reglemente für Wärmepumpen und Brauchwarmwasser-Wärmepumpen,
- Wärmeverlust nach EnV (Schweizerische Energieverordnung),
- Schallleistungspegelmessung nach EN 9614-2 und EN 12102.

Die Prüfresultate aller Wärmepumpentypen sowie weitere Dokumente sind auf der Webseite des WPZ (www.wpz.ch) veröffentlicht.

26.6.3 Wärmepumpendoktor

Mit einem sogenannten „Wärmepumpendoktor“ bietet die FWS einen Experten, welcher im Falle unzufriedener Wärmepumpeninhaber für eine unabhängige Stellungnahme angefragt werden kann. Die Kontaktdaten des Wärmepumpendoktors sind auf der Webseite der FWS zu finden. Die Praxis zeigt, dass es sich bei den Anliegen meist um geringfügige Mängel handelt, die per Telefonauskunft und einfachen Massnahmen behoben werden können.

26.6.4 FWS Fachpartner mit Zertifikat

Fachlich geschulte Heizungsplaner und Installateure sind entscheidend für qualitativ hochwertig erstellte Erdwärmeanlagen. Hierfür bietet die FWS eine spezielle Ausbildung an, die mit dem Prädikat Fachpartner mit Zertifikat abgeschlossen werden kann. Der Erhalt des Zertifikats setzt die Kurse „Sanieren mit Wärmepumpen“, „Grundlagen der Akustik“ und „Planen und Dimensionieren von Erdwärmesonden“ sowie den erfolgreichen Abschluss der anschließenden Fachprüfung voraus. Das Zertifikat bezieht sich auf Wärmepumpenanlagen in Kleinobjekten und garantiert, dass der Inhaber die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten erkennen, die notwendigen Daten vor Ort erfassen sowie eine Anlage korrekt planen, installieren und in Betrieb nehmen kann.

92 Unternehmen mit mindestens einem Mitarbeiter, dem das Prädikat Fachplaner mit Zertifikat verliehen wurde, sind gegenwärtig bei der FWS in der Datenbank registriert. Dies von insgesamt 365 Firmen, die als Fachpartner durch die FWS erfasst sind.

26.6.5 Wärmepumpen-Gütesiegel

Das Wärmepumpen-Gütesiegel zeichnet in der Schweiz, wie in Deutschland und Österreich, Wärmepumpen aus, welche hohen Ansprüchen genügen. Das Gütesiegelverfahren basiert auf dem Gütesiegel-Reglement der European Heat Pump Association (EHPA) und beinhaltet die europäische Prüfnorm EN 14511. In der Schweiz ist die Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS die vom Bund und den Kantonen anerkannte und verantwortliche Vergabestelle für das Wärmepumpen-Gütesiegel. Das Gütesiegelverfahren wird durch eine unabhängige Gütesiegel-Kommission der FWS durchgeführt. Das Wärmepumpen-Gütesiegel kann einer Wärmepumpe oder Wärmepumpenbaureihe verliehen werden, wenn die Wärmepumpe definierte Anforderungen erfüllt. Neben technischen Aspekten sind auch die Qualität der Planungsunterlagen, die Bedienungsfreundlichkeit sowie die Kundenfreundlichkeit und Garantieleistungen ein Kriterium.

Der Kauf einer mit dem Gütesiegel ausgezeichneten Wärmepumpe gewährleistet dem Verbraucher, dass die Qualität des Produkts hochwertig ist und die Vertriebsfirma die erforderlichen Dienstleistungen (einschließlich Serviceleistungen) bietet. Für Behörden ist das Gütesiegel zudem auch eine Grundlage für Zuschüsse gemäß Förderprogrammen. Es unterstützt auch die Erreichung der gesteckten Energieeffizienzziele im Bereich der Wärmetechnik.

Das Wärmepumpen-Gütesiegel ist gemäß FWS-Datenbank an 58 Unternehmen in der Schweiz verliehen (Stand April 2016). Details zum Wärmepumpen-Gütesiegel sind auf der Webseite des FWS zu finden (www.fws.ch).

26.6.6 Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen

Das Schweizer Gütesiegel soll als Qualitätssicherungssystem für Erdwärmesonden-Bohrfirmen garantieren, dass die Firmen nach dem aktuellen Stand der Technik arbeiten

und die hohen Qualitätsanforderungen an Erdwärmesondenanlagen in Bezug auf Sicherheitsvorschriften und den Gewässerschutz eingehalten werden. Das Gütesiegel beschränkt sich auf alle erdseitigen Arbeiten und Anlagenbauteile.

Die mit dem Gütesiegel ausgezeichneten Firmen verpflichten sich, die in den Normen, Richtlinien und Empfehlungen definierten Anforderungen hinsichtlich des Einsatzes und der Auswahl von Materialien und Geräten sowie bei der Arbeitsausführung zu erfüllen. Die Mitarbeitenden von Gütesiegel-Unternehmen müssen sich regelmäßig durch Weiterbildungskurse fortbilden. Der Umwelt- und Gewässerschutz hat bei der Durchführung von Erdwärmesondenbohrungen einen hohen Stellenwert.

Die FWS stellt auf ihrer Webseite verschiedene Dokumente zur Verfügung. Dazu gehören die Bohr- und Verlegebedingungen sowie auch Vorlagen für das Bohrprotokoll, das Baustellenjournal und die Druckprüfung. Als technische Hilfestellung sind zudem die Merkblätter *Bohrlochpacker*, *Erdwärmesonden-Gewebepacker*, *Erdwärmesonden-Strumpf* und *Permanente Verrohrung* erarbeitet und auf der Webseite aufgeschaltet worden.

Die genauen Regeln sind im Gütesiegel-Reglement festgelegt. Die Einhaltung der Regeln wird durch die Gütesiegelkommission stichprobenweise kontrolliert. Die FWS-Datenbank weist insgesamt 37 Bohrfirmen als Träger des Gütesiegels Erdwärmesonden auf (Stand April 2016).

26.6.7 Wärmepumpen-System-Modul

Das Wärmepumpen-System-Modul (WP-System-Modul) ist ein neuer Standard für die Planung und den Bau von Wärmepumpenanlagen bis ca. 15 kW Heizleistung. Dieser Schweizer Standard baut auf dem bestehenden internationalen Gütesiegel für Wärmepumpen auf. Entwickelt wurde er durch die wichtigsten Branchenakteure in der Schweiz. Die Schweizer Fachverbände sowie EnergieSchweiz (des Bundesamtes für Energie BFE) befürworten und unterstützen den Einsatz des Moduls.

Das Wärmepumpen-System-Modul gewährleistet eine hohe Energieeffizienz der gesamten Wärmepumpenanlage im Betrieb und weist Vorteile gegenüber den herkömmlichen Gütesiegeln auf (Abb. 26.5). Das Wärmepumpen-System-Modul regelt die Abläufe und Zuständigkeiten bei der Planung, Installation und Inbetriebnahme der Anlage zwischen dem Wärmepumpenlieferanten und dem Installateur. Die Komponenten der Gesamtanlage, bestehend aus Wärmequelle (Bohrung, Hinterfüllung, Sonde), Wärmepumpe, Umwälzpumpe, Speicher, Hydraulik, Wärmeabgabesystem, Wassererwärmung und Steuerung/Regelung werden neu in ein aufeinander abgestimmtes Gesamtsystem der Wärmeproduktion eingebracht. Dies steigert die Qualität der Anlage. Beim Wärmepumpen-System-Modul wird die durch den Lieferanten für eine Anlage ausgearbeitete Produktekombination überprüft und zertifiziert. Dies erfolgt ebenfalls durch eine unabhängige Fachkommission der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS).

Im Rahmen der Zertifizierung erhält der Hausbesitzer durch den Installateur nach Abschluss der Arbeiten eine vollständige Anlagendokumentation mit schriftlicher

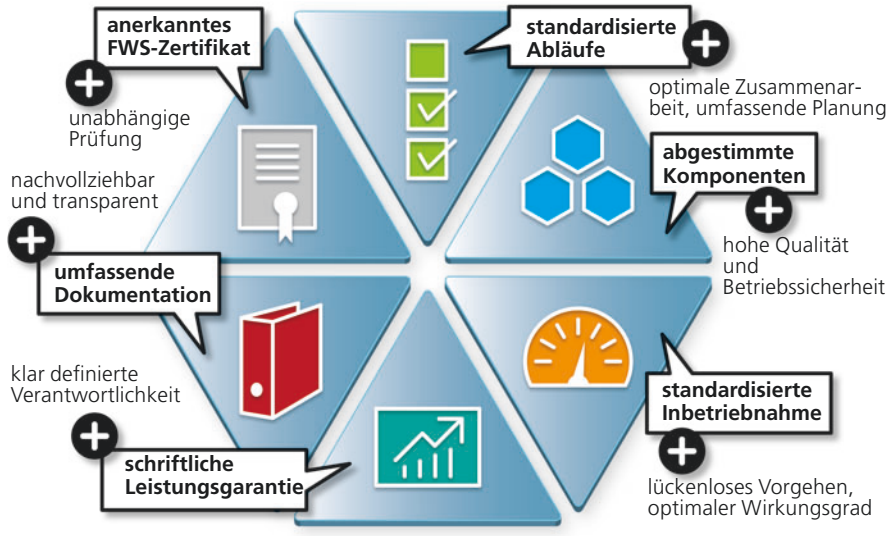


Abb. 26.5 Wärmepumpen-System-Modul: Komponenten und Vorteile. (Quelle: EnergieSchweiz)

Leistungsgarantie. Durch die aufeinander abgestimmten Anlagenkomponenten erhöht sich die Anlageneffizienz bei gleichen Investitionskosten für den Hausbesitzer nachweisbar. Durch die höhere Effizienz sinken gleichzeitig die Betriebskosten durch den niedrigeren Stromverbrauch.

Die bisher angesprochenen kantonalen Behörden begrüßen das neue WP-System-Modul. Das Bundesamt für Energie geht davon aus, dass das Zertifikat mancherorts zur Voraussetzung für die Gewährleistung von Förderbeiträgen werden wird.

26.6.8 Workshops Qualitätskontrolle, Informationsaustausch

Ein entscheidender Faktor bei der Qualitätssicherung von Bohrungen und Anlageninstallationen ist die Ausbildung der begleitenden Geologen. Auch ein einwandfreier Informationsfluss zwischen den beteiligten Stakeholdern (Geologe bzw. Hydrogeologe, Bohrfirma, kantonale Behörde) ist erforderlich. Geothermie-Schweiz, die Schweizerische Vereinigung für Geothermie, hat hierfür im Auftrag von EnergieSchweiz im Jahr 2015 fünf über die gesamte Schweiz verteilte Workshops durchgeführt.

Die Vollzugskontrollen für Erdwärmesonden (EWS) müssen in der Schweiz optimiert und hierzu die Kenntnisse hinsichtlich der geologisch-hydrogeologischen Begleitung sowie Überwachung von EWS-Bohrungen und Anlageninstallationen deutlich verbessert werden. An den Workshops wurden die relevanten Aspekte aufgezeigt und gemeinsam diskutiert. Zudem dienten die Veranstaltungen dem Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen den involvierten Parteien. Die Aufteilung in die verschiedenen Workshops ermöglichte, gezielt auf die regional variierenden Rahmenbedingungen (Geologie, Risiken,

kantonales Recht etc.) einzugehen. Die Workshops richteten sich insbesondere an die im Bereich Planung und Vollzug tätigen Geologen und Hydrogeologen sowie entsprechende Bewilligungsbehörden. Bohrfirmen sowie die relevanten Materialzulieferunternehmen waren ebenfalls eingeladen.

Folgende Workshop-Themenblöcke wurden behandelt:

- Einführung, Grundlagen der Oberflächennahen Geothermie,
- EWS-Bohrtechnik, Materialien, Hinterfüllung,
- Geologische und bohrtechnische Risiken, Schäden bei EWS-Bohrungen, Störfallintervention, Sanierungsmöglichkeiten,
- Mess- und Testverfahren,
- Rechtlicher Rahmen, Zuständigkeiten, Verantwortung des Geologen bzw. Hydrogeologen,
- Nachhaltigkeit, Bewirtschaftung.

Um ein Bild über den aktuellen Stand der Qualifizierung aller Workshopteilnehmer zu erhalten, wurde ein anonymer Fragenkatalog erhoben. Die Fragen bezogen sich auf die Erfahrung der Teilnehmer bezüglich der:

- Begleitung von EWS-Bohrungen,
- Intervention bei Artesern,
- Intervention bei bohrtechnischen Problemen,
- Intervention bei Erdgasaustritten,
- Dimensionierung von EWS,
- Tätigkeit im Bereich Bewilligung von EWS.

Die Auswertung der 110 abgegebenen Fragebogen zur Selbsteinschätzung der eigenen Qualifizierung ergab, dass sich die meisten Teilnehmer hinsichtlich der Begleitung von EWS-Bohrungen als überdurchschnittlich erfahren („trifft genau zu“, „trifft zu“) einschätzten (Abb. 26.6). Gleichzeitig spiegelt die Auswertung jedoch auch wider, dass hinsichtlich der Intervention bei Problemen oder Störfällen unterdurchschnittliche Erfahrungswerte vorliegen, insbesondere bei der Intervention von Erdgasausstritten.

Die Workshops waren eine initiale, regionale Veranstaltung. Sie zeigten auf, dass hinsichtlich der Vollzugskontrolle bei EWS-Bohrungen und Anlageninstallationen dringender Handlungsbedarf besteht.

Im Einzelnen wurden die folgenden Defizite bzw. Handlungsfelder identifiziert:

- Bohrungen: Verbesserung der Vorgaben für EWS-Bohrungen und Leitfaden für die Bohrplatzeinrichtung.
- Datenverfügbarkeit: Freie Verfügbarkeit möglichst aller relevanten Informationen über den Untergrund (Bohrprofile und -berichte etc.) in allen Kantonen.
- Vollzugskontrolle: Verbesserung der Vorgaben sowie zusätzliche Qualifizierung (Handbuch für Geologen/Hydrogeologen).

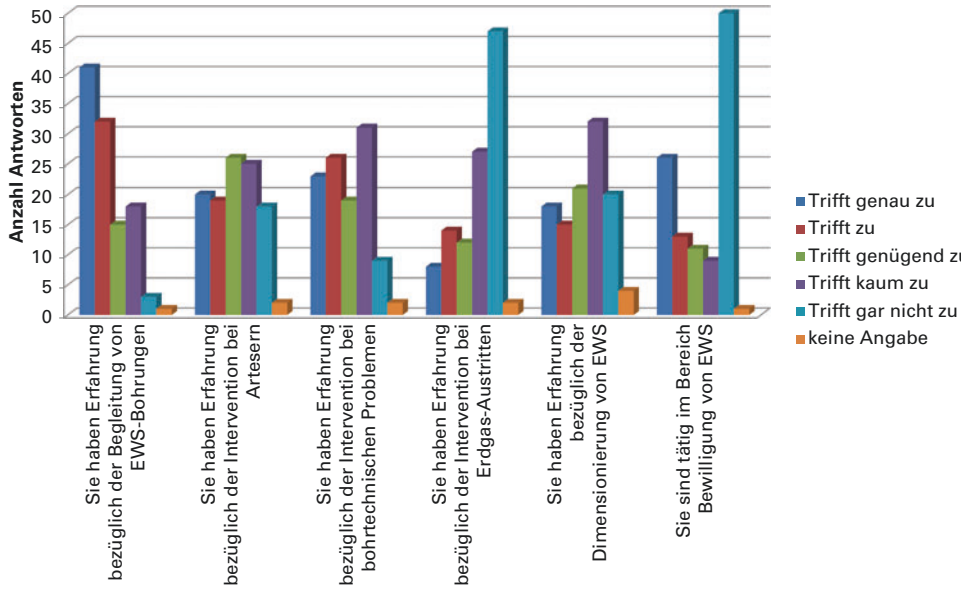


Abb. 26.6 Erfahrungswerte in der Branche (Geologen/Hydrogeologen, Bohrfirmen, Behördenvertreter): Begleitung von EWS-Bohrungen und Intervention bei Risiken

- Störfallintervention: Verbesserung der Vorgaben (Handbuch) sowie zusätzliche Qualifizierung.
- Hinterfüllung: Qualifizierte Kontrolle und Dokumentation.
- Dichtheitsprüfung: Qualifizierte Durchführung, Kontrolle und Dokumentation; evtl. durch externe Firma.
- SIA-Norm 384/6 *Erdwärmesonden*: Überarbeitung bzw. Ergänzung bezüglich der relevanten Messungen.
- Messverfahren: Leitfaden.
- Schnittstellen: Verbesserter und intensivierter Austausch zwischen den Bohrfirmen, Geologen/Hydrogeologen und den kantonalen Fachstellen insbesondere auch in regionalen Workshops.

Nicht behandelt wurden an den Workshops die Themen Planung, Projektierung und Bemessung von EWS. Diese werden durch die Weiterbildungsveranstaltungen der FWS abgedeckt (Abschn. 26.6.4).

26.7 Rechtsgrundlagen

Bei der Erstellung von Oberflächennahen Geothermie-Anlagen sind verschiedene Rechtsgrundlagen zu berücksichtigen, dazu gehören Gesetze und Verordnungen, aber auch Wegleitungen und technische Normen.

Die wichtigsten Rechtsvorschriften in der Schweiz sind (nicht abschließend):

- Nationales Gewässerschutzgesetz (GSchG) und kantonale Einführungsgesetze,
- Nationale Gewässerschutzverordnung (GSchV) und kantonale Ausführungen,
- Umweltschutzgesetzgebung,
- *BAFU, Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung* (2009) [5],
- BAFU, *Wegleitung Grundwasserschutz* (2004),
- SIA 384/6, *Erdwärmesonde*n (2010),
- SIA 384/7, *Grundwasserwärmenutzungen* (2015),
- SIA 431, *Entwässerung von Baustellen* (1997).

Bei der Erstellung von Oberflächennahen Geothermieanlagen ist in der Schweiz zu beachten, dass das „Standortrisiko“ bei der Bauherrschaft liegt. Sollten bei einer Bohrung Probleme (z. B. Arteser, Erdgas) auftreten, ist die Bauherrschaft für deren Behebung verantwortlich. Der Abschluss einer entsprechenden Versicherung ist daher dringend empfohlen.

26.8 Fördermaßnahmen

Für die Oberflächennahe Geothermie sind auf nationaler Ebene in der Schweiz keine speziellen Förderprogramme vorhanden, jedoch unterstützen die meisten Kantone solche Anlagen durch finanzielle Zuschüsse für Wärmepumpen, insbesondere beim Ersatz konventioneller Heizsysteme. Oft werden nur Sole-Wasser-, nicht jedoch Luft-Wasser-Wärmepumpen gefördert. Zusätzliche Fördermaßnahmen durch z. B. Gemeinden oder Energieanbieter sind nicht ausgeschlossen. Die finanziellen Zuschüsse für Oberflächennahe Geothermieanlagen können sich dadurch regional stark unterscheiden. Die zuständigen Energiefachstellen der Kantone bzw. Städte und Gemeinden geben hierüber Auskunft.

26.9 Geothermische Energienutzung

Die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie ist in der Schweiz sehr beliebt. Nirgendwo sonst auf der Welt ist die Dichte an Erdwärmesonden grösser als in der Schweiz (Lund und Boyd 2015, [4]).

Seit 2006 erfasst und publiziert Geothermie-Schweiz im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE eine Geothermiestatistik.

Die Geothermiestatistik der Schweiz beruht auf der Elektrowärmepumpenstatistik des Bundesamtes für Energie BFE, welche auf den Verkaufszahlen der Wärmepumpenlieferanten basiert, sowie auf Betriebsdaten, die von Anlagenbetreibern geliefert werden.

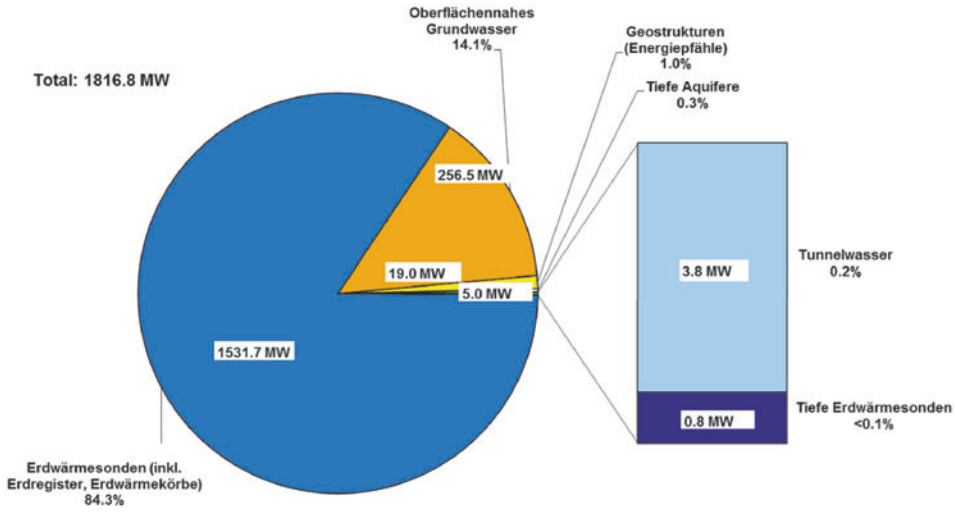


Abb. 26.7 Diagramm mit den Anteilen der verschiedenen Geothermiesysteme an der installierten Heizleistung für Wärmepumpensysteme im Jahr 2014. (Quelle: Imhasly et al. 2015, [3])

Im Jahr 2014 wurden 6477 Sole-Wasser- (ca. 35 %) und 463 Wasser-Wasser-Wärmepumpen (ca. 2.5 %) verkauft. Die meistverkauften Wärmepumpen sind nach wie vor Luft-Wasser-Wärmepumpen mit einem Anteil von rund 62,5 %. Ein kaum gefragter Wärmepumpentyp ist das Luft-Luft-System.

Die installierte thermische Leistung aller geothermischer Wärmepumpensysteme erreichte im Jahr 2014 eine Summe von 1816,8 MW (vgl. auch Abb. 26.7). Davon entfallen 84,3 % auf EWS-Anlagen (1531,7 MW), 14,1 % (256,5 MW) auf Grundwasserwärmenutzungen, 1 % (19 MW) auf Geostrukturen, 0,3 % (5 MW) auf tiefe Aquifernutzungen, 0,2 % (3,8 MW) auf Tunnelwassersysteme und <0,1 % (0,8 MW) auf tiefe EWS.

Die Heizenergie aus geothermischen Quellen inklusive dem Stromanteil betrug im Jahr 2014 insgesamt 3037 GWh (Abb. 26.8), wobei der Anteil der geothermischen und somit erneuerbaren Energie bei 2277 GWh lag (Abb 26.9). Die Werte der Geothermiestatistik repräsentieren effektive Betriebsdaten, abhängig von den Heizgradtagen in einem Jahr. Deshalb sind Schwankungen von Jahr zu Jahr möglich. Bei Nicht-Wärmepumpen-Systemen (Direktnutzungen) entspricht die geothermische Energie der Heizenergie. 2014 war ein sehr milder Winter mit nur 2782 Heizgradtagen (im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt von 3588 Heizgradtagen). Aufgrund des milden Winters 2014 hat die produzierte Heizenergie gegenüber 2013 um ca. 8 % abgenommen.

Von den 3037 GWh, die im Jahr 2014 von Geothermiesystemen als Heizenergie produziert wurden, lieferten wärmepumpengestützte Systeme einen Anteil von 2790,1 GWh. Davon stellten EWS-Systeme mit 85 % den allergrößten Beitrag (2385,3 GWh). Selbst unter Berücksichtigung der Direktnutzungen sind dies noch 78,5 % der Heizenergie im Jahr 2014 (Abb. 26.8). Grundwasserwärmenutzungen lieferten 344,3 GWh, Geostrukturen 39,5 GWh, tiefe Aquifersysteme 13,5 GWh, Tunnelwasser 5,8 GWh und tiefe EWS

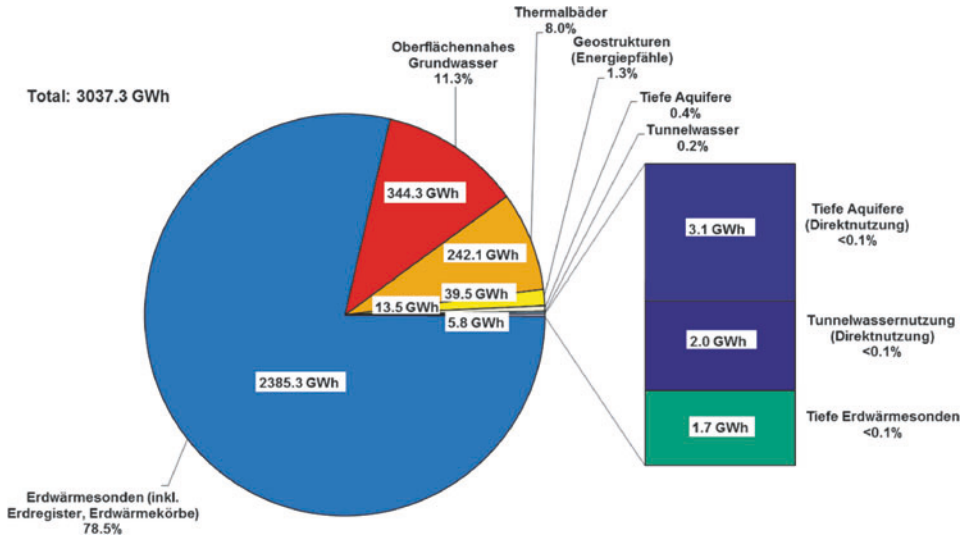


Abb. 26.8 Diagramm mit Anteilen der Heizenergie (inklusive Stromanteil), aufgeschlüsselt nach geothermischen Systemen im Jahr 2014. Die Werte repräsentieren effektive Betriebsdaten, abhängig von den Heizgradtagen in einem Jahr. (Quelle: Imhasly et al. 2015 [3])

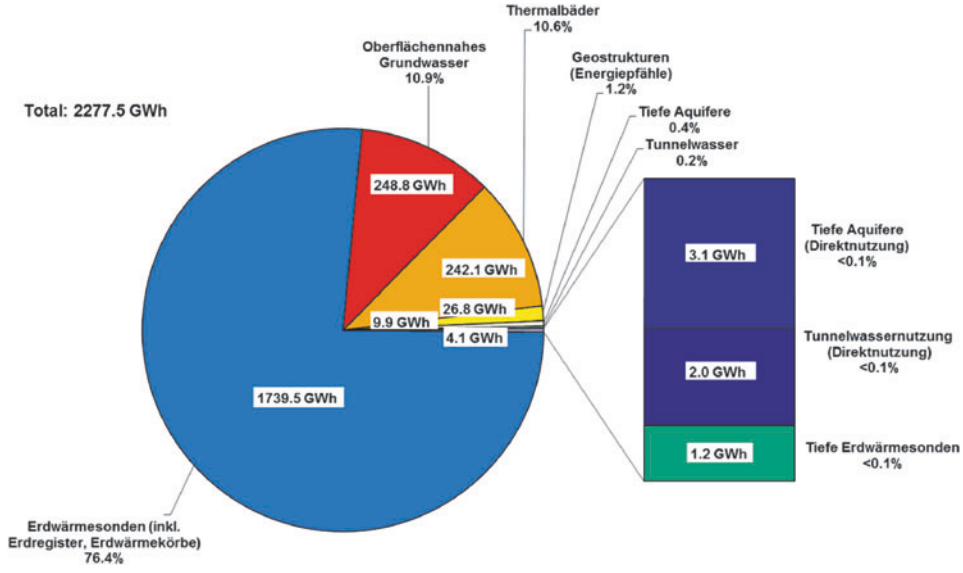


Abb. 26.9 Diagramm mit Anteilen der geförderten geothermischen (erneuerbaren) Energie, aufgeschlüsselt nach geothermischen Systemen, im Jahr 2014. Die Werte repräsentieren effektive Betriebsdaten, abhängig von den Heizgradtagen in einem Jahr. Deshalb sind Schwankungen von Jahr zu Jahr möglich. Bei Nicht-Wärmepumpen-Systemen entspricht die geothermische Energie der Heizenergie. (Imhasly et al. 2015 [3])

1,7 GWh. Zusätzlich lieferte die Tunnelwassernutzung am Lötschberg-Tunnel mittels einer Direktnutzung eine Heizenergie von 2 GWh.

Im Jahr 2014 betrug die Einsparung an fossilem Brennstoffe durch die geothermische Nutzung etwa 217.587 Tonnen Heizöl, was einer Einsparung beim CO_2-Ausstoss von rund 691.927 Tonnen entspricht (Imhasly et al. 2015 [3]).

26.10 Aktueller Stand der Oberflächennahen Geothermiebranche

Dachverband der Schweizer Geothermiebranche ist Geothermie-Schweiz, die Schweizerische Vereinigung für Geothermie. In diesem Verband vereinigen sich Fachleute aus geologischen, hydrogeologischen oder ingenieurtechnischen Büros, Energieversorgungsunternehmen, Bohrfirmen und Materiallieferanten, Vertreter involvierter Behörden von Bund und Kantonen, Forscher Schweizerischer Hochschulen, Politiker und Interessierte aus der Bevölkerung.

Der Verband gliedert sich für die fachliche Arbeit in vier Ressorts. Diese decken die folgenden Themen ab: Tiefe Geothermie, Untiefe Geothermie, Kommunikation, Politik.

Das Ressort „Untiefe Geothermie“ setzt sich aus unterschiedlichsten Mitgliedern zusammen, welche in verschiedenen Arbeitsgruppen tätig sind und sich mehrmals jährlich treffen. In einem Workshop Anfang 2016 hat das Ressort „Untiefe Geothermie“ seine Ziele überarbeitet.

Die Ziele von Geothermie-Schweiz zur Oberflächennahen Geothermie sind unter anderem:

- Qualitätssicherung im Bereich Planung, Installation und Betrieb,
- Erdwärmesonden gegenüber Luft-Wasser-Wärmepumpen noch besser zu positionieren,
- die *life cycle costs* von Klimaanlagen, Luft-Wasser- und Erdwärmesonden-Wärmepumpen aufzuzeigen und zu publizieren,
- Architekten noch besser über die Vorteile und Möglichkeiten von Oberflächennaher Geothermie zu informieren, da diese die Bauherrschaft maßgeblich beeinflussen.
- den Komfort (Heizen + Kühlen) sowie die Speichermöglichkeit von EWS-Anlagen öffentlich noch intensiver zu kommunizieren,
- die behördlichen Bewilligungsverfahren schweizweit zu vereinheitlichen,
- die SIA Norm 384/6 zu überarbeiten,
- die Planung für Speicherung und Kühlung zu standardisieren.

26.11 Forschung

Der Forschungsfokus bezüglich der Oberflächennahen Geothermie liegt in der Schweiz aktuell insbesondere in den Bereichen Qualitätssteigerung, Untergrundspeicherung, aktive Regeneration und der thermischen Vernetzung. Ein definiertes Forschungsprogramm

zur Oberflächennahen Geothermie existiert jedoch nicht. Über das Forschungsprogramm „Wärmepumpen und Kälte“ des Bundesamtes für Energie (BFE) werden zudem Arbeiten unterstützt, die zu einer energetischen Verbesserung der Prozesse Heizen und Kühlen führen und damit auch den Ausstoß von CO_2 vermindern.

26.12 Nachhaltigkeit im urbanen Bereich

Die Nachhaltigkeit von EWS-Anlagen im urbanen Bereich ist ein Thema, das erstmals die Stadt Zürich im Jahr 2014 ins Zentrum gerückt hat. Im vom Amt für Hochbauten der Stadt Zürich veröffentlichten Schlussbericht *Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich* (Stadt Zürich 2014 [1]) wird vor dem Hintergrund des stadteigenen „Konzeptes Energieversorgung 2050“ („EK 2050“) das Potenzial von Erdwärmesonden als Energiequelle für Wärmepumpen untersucht. Dabei werden das lokale geothermische Potenzial, die erwartete Nachfrage und die Vorgaben der 2000-Watt-Gesellschaft berücksichtigt. Die Studie überprüft unter anderem, ob die im „EK 2050“ auf der Basis von Richtwerten quantifizierten Erdwärmepotenziale für einzelne Stadtgebiete auf Stufe von Einzelobjekten umsetzbar sind. Ein Fokus lag dabei auf der Frage, ob lokal genügend Erdwärme für Wärmepumpen vorhanden ist, um Energie für Prozess- und Raumwärme in den Gebieten mit hoher baulicher Dichte bereitzustellen.

Die Studie führt auf, dass in der Stadt Zürich zum Zeitpunkt der Studienerarbeitung 4076 EWS in 924 Anlagen mit einer durchschnittlichen Länge von 210 m betrieben werden. Diese Anlagen erzeugen eine jährliche Nutzenergie von etwa 45 GWh pro Jahr. Dies soll gemäß „EK 2050“ bis ins Jahr 2050 auf rund 450 GWh/Jahr erhöht und damit etwa verzehnfacht werden. Nur 141 der EWS-Anlagen werden gegenwärtig auch zur Kühlung eingesetzt und regenerieren hiermit aktiv den genutzten Untergrundbereich. Die einzelnen Anlagen werden gegenwärtig als unbeeinflusste Einzelanlagen dimensioniert.

Die Studie kommt für die Stadt Zürich zum Fazit, dass die EWS-Dichte in einigen Stadtgebieten bereits heute so hoch ist, dass zeitnah mit einer gegenseitigen Beeinflussung zu rechnen ist. Durch die angestrebte Verdichtung von EWS-Anlagen wird sich die Problematik zunehmend verschärfen. Die gegenseitige Beeinflussung von EWS kann zwar planerisch z. B. durch größere EWS-Längen und durch aktive Regeneration berücksichtigt werden. Als Konsequenz finden aber neue EWS-Anlagen in einem Areal mit bereits vorhandenen EWS ein tieferes geothermisches Potenzial vor. Umgekehrt verringern die neu hinzukommenden Anlagen das nutzbare Potenzial der bereits bestehenden Anlagen. Damit Erdwärmesondenanlagen gemäß „EK 2050“ in Zukunft aber den gewünschten Beitrag zur Energieversorgung liefern können, müssen Massnahmen getroffen werden, um der zunehmenden gegenseitigen Beeinflussung von EWS-Anlagen angemessen zu begegnen. Ohne aktive Regeneration ist eine nachhaltige Wärmeversorgung deshalb nur dort möglich, wo auf einem entsprechenden Grundstück der spezifische Nutzwärmebedarf (abzüglich Strombedarf für die Wärmepumpe) geringer ist als das geothermische Potenzial. Gemäß Studie besteht kein Zweifel daran, dass ohne Regeneration in vereinzelten Gebieten der

Stadt Zürich in Zukunft mit einer signifikanten gegenseitigen Beeinflussung von EWS und mit einer entsprechend kürzeren Nutzungsdauer gerechnet werden muss.

Die Stadt Zürich (2015 [2]) hat deshalb eine Simulationsstudie *RegenOpt – Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen* in Auftrag gegeben, welche verschiedene Möglichkeiten zur aktiven Regeneration von Erdwärmesonden untersucht, und deren Kosten miteinander vergleicht. Die Studie kommt unter anderem zum Schluss, dass:

- Schon durch eine Teilregeneration der Langzeitauskühlung bei dichter Erdwärmenutzung signifikant entgegengewirkt werden kann.
- Die Kostenunterschiede zwischen den Regenerationsmethoden gering sind. Die Regenerationsmethode kann somit in Abhängigkeit der konkreten Anwendungssituation gewählt werden.
- Die Option, die Erdwärmesonden bei der Auslegung länger zu dimensionieren, um über einen Zeitraum von 50 Jahren Frostfreiheit des Erdwärmesonden-Nahbereichs zu garantieren, sowohl ökonomisch (Wärmegestehungskosten) als auch aus Sicht der Nachhaltigkeit (fortschreitende Auskühlung nach 50 Jahren) nicht zu empfehlen ist. Eine aktive Regeneration ist günstiger und nachhaltiger. Eine aktive Regeneration kann auch erst nach Erreichen einer kritischen Nutzungsdichte nachgerüstet werden.

Basierend auf den Ergebnissen der Stadt Zürich wird das Thema der Nachhaltigkeit von EWS-Anlagen im urbanen Bereich in der Schweiz weiterverfolgt. Eine Überarbeitung der aktuell gültigen SIA Norm 384/6 *Erdwärmesonden* hinsichtlich der zukünftigen Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung im urbanen Raum wird ins Auge gefasst.

26.13 Künftige Entwicklung

Die Oberflächennahe Geothermie wird in der Schweiz eine noch wichtigere Rolle bei der Gebäudeklimatisierung einnehmen. Die Anlageneffizienz und Qualität – sowohl hinsichtlich der Materialien als auch hinsichtlich Bohrung und Anlageninstallation – wird kontinuierlich verbessert. Innovative Systeme zum Heizen und Kühlen, die Untergrundspeicherung, das Reservoirmanagement sowie die smarte thermische Vernetzung werden zukünftig deutlich an Bedeutung gewinnen. Die Oberflächennahe Geothermie wird durch den kontinuierlichen Zubau einen zunehmenden Beitrag zur Abdeckung des Wärme- und Kältebedarfs liefern und damit immer mehr zur Einsparung fossiler Energieträger und von CO_2-Emmissionen beitragen. Der positive Ausblick auf die Entwicklung der geothermischen Energienutzung ist auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen: insbesondere hohes Umweltbewusstsein, verbreitetes Wissen über die Systeme, hohe Motivation und Innovationsfreudigkeit von Bauherren, Unternehmen und Interessenverbänden. Das Wachstum wird jedoch maßgeblich beeinflusst werden von den Kosten der in Konkurrenz stehenden Heizsysteme sowie der Strompreise.

Literatur

Bundesamt für Umwelt BAFU: Wegleitung Grundwasserschutz https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/wegleitung-grundwasserschutz.html (2004). Zugegriffen: 21. Nov. 2017

Bundesamt für Umwelt BAFU: Wärmenutzung aus Boden und Untergrund – Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/waermenutzung-boden-untergrund.html (2009). Zugegriffen: 21. Nov. 2017

Imhasly, S., Signorelli, S, Rybach, L.: Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz – Ausgabe 2014. Bericht an Geothermie-SCHWEIZ, 247 S. (2015)

Lund, J. W., Boyd, T. L.: Direct utilization of geothermal energy 2015 Worldwide Review, Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Melbourne (2015)

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten: Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich. Schlussbericht (2014)

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten: RegenOpt – Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische. Schlussbericht (2015)

Oberflächennahe Geothermienutzung weltweit: regionale Trends und Innovationen

27

Marietta Sander

Inhaltsverzeichnis

27.1 Einführung 780
27.2 Oberflächennahe geothermische Nutzungsformen weltweit 781
27.3 Markt- und Technologietrends – regionale Schlaglichter 783
27.3.1 Afrika 784
27.3.2 Amerika 784
27.3.3 Südamerika, Zentralamerika und Karibik 787
27.3.4 Europa 789
27.3.5 Asien 791
27.4 Herausforderungen und Lösungen 793
27.5 Schlussbemerkung 794
27.6 Danksagung 794
Literatur 795

Zusammenfassung

Oberflächennahe Geothermieanwendungen werden auf vielfältige Art und Weise weltweit genutzt. Markttrends und innovative Projektbeispiele unterscheiden sich regional aufgrund der Ressourcenausstattung und Bedarfsstrukturen sehr. Duplizierbare Erfolgskriterien werden gezielt extrahiert und auf andere Projekte übertragen. Innovative Projektbeispiele umfassen die flächendeckende Erdwärmepumpennutzung in Schweden, die Erforschung und beginnende Nutzung ehemaliger Grubengebäude des Kohlebergbaus im Ruhrgebiet und in den Niederlanden, die Nutzung Oberflächennaher

Marietta Sander (✉)
Im Pastoratsbusch 79, 44797 Bochum, Deutschland
e-mail: Marietta.Sander@gmail.com

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_27

Geothermie für Gewächshäuser in den Niederlanden als auch für öffentliche Einrichtungen, Gebäudekomplexe und Einkaufszentren in Korea. Deutlich wird, dass die Regierungen, Gesetzgeber und Finanzinstitute ausschlaggebend sind für die Geothermieentwicklung in den Ländern.

Schlüsselwörter

Geothermieressourcen · Wärmepumpen, Erdwärmesonden · Direktnutzung · Gebäudeheizung · Grubenwassernutzung · Nachbergbau · Fernwärme · Minewater Heerlen · International Energy Agency Geothermal Implementing Agreement · IEA GIA · International Geothermal Association · IGA

27.1 Einführung

Die internationalen Klimawandelverhandlungen in Paris im Dezember 2015 (*Conference of the Parties = COP21*) rückten die erneuerbaren Energietechnologien ins Rampenlicht internationaler Entscheidungsprozesse. Seither sind die Erneuerbaren Energien als ein zentrales Vehikel zur Klimawandelvermeidung global anerkannt und ihrem Nischendasein entwachsen. 2015 war das Rekordjahr bzgl. Kapazitätszuwachs. Geschätzte 147 GW erneuerbarer Stromkapazität wurden zusätzlich installiert, zusätzlich rund 38 GW thermische Kapazität (REN21 2016).

Im Jahre 2012 haben die Erneuerbaren 19 % der global konsumierten Endenergie abgedeckt. Die Hälfte davon stammte zwar aus „alten“ Erneuerbaren wie großen Wasserkraftwerken oder Holzverbrennungsanlagen, doch das Wachstum der „neuen“ Erneuerbaren Energien wie Photovoltaik, Windkraft, Geothermie und Biogasanlagen nimmt an Tempo auf. Hierbei sind die bevölkerungsreichen Länder Indien und China eine treibende Kraft. Dekarbonisierung, Klimaneutralität und eine gesunde zufriedene Bevölkerung spiegeln die neue Lebensqualität wieder und werden für politische Entscheidungsträger wichtiger denn je.

Insbesondere die USA und China sorgten im Vorfeld der COP21 für Überraschung. Man sprach von einem historischen Wendepunkt, welcher sich u. a. im eingereichten Klimabeitrag Chinas (*Intended Nationally Determined Contributions = INDC*) darstellte. Präsident Xi Jinping konkretisierte zudem Chinas Pläne zum Aufbau eines nationalen Emissionshandelssystems bis 2017, stellte strategische futuristische nationale Energiepläne vor und machte finanzielle Zusagen in Höhe von 3,1 Milliarden USD.

Auch die EU war anlässlich der Klimawandelverhandlungen in Paris dominant vertreten und führte auf, dass 2014 in den EU-Ländern 46 % der Energienutzung für Heizen und Kühlen verwendet wird. Hieran zeigt sich das große Potential oberflächennaher geothermischer Energie.

27.2 Oberflächennahe geothermische Nutzungsformen weltweit

Die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie ist eine der ältesten Nutzungsformen natürlich vorkommender Ressourcen. Bereits vor tausenden von Jahren dienten natürliche Thermalwasservorkommen zum Baden, Heizen und Kochen. Weitere Anwendungen geothermischer Ressourcen umfassen die Gebäudeheizung und -kühlung, geothermische Nah- und Fernwärmesysteme, balneologische Anwendungen, Aqua- und Fischkultur, Eisfreihaltung von Fahrbahnen, Brücken und Fußgängerwegen, die Beheizung von Gewächshäusern und die Nutzung geothermischer Wärme für landwirtschaftliche bzw. industrielle Trocknungsprozesse (siehe Abb. 27.1). Geothermisch beheizte Schwimmbäder und Erdwärmepumpen sind sehr verbreitet und leisten den größten Beitrag zu geothermischer Wärmenutzung weltweit. Typische oberflächennahe Systeme sind horizontale Wärmekollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbrunnen oder auch erdberührende Betonbauteile, sogenannte Energiepfähle. Zu den wenigen Anwendungen, bei denen auch die Oberflächennahe Geothermie in ausgewählten Regionen ohne den Einsatz von Wärmepumpen auskommt, gehört die natürliche Kühlung. Dabei wird Wasser mit der Temperatur des flachen Untergrundes direkt zur Gebäudekühlung verwendet. Die Wassertemperaturen entsprechen dabei der Jahresmitteltemperatur des jeweiligen Standortes und betragen häufig 8–10 °C.

Die globale geothermische Wärmenutzung liegt bei rund 272 PJ (75 TWh), Erdwärmepumpen ausgenommen (REN21 2016). Der größte Nutzungsanteil (45 %) entfällt auf Schwimmbäder und balneologische Anwendungen, gefolgt von Gebäudeheizung mit Nah- und Fernwärmesystemen eingeschlossen. Die fünf Länder mit den höchsten installierten

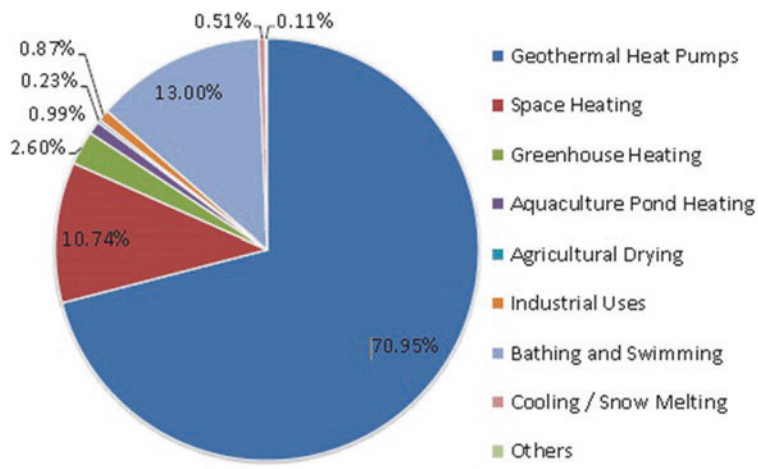


Abb. 27.1 Global installierte geothermische Direktnutzungskapazität in MWt. (Lund und Boyd 2015)

Kapazitäten an Oberflächennaher Geothermie inklusive Wärmepumpen sind China, USA, Schweden, Türkei und Deutschland. Betrachtet man die Pro-Kopf-Nutzung geothermischer Energie (MWt/Bevölkerung), so führen die Länder Island, Schweden, Finnland, Norwegen und die Schweiz (Lund und Boyd 2015).

Im Folgenden werden die oberflächennahen geothermischen Nutzungsformen und ihre Anwendung skizziert:

- *Geothermische Wärmepumpen*: Die meisten geothermischen Wärmepumpen sind in Nordamerika, in der EU und China installiert. Weltweit werden geothermische Wärmepumpen in 48 Ländern genutzt. Vergleicht man die Verbreitung mit der Nutzung im Jahr 2000, so wurde die Technologie damals in lediglich 26 Ländern genutzt.
- *Gebäudeheizung*: Die führenden Länder, die geothermische Heizungsanwendungen nutzen, sind China, Island, Türkei, Frankreich und Deutschland. Man unterscheidet zwischen zentralisierten Anlagen für Großanwendungen und individualisierte Nutzungen. Bei letzterem liegen von 28 Ländern die Türkei, USA, Italien, Slowakei und Russland vorn.
- *Gewächshäuser*: Mittlerweile nutzen 31 Länder die Geothermie, um Gewächshäuser und große Bodenflächen zu beheizen. Die Hauptnutzpflanzen der Gewächshäuser sind Gemüse, Tomaten, Blumen und Baumsetzlinge. In den USA und Island wird auch Obst wie z. B. Bananen gepflanzt.
- *Balneologie und Spas*: In rund 70 Ländern weltweit werden Thermalwässer für Schwimmbäder und Spas genutzt. In einigen Ländern ist die Geothermie hiermit auch zu einem wichtigen Kulturelement und Treffpunkt geworden.
- *Landwirtschaftliche Trocknungsprozesse und industrielle Prozesswärme*: In 15 Ländern wird die Geothermie für landwirtschaftliche Trocknungsprozesse genutzt. Beispiele sind das Trocknen von Zwiebeln in den USA oder Serbien (siehe Abb. 27.2), Getreide (Serbien), Früchten (El Salvador, Guatemala, Mexiko), Luzerne oder Alfalfa

Abb. 27.2 Zwiebeltrocknung in der Nähe von Reno, Nevada. (Mit freundlicher Genehmigung von © John Lund)

Abb. 27.3 Fischzucht tropischer Fischarten in Teichen südlich von Klamath Falls, USA. (Mit freundlicher Genehmigung von © John Lund)

(Neuseeland), Kokosnüssen (Philippinen) und Holz (Neuseeland, Mexiko). Auch die Fischzucht spielt in einigen Ländern eine wichtige Rolle (siehe Abb. 27.3). Beispiele für die Nutzung industrieller Prozesswärme finden sich in der Lederindustrie in Serbien oder Slowenien, bei chemischen Prozessen (Bulgarien, Polen), in der Papierherstellung (Neuseeland) oder für die CO_2-Extraktion. Im Larderello-Geothermiefeld in Italien wird überschüssige geothermische Wärme des San-Martino-Kraftwerkes als kostengünstige und umweltfreundliche Prozesswärme für die nah gelegene Käserei benutzt.

- *Schnee-/Eisschmelze auf Straßen und Bürgersteigen*: Rund 2,5 Mio. m^2 Straße/Gehwege werden weltweit geothermisch von Eis freigehalten. Insbesondere Island nutzt die Geothermie hierfür.

27.3 Markt- und Technologietrends – regionale Schlaglichter

Städte und Gemeinden spielen in der Förderung Oberflächennaher Geothermie eine wichtige Rolle. Sie sorgen für Marktanreizprogramme, unterstützen mit finanziellen Mitteln und helfen in der technischen Planung und Ausführung. In einigen Regionen unterstützen Regierungen die Entwicklung von Geothermieprojekten mittels geothermiefreundlicher Rahmenbedingungen. Island, Schweden, Deutschland und Frankreich sind hier u. a. hervorzuheben.

Hervorzuhebende Trends mit Duplizierungspotential umfassen die Nah-/Fernwärmesysteme in Paris und München, die umfassende Geothermieressourcennutzung in Island, die flächendeckende Erdwärmepumpennutzung in Schweden, die beginnende Nutzung ehemaliger Grubengebäude des Bergbaus im Ruhrgebiet und in den Niederlanden als auch die Nutzung Oberflächennaher Geothermie für Gewächshäuser in den Niederlanden und öffentliche Einrichtungen, Gebäudekomplexe und Einkaufszentren in Korea.

27.3.1 Afrika

Abgesehen von den Hochenthalpiel-agerstätten in den Anrainerländern des ostafrikanischen Riftsystems werden auch oberflächennahe Anwendungen auf dem afrikanischen Kontinent genutzt. In Algerien zum Beispiel gibt es über 240 Thermalquellen. Geothermische Ressourcen werden für balneologische Anwendungen, zum Heizen und in Gewächshäusern genutzt. Ähnliche Nutzungen sind auch in Ägypten zu verzeichnen. In Anlehnung an die Blaue Lagune in Island gibt es nun auch in Kenia eine Blaue Lagune, die durch das Abwasser des Geothermiekraftwerkes Olkaria II gespeist wird (siehe Abb. 27.4).

In Madagaskar gibt es einige wenige Spas und Unternehmen, die Mineralwasser in Flaschen abfüllen und verkaufen. In Südafrika wurden 80 Thermalquellen mit Temperaturen zwischen 25 °C und 71 °C gefunden. Nutzungsmöglichkeiten umfassen die Beheizung von Gewächshäusern, die Optimierung landwirtschaftlicher Trocknungsprozesse, Pilzzucht und Aquakultur.

27.3.2 Amerika

27.3.2.1 Kanada

In Banff, Kanada wurde 1885 der erste Nationalpark Kanadas aufgrund seiner Thermalquellen gegründet. Die ersten Badehäuser entstanden dort 1886. Heute werden 13

Abb. 27.4 Olkaria Blaue Lagune – ein kenianisches Spa. (Photo: © Marietta Sander)

Heißwasserquellen im Land kommerziell betrieben. Auch Erdwärmepumpen werden in Kanada genutzt. Rund 120.000 Anlagen waren 2014 in Betrieb (Thompson et al. 2015). 2009 publizierte die *Canadian Geoexchange Coalition* die Handreichung *A Buyer's Guide for Residential Ground Source Heat Pump Systems*, welche konkrete landesspezifische Hinweise zu Installation, Kauf, Kostenschätzungen, Heizkostenersparnis und Amortisierung bereitstellt. Der Erdwärmepumpenmarkt wuchs in Kanada konstant von 1998 bis 2009 und konsolidierte sich 2011. Hauptabsatzmärkte liegen in den bevölkerungsreichen Provinzen Ontario, Québec und British Columbia. Die *Canadian Geoexchange Coalition* strebt eine Transformation des Heizungs- und Klimaanlagenmarktes an und fördert hierfür insbesondere Geoapplikationen. Im August 2014 veröffentlichte die kanadische Geothermievereinigung eine weitere länderfokussierte Handreichung „*Direct Utilization of Geothermal Energy – Suitable Applications and Opportunities for Canada*".

27.3.2.2 USA

Die oberflächennahe Geothermienutzung in den USA ist sehr vielfältig (siehe Abb. 27.5 und 27.6). Zahlreiche Applikationen werden genutzt: Wärmepumpen, Gebäudeheizung, Aquakultur, Nah- und Fernwärmesysteme, Spas, Schnee- und Eisschmelze, landwirtschaftliche und industrielle Applikationen. Laut Boyd et al. (2015) lag die installierte Kapazität 2015 bei 17.416 MW, die jährliche Energienutzung bei 75.862 TJ oder 21.074 GWh. Die größten Applikationen sind Erdwärmepumpen (88 % der Geothermienutzung), daraufhin folgen Fischfarmen und Schwimmbäder. Die Installationszuwächse von Erdwärmepumpen liegen bei einem jährlichen Zuwachs von 8 % mit insgesamt 1,4 Mio. Einheiten (12 kW) in Operation. Die Hauptzuwächse finden im Mittleren Westen und in den östlichen Bundesstaaten statt.

Das geothermisch gestützte Nahwärmesystem der Stadt Boise umfasst 58 Gebäude. Auch das Peppermill Resort in Reno und das *Oregon Institute of Technology* (3753 m^2)

Abb. 27.5 Kommerzielle Baumschule in Klamath Falls, USA. (Mit freundlicher Genehmigung von © John Lund)

Abb. 27.6 Nahwärmenetz für die Stadt Klamath Falls, USA. (Mit freundlicher Genehmigung von © John Lund)

werden geothermisch beheizt. Insgesamt gibt es 21 geothermisch unterstützte Nahwärmesysteme in den USA (Boyd et al. 2015).

27.3.2.3 Mexiko

In Mexiko wurde Ende 2014 das mexikanische Geothermiezentrum für Innovation (*Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica* = *CeMIE-Geo*) gegründet. Das Zentrum wurde als eine Allianz aus Akademie und Industrie entworfen und wird mit rund 950 Mio. Mexikanischen Pesos (46.422.428 Euro) aus dem Fonds für nachhaltige Energie des mexikanischen Energiesekretariates (*Secretaría de Energía* = *SENER*) und des Nationalrates für Wissenschaft und Technologie (*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* = *CONACYT*) gefördert. Das Konsortium besteht aus sieben akademischen Instituten, dem staatlichen Stromerzeuger (*Comisión Federal de Electricidad* = *CFE*) und 17 Privatunternehmen. Ziele des Zentrums sind folgende (Quelle: http://www.cemiegeo.org/):

- die Förderung und verstärkte Nutzung geothermischer Energie,
- Erkenntnisgewinnung zu innovativen Geothermietechnologien,
- Synergien zu nutzen für innovative Projekte, wissenschaftliche Forschung und Technologieweiterentwicklung, und
- Humanressourcen fortzubilden, um einen ökonomischen Mehrwert zu schaffen und die Geothermieunternehmen des Landes zu unterstützen.

Im Institut werden folgende Projekte zur geothermischen Direktnutzung durchgeführt:

- P10: Demonstrationsanlage zur Klimatisierung von Gewächshäusern,
- P11: Technologieentwicklung zur Niederenthalpienutzung,
- P13: Markt- und Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Erdwärmepumpen,

Abb. 27.7 Das CeMIE-Geo Hauptgebäude. (Photo © Eduardo Carrillo und http://www.cemiegeo.org/index.php/noticias/noticia?id=54)

- P16: Prüfung vielseitiger Kaskadennutzung,
- P22: Klimatisierung von Gebäuden,
- P27: Trocknung von Lebensmitteln,
- P30: Klimatisierung öffentlicher als auch industriell und privat genutzter Gebäude mit Geothermie.

Als ein erstes Demonstrationsvorhaben soll das Informationszentrum des Geothermiekraftwerkes *Cerro Prieto* mit einer Erdwärmepumpe zur Klimatisierung der Räumlichkeiten ausgestattet werden. Am 10. Mai 2016 wurde das CeMIE-Geo Hauptgebäude offiziell eingeweiht (siehe Abb. 27.7).

27.3.3 Südamerika, Zentralamerika und Karibik

Die östlichen Karibikstaaten sind durch aktive Vulkane, heiße Quellen und Fumarole gekennzeichnet. Diese Manifestationen werden durch die sich westlich bewegende und subduzierte nordatlantische Platte unter die karibische Platte hervorgerufen. In der Karibik herrscht ein großes Interesses an Geothermiestrom. Möglicherweise ist dies mit ein Grund, weshalb sich die oberflächennahe Geothermienutzung derzeit nur auf balneologische Anwendungen beschränkt.

Auch in den Festlandsstaaten Zentralamerikas liegt das Hauptinteresse am Geothermiestrom. Dieses änderte sich erfreulicherweise in den letzten Jahren und so verzeichnet Guatemala beispielsweise das Unternehmen *Agroindustrias La Laguna*, welches Früchte (Mango, Ananas, Bananen) trocknet. Eine weitere Einrichtung nutzt geothermische Ressourcen zur Zementherstellung.

In Argentinien wird die Geothermie vor allem für therapeutische und entspannende Freizeitaktivitäten genutzt. In den Provinzen Cordoba, Corrientes, Missiones und Buenos Aires wurden bereits mehrere Anlagen entwickelt. An rund 72 Orten werden

Abb. 27.8 Termas de Polques in Bolivien. (Photo: © Marietta Sander)

Thermalwässer mit Temperaturen zwischen 24 °C und 75 °C genutzt. Nutzungen umfassen auch Gewächshäuser, Gebäudeheizung und Fischfarmen.

Auch in Kolumbien, Peru, Bolivien, Ecuador und Chile werden Thermalwässer zur Entspannung und für therapeutische Zwecke genutzt, teils auf privatwirtschaftlicher Basis oder in öffentlich zugänglichen Einrichtungen (siehe Abb. 27.8). In Peru hat die Nutzung heißer Quellen eine lange Tradition und geht auf die Zeit der Inka zurück. Die ersten geothermischen Wärmepumpen wurden 1996 im Süden Chiles installiert. Auch in Chile liegt das Hauptinteresse der Unternehmen und Regierung derzeit auf der Entwicklung des Geothermiestroms.

Die Internationale Energieagentur (IEA)

Die Internationale Energie Agentur (IEA) wurde in 1974 im Nachgang der weltweiten Ölkrise gegründet. Sie wurde als autonome internationale Einrichtung durch ihre 28 Mitgliedsstaaten ins Leben gerufen, um Energiesicherheit, Umweltbewusstsein und stabile ökonomische und soziale Voraussetzungen zu gewährleisten. Im Rahmen von 40 multilateralen Technologieinitiativen (10 hiervon in Erneuerbaren Energien), den sogenannten „*Implementing Agreements*“, erfolgt seither ein konstruktiver strategischer internationaler Wissens- und Technologieaustausch.

Katharina Link informiert (persönliche Mitteilung, 2016), dass die IEA im Rahmen des speziellen Geothermie-Durchführungsabkommens (http://iea-gia.org/) ihren Mitgliedsstaaten eine internationale Austauschplattform zu wissenschaftlichen und technologischen Geothermiethemen anbietet. Derzeit werden sieben Themen in den sogenannten Annexen kooperativ in internationalen Arbeitsgruppen bearbeitet. Diese sind:

- Annex 1 – Umwelteinflüsse geothermischer Projekte,
- Annex 8 – Direktnutzung geothermischer Energie,

- Annex 10 – Datensammlung und Information,
- Annex 12 – Deep Roots – Vulkanische Geothermiesysteme, und
- Annex 13 – Emerging Technologies.

2003 wurde der Annex 8 zum Thema Geothermiedirektnutzung gegründet. Die Zielsetzung des Annex 8 ist es, wertneutrale und unverfälschte Informationen bereitzustellen, Wissensaustausch und Kooperation zu fördern, Technologieexpertise zu teilen, sodass insgesamt weltweit mehr Geothermieressourcen genutzt werden.

27.3.4 Europa

Im Folgenden werden innovative Geothermienutzungen aus den Niederlanden, Schweden und Deutschland vorgestellt. In den Schweizer Alpen beeindrucken die Tunnelwassernutzungen, z. B. in Frutigen am Nordportal des Lötschberg-Basistunnels für die Fischzucht, die Beheizung von Gewächshäusern sowie den Betrieb eines kleinen Nahwärmenetzes (siehe Abb. 27.9).

27.3.4.1 Schweden

Lund und Freeston (2010) berichten, dass Schweden zu den fünf Ländern mit der höchsten installierten geothermischen Wärmekapazität gehört, neben den USA, China, Norwegen und Deutschland. Andersson und Bjelm (2013) berichten, dass die Nutzung von Erdwärmepumpen die bevorzugte Wärmequelle für einzeln stehende Häuser in Schweden ist. Die Wärmepumpennachfrage entstand u. a. im Nachgang der Ölkrise und hoher Ölpreise in den 80er Jahren und führte dazu, dass viele alte Öl- und Stromheizungen durch Geothermiewärmepumpen ersetzt wurden. Im Jahre 2011 waren im Lande

Abb. 27.9 Tunnelwassernutzung in den Schweizer Alpen (Frutigen, Lötschberg-Basistunnel) für die Fischzucht, die Beheizung von Gewächshäusern sowie den Betrieb eines kleinen Nahwärmenetzes. (Mit freundlicher Genehmigung des © Tropenhauses Frutigen AG)

rund 400.000 Erdwärmesysteme installiert. Der Wärmepumpenabsatzmarkt erreichte 2007 seinen Höhepunkt, ist nun aber seitens Ein- und Mehrfamilienhäusern gesättigt und stabil.

27.3.4.2 Niederlande

Ein erfolgreiches Wärmekonzept wurde im früheren Kohleabbaugebiet Heerlen entwickelt. Dort werden ehemalige Grubengebäude mit Wasser gefüllt und das so erwärmte Wasser wird mittels eines komplexen Wärmetauscher-, Pump- und Rohrsystems gezielt an Verbraucher geleitet. 2008 wurden erstmalig fünf Brunnen zur Versorgung von sechs Abnehmern genutzt. Seither expandierte die Nutzergemeinschaft und die 2013 gegründete unabhängige Firma Mijnwater B.V. setzte sich zum Ziel, weitere Ein- und Mehrfamilienhäuser und öffentliche Einrichtungen mit Wärme zu versorgen. So sollen sich die CO_2-Emission in der Region um 65 % reduzieren (Mijnwater B.V. 2016). Weitere Projektkomponenten umfassen Speichertechnologien, Hybridnutzungen mehrerer Erneuerbarer Energietechnologien, dezentralisierte intelligente Kontrollsystematik, Recycling und die Mehrfachnutzung von Ressourcen. Da die Grubenwässer aus Teufen von mehr als 500 m gefördert werden, erreicht man schnell die Grenze zur Tiefengeothermie.

Oberflächennahe offene/geschlossene Aquiferwärmespeicher (*Aquifer Thermal Energy Storage* = ATES und *Borehole Thermal Energy Storage* = BTES) werden in den Niederlanden bereits seit 1985 genutzt. Die Temperaturbereiche befinden sich zwischen 7 und 17 °C und sind somit für Gebäudeheizung in Kombination mit Wärmepumpen geeignet. Etwa 3500 ATES-Systeme und 50.000 BTES-Systeme sind in den Niederlanden 2015 in Betrieb gewesen (Van Heekeren und Bakema 2015).

An der Technischen Universität in Eindhoven ist eines der größten Systeme mit einer Heizkapazität für 3000 m^3 pro Stunde und 12 Millionen m^3 pro Jahr in Betrieb (Van Heekeren et al. 2015). Verkaufsargumente dieser Heizsysteme sind eine schnelle Amortisierungszeit von 3–6 Jahren, eine hohe Verlässlichkeit für die erprobte Technologie und die nationale Energiestrategie von 2013, welche einen 16 %igen Anteil Erneuerbarer Energie bis 2023 vorschreibt. Insbesondere Wärme- und Kältespeichertechnologien in Ballungszentren verbunden mit strategischer Nutzungsplanung des tieferen Untergrundes stellen wichtige Bestandteile der niederländischen Energiewende dar.

27.3.4.3 Deutschland

Auch in Deutschland werden Machbarkeitsstudien zur Nutzung der Grubengebäude der ehemaligen Bergbaugebiete im Ruhrgebiet durchgeführt. Um die Grubengebäude trocken zu halten, wird beim untertätigen Steinkohlebergbau Wasser gehoben. Dieses hat Temperaturen von 20–50 °C und ist somit prinzipiell für Heizzwecke geeignet. Am Internationalen Geothermiezentrum der Hochschule Bochum wird zwischen 2014 und 2017 eine Studie zur thermischen Nachnutzung von Steinkohlebergwerken am Beispiel des Bergwerks Prosper-Haniel am Standort der Innovation City Bottrop (GeoMTES) durchgeführt. Das zentrale Projektziel ist die Entwicklung eines technisch und wirtschaftlich umsetzbaren thermischen Speicherkonzeptes zur energetischen Nachnutzung des Bergwerks

Prosper-Haniel in Form einer thermischen Speicherung (Internationales Geothermiezentrum 2016). Die Konzeptidee sieht vor, saisonal nicht nutzbare Abwärme aus Industrie- und Kraftwerksprozessen und/oder auf umliegenden Bergwerksbrachflächen erzeugte solare Wärme in das Grubengebäude einzuspeisen und bei Bedarf im Winterhalbjahr zur Wärmeversorgung von Gewerbe- und Wohnimmobilien ggfs. auch über bestehende Fernwärmenetze zu nutzen. Zur Etablierung solch untertägiger thermischer Speicher müssen im Grubengebäude entsprechende Infrastrukturmaßnahmen durchgeführt und geeignete Erschließungs- und Fördersysteme entwickelt werden. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein eines noch vollständig zugänglichen und möglichst noch aktiven Bergwerks. Bis mindestens 2018 ist das Steinkohlebergwerk Prosper-Haniel hierfür noch vollständig zugänglich, sodass gezielte Wärmespeicherkonzepte entwickelt und etabliert werden können. Bis dato ist allerdings noch unklar, wie sich die Grubenwasserqualität und -quantität für die Zeit nach dem aktiven Bergbau entwickelt.

27.3.5 Asien

2007 gründeten 16 Länder das Wirtschaftliche Forschungsinstitut für den Verband Südostasiatischer Nationen (*Economic Research Institute for ASEAN and East Asia* = ERIA) mit dem Ziel, dem Sekretariat der ASEAN (*Association of Southeast Asian Nations*) und ihren Mitgliedsländern mittels Forschungs-, Fortbildungs- und Politikberatungsprojekten strategische Empfehlungen zu geben. Heute besteht die ASEAN aus zehn Mitgliedsländern: Brunei, Kambodscha, Indonesien, Laos, Malaysia, Myanmar, Philippinen, Singapur, Thailand und Vietnam.

Im Geothermiesektor führte ERIA von 2013 bis 2015 ein Geothermieprojekt mit dem Ziel durch, innovative Wärmepumpeninstallationen in Asien zu entwickeln und ihre Funktionsweise zu untersuchen. So wurden geothermische Wärmepumpenanwendungen in China untersucht, offene und geschlossene Aquiferspeichersysteme in Japan analysiert, Monitoringaktivitäten von Wärmepumpeninstallationen in Südkorea durchgeführt und Machbarkeitsstudien in Vietnam durchgeführt. Der komplette Bericht mit den Ergebnissen der dargestellten Projektmodule ist online einsehbar (Sakaguchi und Anbumozhi 2015).

27.3.5.1 Korea

Yoonho Song (persönliche Mitteilung, 2016) vom Koreanischen Institut der Geowissenschaften und Mineralischen Ressourcen (*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*) informiert, dass die Oberflächennahe Geothermie und ihre Nutzung mit Erdwärmepumpen in Korea seit dem Jahre 2000 eine neue bevorzugte Energiequelle darstellt. Von 2000 bis 2012 wurden jährlich rund 100 MWt durch neue Installationen bereitgestellt. Die gesamte installierte Kapazität des Landes beläuft sich zum Jahresende 2015 auf mehr als 900 MWt. Die Wärmeversorgung erfolgt vor allem mittels großer Geothermieanlagen, die Bürogebäude, Schulen und öffentliche Einrichtungen versorgen. Diese

rasante Entwicklung ist u. a. auf finanzielle staatliche Zuschüsse zurückzuführen und auf eine gesetzliche Vorgabe, welche die Nutzung Erneuerbarer Energien in Gebäuden obligatorisch macht.

Ein beeindruckendes Beispiel einer großen Geothermieanlage ist der neue Regierungskomplex in Sejong City (siehe Abb. 27.10–27.12). Seit Jahresende 2014 ist die Anlage operativ mit einer installierten Kapazität von über 20 MWt und einer Fläche von 607.555 m^2 (siehe auch: www.chungsa.go.kr). Laut Aussage von Yoonho Song ist dies die größte Geothermieanlage zur Gebäudeheizung und -kühlung in Korea und gehört zu einer der größten weltweit. Etwa 38 % des Heiz- und Kühlbedarfs wird geothermisch gedeckt. Ein Großteil (rund 70 %) nutzt Erdwärmesonden, welche eine Gesamtlänge von rund 200 km erreichen.

Abb. 27.10 Der neue Regierungskomplex in Sejong City (Zone 1 und 2) aus der Vogelperspektive. (Mit freundlicher Genehmigung von © Yoonho Song)

Abb. 27.11 Installation der Verrohrung der Erdwärmesysteme in Zone 1 und 2 in Sejong City. (Mit freundlicher Genehmigung von © Yoonho Song und T-EN)

Abb. 27.12 Verrohrung des Heiz- und Kühlsystems in Zone 1 und 2 in Sejong City. (Mit freundlicher Genehmigung von © Yoonho Song und T-EN)

27.4 Herausforderungen und Lösungen

Zentrale Herausforderung oberflächennaher Geothermieprojekte sind häufig das hohe Startkapital, die Notwendigkeit umfassender interdisziplinärer geowissenschaftlicher Ressourcenanalysen, fehlende oder unklare staatliche Unterstützungsmechanismen und ein begrenztes Wissen seitens der Entscheidungsträger. Häufig fehlt auch das Interesse an erneuerbaren Wärmeprojekten, welche klassischerweise in der Vergangenheit durch fossile Energieträger getragen wurden. Aufgrund der vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten der Geothermie, differenzierter Technologieanwendungen und der Nischenposition der Geothermie in vielen Ländern scheuen sich viele Entscheidungsträger immer noch davor, Investitionen in diesen Markt zu tätigen.

Die politischen Entscheidungsträger sind jedoch zentral verantwortlich für die Förderung nationaler Geothermieprojekte. Die nationalen Regierungen determinieren die legalen und finanziellen Rahmenbedingungen für die Privatwirtschaft, die Forschung, das öffentliche Interesse und Ausbildungsangebote im Energiesektor. Fragt die Regierung bestimmte Kooperationen bzw. Technologien nicht nach, so fällt eine Entwicklung des Sektors häufig schwer. Klare Prozedere, Regelwerke, Stabilität, sichere Absatzmärkte und Vorhersehbarkeit sind wichtige Kriterien für Geothermieentwickler. Rechtliche Unsicherheiten, Zweideutigkeiten und Interpretationsspielräume werden als Risikofaktoren gesehen, die Projekte verzögern und behindern.

Das Marktanreizprogramm Deutschlands, der Wärmefonds Frankreichs und die konstante finanzielle Unterstützung der Geothermie in Island trugen signifikant zum Ausbau der oberflächennahen Geothermienutzung in den entsprechenden Ländern bei.

Klare konsistente und verlässliche Regelwerke, staatliche Fördermechanismen, finanzielle Anreizprogramme und Steuervergünstigungen zeigen direkte Auswirkung auf die Verkaufszahlen geothermischer Technologien. Auch globalwirtschaftliche Einflüsse wie die Ölkrise der 70er Jahre sind in den Verkaufszahlen von Erdwärmepumpen deutlich ersichtlich (siehe z. B. Schweden).

27.5 Schlussbemerkung

Rezente innovative Entwicklungen fördern die weitere Erforschung oberflächennaher geothermischer Nutzungsmöglichkeiten, Technologien und ihrer Effizienzsteigerung. Im Folgenden sind eine Reihe von Trends und Innovationen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie dargestellt:

Wie das Beispiel des neuen Regierungsgebäudes in Sejong City, Korea zeigt, ist ein Trend zu höher dimensionierten geothermischen Wärmepumpengroßanlagen zu verzeichnen. Oft werden in diesen Anlagen auch Speichermöglichkeiten und die Kombination mit anderen Erneuerbaren Energiequellen wie z. B. Solarthermie genutzt.

Die Entwicklung hin zu „*smart cities*“ und „*anergy grids*“ wird immer wichtiger. Die ETH Zürich baut ein dynamisches Speichersystem im Untergrund am Campus Hönggerberg, um bis 2025 ein CO_2-freies Heiz- und Kühlsystem am Campus bereitstellen zu können (ETH 2016). Unter Anergie versteht man Niedrigenergie/Minimalenergie. An der ETH Zürich ist man bestrebt, so viel wie möglich Geothermie für Heiz- und Kühlzwecke zu nutzen. Die Fließrichtung im Anergie-Netz funktioniert in beide Richtungen: von heiß zu kalt und umgekehrt. Das Anergie-Netz liefert Wärme im Winter und Kälte im Sommer (siehe auch: Greencity Offices 2016).

Auch „*Smart Grids*“ – intelligente Stromnetze – werden wichtiger und beziehen die Geothermie mit ein. Smart Grids unterstützen einerseits das Zusammenspiel von Energieangebot und Energienachfrage, andererseits die Integration der Erzeugung aus Erneuerbaren Energien. Für das Stromnetz der Zukunft müssen neue, intelligente Technologien und Dienstleistungen entwickelt werden.

Beim Begriff „*Smart Cities*“ werden verschiedene Dimensionen, u. a. Erneuerbare Energien, aber auch Umweltschutz, intelligente digitale Technologien, nachhaltige Lebensformen, Bürgerbeteiligung, ressourcenschonende Mobilität, eine effiziente Verwaltung und Ökonomie zusammengefasst.

Auch mehrstufige Wärmenutzungen (*cascaded use*) einer Geothermieressource in Kombination mit Stromproduktion und folgender Wärmenutzung in unmittelbarer Nachbarschaft nehmen zu. Dies hilft auch, für Akzeptanz in der benachbarten Bevölkerung zu sorgen.

In Island am Standort Svartsengi entwickelte man das Konzept eines Ressourcenparks, in dem Geothermieressourcen vielfältig in naheliegenden Einrichtungen genutzt werden; u. a. zur Stromproduktion, für balneologische Anwendungen, Spas, Produktion chemischer Produkte/Gase, Biotechnologien, Gebäudeheizung im Hotel usw. (Orf Genetics 2016; The Blue Lagoon 2016).

27.6 Danksagung

Der Geothermie Weltverband (International Geothermal Association) inklusive aller Personalmittel werden seit dem Jahre 2011 durch eine Zuwendung des Landes

Nordrhein-Westfalen unter Einsatz von Mitteln aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), „Investitionen in Wachstum und Beschäftigung“, unterstützt. Wir danken der EU und dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

Literatur

Andersson, O., Bjelm, L.: Geothermal energy use, country update for Sweden, S. 3–7. European Geothermal Congress 2013, Pisa June 2013

Boyd, T. L., Sifford, A., Lund, J. W.: The United States of America Country Update 2015. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, 19–25 April 2015

Canadian Geoexchange Coalition: A Buyer's guide for residential ground source heat pump systems. http://www.geo-exchange.ca/en/UserAttachments/article58_Residential_Geothermal_Buyers_Guide_2009.pdf (2009). Zugegriffen: Okt. 2016

Canadian Geothermal Energy Association: Direct utilization of geothermal energy – Suitable applications and opportunities for Canada. http://iea-gia.org/wp-content/uploads/2014/09/direct_use_report.pdf (2014). Zugegriffen: Okt. 2016

Economic Research Institute for ASEAN and East Asia: http://www.eria.org (2016). Zugegriffen: Okt. 2016

ETH Zürich: Anergy Grid – Moving toward a carbon neutral campus: An anergy grid replaces fossil fuels. https://www.ethz.ch/en/the-eth-zurich/sustainability/sustainable-campus/erdspeicher.html (2016). Zugegriffen: Okt. 2016

Greencity Offices: Comprehensive energy network for low energy consumption. http://www.greencity-offices.ch/en/vision/energy-concept/ (2016). Zugegriffen: Okt. 2016

Internationales Geothermiezentrum: GeoMTES – Studie zur thermischen Nachnutzung von Steinkohlebergwerken. http://www.geothermie-zentrum.de/forschung-und-projekte/einzelansicht-projekte/artikel/geomtes-studie-zur-thermischen-nachnutzung-von-steinkohlebergwerken.html (2016). Zugegriffen: Okt. 2016

Lund, J. W., Boyd, T. L.: Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 - Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, 19–25 April 2015

Lund, J., Derek, Freeston, D., Boyd, T.: Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, 25–29 April 2010

Mijnwater, B. V.: Mine water, basis for renewable energy. http://www.mijnwater.com/?lang=en (2016). Zugegriffen: Okt. 2016

Orf Genetics: Endotoxin-Free growth factors increase reproducibility of stem cell research. http://www.orfgenetics.com

Renewable Energy Policy Network of the 21st century (REN21): Renewables 2016 – Global Status Report. Paris (2016). Zugegriffen: Okt. 2016

Sakaguchi K., Anbumozhi V.: Case Studies on Sustainable Use of Ground Soruce Heat Pumps. In Sustainability Assessment of Utilising Conventional and New Type Geothermal Resources in East Asia. ERIA Research Project Report 2014-41, Jakarta: ERIA, S. 103–155. http://www.eria.org/RPR_FY2014_No.41_Chapter_5.pdf (2015). Zugegriffen: Okt. 2016

The Blue Lagoon: Blue Lagoon Iceland. http://www.bluelagoon.com/clinic/ (2016). Zugegriffen: Okt. 2016

Thorsteinsson, Hildigunnur H.: U.S. Geothermal district heating: Barriers and enablers. Massachusetts Institute of Technology. http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/42932 (2008). Zugegriffen: Okt. 2016

Thompson, A., Bakhteyar, F. Van Hal, G.: Geothermal industry development in Canada – Country update. Proceedings, World Geothermal Congress 2015., International Geothermal Association, Melbourne (2015)

Van Heekeren, V., Bakema, G.: The Netherlands country update on geothermal energy. Proceedings, World Geothermal Congress 2015. International Geothermal Association, Melbourne (2015)

Ausblick: Schlüsselelemente, Herausforderungen, Chancen und Perspektiven

28

M. J. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi und T. Neu

Inhaltsverzeichnis

28.1 Arten der Nutzung in der oberflächennahen Geothermie 799
28.2 Vorteile oberflächennaher Geothermie 800
28.3 Geothermische Energie als erneuerbare Energiequelle 800
28.4 Herausforderungen an oberflächennahe/tiefe Geothermie 801
28.5 Schlüsselelemente bei der Entwicklung der oberflächennahen/tiefen Geothermie 803
Literatur 804

Zusammenfassung

Die geothermische Energie ist ein wichtiger Baustein bei zunehmendem Bedarf an erneuerbarer Energieproduktion. Geothermie bedeutet eine gesicherte und stabile Grundversorgung an Wärme. Den Vorteilen, z. B. saisonale Unabhängigkeit von Wetterphänomenen, lokale autarke Produktion, umweltfreundlicher Charakter, optisch unauffälliger, geringer Flächenbedarf, stehen als kritische Momente die Bewertung des Fündigkeitsrisikos und die soziale Akzeptanz gegenüber, deren dezentrale Bewältigung nur auf der Basis von Wissenschaftlichkeit und verstärkter Forschungstätigkeit gelingen

Prof. Dr., Dr. h.c. Mathias Bauer (✉)
Lehr- und Forschungsgebiet „Arbeits- und Gesundheitsschutz“, RWTH Aachen University, Wüllnerstr. 2, 52062 Aachen, Deutschland

Prof. Dr. Willi Freeden
Lehr- und Forschungsgebiet „Geomathematik“, TU Kaiserslautern, MPI-Gebäude 26, 67663 Kaiserslautern, Deutschland

Prof. Dr. Hans Jacobi
Jacobi & Partner Industrieberatung GmbH, Kennedyplatz 8, 45127 Essen, Deutschland

Dipl.-Ing. Thomas Neu
proG.E.O. Ingenieurgesellschaft mbH, Elisabethenstraße 3, 66119 Saarbrücken, Deutschland

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2_28

kann. Speziell in Deutschland sind Anreize zur Finanzierbarkeit und ein Interessenmanagement zur Schaffung politischer Akzeptanz als Chance und Herausforderung dringend geboten.

Schlüsselwörter
Herausforderungen · Chancen · Perspektiven

Unmittelbar an der Erdoberfläche und eben nur dort schwanken die Temperaturen des Erdreichs stark mit den Jahreszeiten. In Tiefen ab etwa 10 m ist die Temperatur jedoch weitgehend konstant. Mit der Tiefe nimmt sie bekanntlich entsprechend des Temperaturgradienten (vgl. Abb. 28.1) mit etwa 3° C pro 100 m zu. Somit ist dieser Effekt in oberflächennahen Tiefenlagen von weniger als 400 m nicht allzu stark: Er macht in der Regel nicht wesentlich mehr als 10° C aus.

Die unterschiedliche Tiefenlage der Wärmegewinnung und anderer Nutzungsmöglichkeiten der geothermischen Energie führt zu einer Klassifikation in oberflächennahe und

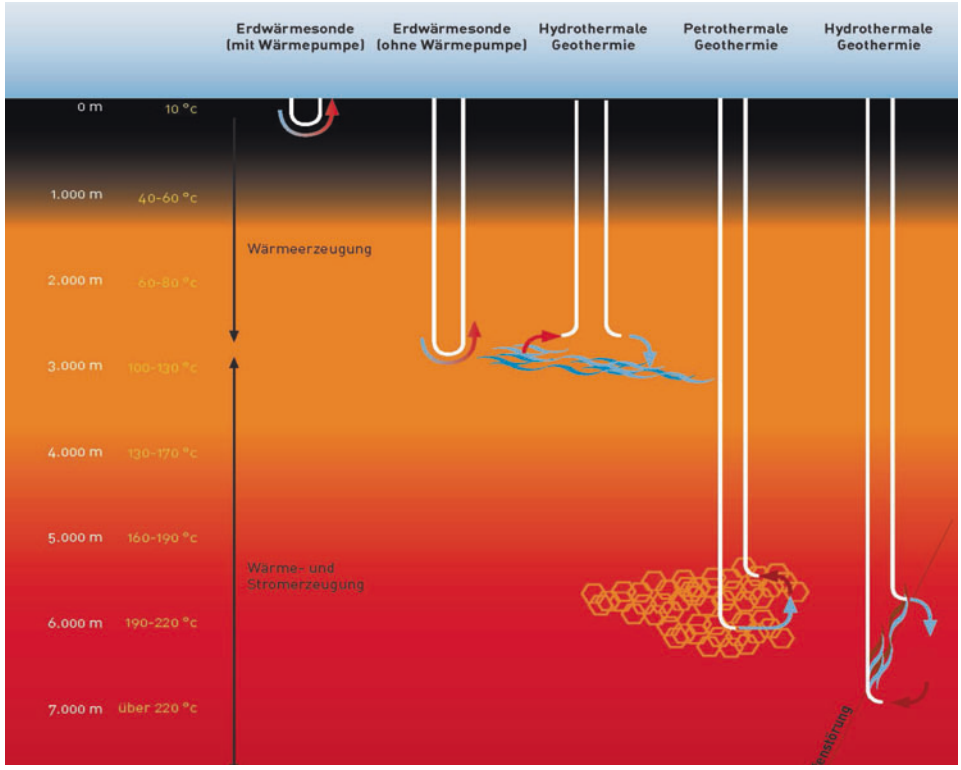


Abb. 28.1 Geothermische Nutzungsmöglichkeiten: Erdwärmesonden, hydrothermale und petrothermale Geothermie

tiefe geothermische Systeme. Dabei sei allerdings vermerkt (vgl. zum Beispiel (Stober and Bucher 2012)), dass der Übergang in der Nomenklatur fließend ist. Eine Unterscheidung zwischen Tiefer und Oberflächennaher Geothermie stellt sich aber dennoch in vielerlei Hinsicht als sinnvoll dar, da korrespondierend mit den unterschiedlichen Techniken zur Energiegewinnung auch spezifische Parameter zur wissenschaftichen Beschreibung adäquat und hilfreich sind. Für die hier angestrebte Schlussdarstellung, einen Ausblick über Schlüsselelemente, Herausforderungen, Chancen und Perspektiven geothermischer Energie zu geben, ist z. B. zu vermerken, dass einige Elemente der tiefen und oberflächennahen Systeme wie etwa geomathematisch-physikalische Prospektions- und Explorationsmethoden weitgehend gleichgelagert und somit in der Wertung vergleichbar sind, andere Elemente, wie Projektmanagement, Realisierung und Bau, bedürfen jedoch einer strikt differenzierten Würdigung.

Traditionsgemäß umfasst die Tiefe Geothermie (vgl. Bauer et al. 2014) Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen mit einer Tiefe von mehr als 400 m und einer Temperatur von mehr als 25° C erschlossen wird und deren Energie unmittelbar einer Nutzung zur Strom- und Wärmegewinnung zugeführt wird. Die Oberflächennahe Geothermie grenzt sich von der Tiefen Geothermie dadurch ab, dass eine energetische Nutzung meist nur durch Wärmepumpen, d. h. einen a-priori-Einsatz von bereits verfügbarer Energie zur Niveauanhebung, möglich wird (vgl. z. B. Sanner 2001). Für die Stromerzeugung ist die Oberflächennahe Geothermie aufgrund der niedrigen Temperaturen weniger geeignet; hierfür kommt die Tiefe Geothermie zum Einsatz. Die Beschreibung ihrer spezifischen Arten der Nutzung finden sich in (Bauer et al. 2014).

28.1 Arten der Nutzung in der oberflächennahen Geothermie

Im Prinzip ist die Nutzung der oberflächennahen Erdwärme aus geologischer Sicht überall in Deutschland, Österreich und Schweiz geeignet. Jedoch müssen bestimmte Aspekte berücksichtigt werden, u. z. technische, wirtschaftliche und rechtliche Voraussetzungen. Eine Erdwärmeanlage ist für jede Situation geeignet und abhängig vom Bedarf an Wärmemenge zu dimensionieren. Da der Temperturbereich bis etwa 100 m Tiefe mit durchschnittlich 7–12° C zum direkten Heizen zu gering ist, wird er mittels Wärmepumpe auf das benötigte Niveau angehoben, in der Regel auf ca. 35° C. Wie bereits betont, ist somit für die Oberflächennahe Geothermie bei Einsatz von Wärmepumpen ein wesentliches Aufkommen an Primärenergie unvermeidbar. Wärmepumpen können dabei nicht nur elektrisch, sondern auch mittels Gas- und Hybridtechnologie betrieben werden. Die Letzteren eignen sich besonders für den Gebäudebestand. An der Oberfläche ist dabei von einer Bohrung nur ein Gebiet von einigen Quadratmetern Fläche betroffen. Für besonders geringe Tiefen von wenigen Metern werden auch Erdwärmekollektoren und Erdwärmekörbe eingesetzt, die dann allerdings bei der Installation einen wesentlich ausgedehnteren Oberflächenbereich vereinnahmen. Auch für die Raumkühlung ist das Temperaturniveau

von 7–12° C ohne zusätzliche Kältemaschinen meist gut geeignet. Für beide Einsatzbereiche, d. h. Wärmeerzeugung und Kühlung (vgl. Sanner 2001), steht insgesamt ein breites Spektrum von Techniken zur Erschließung der Wärmequellen (Grundwasser, Boden, Festgestein) zur Verfügung.

Als wichtigste Typen der Wärmequellenanlagen (siehe z. B. Töpfner und Fritzer 2005) können gelten: Erdwärmekollektor, Erdwärmesonde, Grundwasserwärmepumpe, erdberührte Betonbauteile („Energiepfähle"), thermische Untergrundspeicher. Als Sonderfälle im Übergangsbereich der Oberflächennahen zur Tiefen Geothermie sind zu nennen: Tiefe Erdwärmesonden (über 400 m Tiefe, z. B. in aufgegebenen Bohrungen), Erdwärmegewinnung aus Ab-, Gruben- oder Tunnelwässern.

28.2 Vorteile oberflächennaher Geothermie

Heizöl- oder Erdgasheizungen müssen ständig fossile Energien zugeführt werden, was zu beachtlichen Betriebskosten führt. Wer Erdwärme nutzt, investiert zwar anfangs mehr in die Heizanlage, holt diese Mehrkosten bei richtiger Planung aber innerhalb weniger Jahre wieder herein. Genauer gesagt, Erwärme amortisiert sich im Vergleich zu Gas und Öl schätzungsweise nach ca. 5–10 Jahren bei einem Einfamilienhaus. Besonders bei größeren Objekten und vor allem dort, wo auch noch Kühlbedarf abgedeckt werden soll, sind Erdwärmeanlagen den konventionellen Systemen wirtschaftlich überlegen. Auch bei Neubauten von Ein- oder Zweifamilienhäusern hat man die Mehrausgaben gebenüber einer gewöhnlichen Heizung nach ungefähr 10 Jahren amortisiert. Investitionshilfen gibt es oftmals aus Marktanreizprogrammen z. B. vom Staat (vgl. z. B. Töpfner und Fritzer 2005; Tholen und S. Walker-Hertkorn 2007; Kummer et al. 2013).

Was die Regeneration des Erdreichs angeht, so wird sich das Wärmevorkommen bei der Oberflächennahen Geothermie in der Regel nicht erschöpfen. Im Falle von Erdwärmesonden kann Wärme horizontal nachfließen, sodass der Wärmeentzug nicht stark ist. Im Falle von sehr oberflächennahen Erdwärmekörben kann die Regeneration sogar auch durch die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche erfolgen.

28.3 Geothermische Energie als erneuerbare Energiequelle

Oberflächennahe und tiefe geothermische Energie ist eine der wichtigen erneuerbaren Energiequellen mit vielen nützlichen Möglichkeiten:

- *Extensive globale Verteilung:* Chrakteristisch für den Geothermiesektor ist, dass eine gemeinsame weltweite Forschungsaktivität nicht durchführbar ist, da sich geologische und geothermische Bedingungen wesentlich zwischen den Ländern unterscheiden.

Geothermische Energie benötigt dezentrale Forschungsmöglichkeiten, die aber durch ein enges Netz an Trainings- und Ausbildungsaktivitäten weltweit ergänzt werden sollten.

- *Saisonale Unabhängigkeit:* Geothermische Technologie ist nicht abhängig von Wetterphänomenen (wie Sonnen- und Windeinfluss) und ist überall und jederzeit im Erdinneren verfügbar. Dieser Umstand ermöglicht anders als z. B. bisher im Windenergiesektor (vgl. z. B. Ahlborn 2015; Staffell und Pfenninger 2016) verlässlichere Aussagen über das zur Verfügung stehende Energieaufkommen.
- *Umweltfreundlicher Charakter:* Insbesondere geothermische Energieprojekte erzielen eine hervorragende CO_2-Bilanz. Nach der Installation einer geothermischen Energieanlage ist die Nutzung nahezu wie CO_2-frei. In der Oberflächennahen Geothermie kommen allerdings Energieverbraucher wie etwa Wärmepumpen zum Einsatz.
- *Beitrag zur Entwicklung einer breit gefächerten Energieversorgung:* Geothermische Quellen bilden eine zuverlässige lokale Energiequelle, die bis zu einem gewissen Grad verwendet werden kann, um die auf fossilen Brennstoffen basierende Energieproduktion zu ersetzen.

Infolgedessen weist der International-Energy-Agency-Bericht (siehe z. B. Mongillo 2011) auf die Aussicht hin, dass geothermische Quellen das Potenzial haben, bei der Deckung des weltweiten Energiebedarfs die Emissionen zu reduzieren und somit den Klimawandel abzuschwächen (vgl. auch Agentur für Erneuerbare Energien 2010a, b).

Das globale geothermische Potenzial ist dabei enorm. Der Kenntnisstand zur geothermischen Nutzung in Deutschland macht deutlich, dass geothermische Energie grundsätzlich eine mehr als ernst zu nehmende Option für die zukünftige Energieversorgung darstellt, wenn auch nur Bruchteile der geschätzten Potenziale tatsächlich genutzt werden können. Abschätzungen in dieser Detaillierung wurden erstmalig in (Paschen et al. 2003) für ganz Deutschland vorgelegt. Wie in dieser Studie selbst betont, bedürfen die Zahlenangaben aber weiterer Konkretisierungen im regionalen und lokalen Maßstab.

28.4 Herausforderungen an oberflächennahe/tiefe Geothermie

Der GLITNIR geothermische Forschungsbericht (siehe Welding 2007) listet einige Herausforderungen auf, die aus heutiger Sicht für Oberflächennahe und/oder Tiefe Geothermie Gültigkeit haben:

- Mit der schnellen Entwicklung der Industrie entsteht ein *sofortiger Bedarf an zusätzlichem Expertenwissen* (von Ressourcenentwicklung bis zu Business Management), unterstützende Dienstleistungen (Bohrkapazitäten, Daten- /Informationsbeschaffung

und -verfügbarkeit, Technologie, Ausrüstung für die Energieerzeugung etc.), Fokussieren des Kapitals, Transparenz des Versicherungsmarktes und Akzeptanz in der Öffentlichkeit.

- *Risikominimierung unter Einbindung geowissenschaftlicher Forschungsarbeit aus Geologie, Geophysik sowie Geomathematik* ist auch in der Oberflächennahen Geothermie absolut unabdingbar. Die geomathematische Aufgabe, geologische Information des Erdinnern aus z. B. gravimetrischen oder seismischen Daten an der Erdoberfläche zu gewinnen, führt unabhängig von der angestrebten Tiefenlage zu einem sogenannten schlecht gestellten Problem – inverses, das allerdings mit zunehmender Tiefe intensivierterer mathematischer Lösungspotenziale und Numerik bedarf. In der Konsequenz sind auch Probleme der Oberflächennahen Geothermie mathematisch schlecht gestellt und daher stets eine echte Herausforderung aus explorativer Sicht. Weitere universitäre Ausbildung ist nötig, um den Talentpool für die Industrie zu erweitern. Es ist offensichtlich, dass das Projektrisiko mit unerfahrenen Geowissenschaftlern und wenig technisch versierten Ingenieuren steigt.
- Es bleiben erforderliche Akzelleratoren und ein gewisser Druck, *Projekte zu beschleunigen*, wobei man das Engagement verschiedener Mitspieler und Institutionen benötigt, einschließlich der Öffentlichkeit.
- Oberflächennahe geothermische Energie ist die einzige Alternative aus dem Bereich der Erneuerbaren Energie zur Abdeckung der Wärmelast, aber *in vielen Ländern erhält sie nicht genug politische Unterstützung.* In diesem Zusammenhang (vgl. z. B. Czisch 2005) sollte auch Erwähnung finden, dass auch Förderprogramme für eine flächendeckende Speichertechnologie von Vorteil wären, um den volatilen Wind- und Sonnenstrom in Grundlast umzuwandeln.
- Die weitere Expansion der Geothermie hängt davon ab, neue Felder zu erkunden und technische Schwierigkeiten in bekannten, aber noch nicht erkundeten Feldern zu bewältigen. Eine wichtige Forderung, die derzeit die geothermische Gemeinschaft bewegt, ist die *Entwicklung von verlässlichen Forschungsresultaten* ohne vorherige nicht wissenschaftsbasierte Vorverurteilung durch Politik und Bevölkerung.
- Das *mögliche Risiko von induzierte Seismizität,* verhindert den nachhaltigen Erfolg der geothermischen Technologie und führt zu Problemen bei der Akzeptanz in der Bevölkerung. Es gibt nicht nur in der Tiefen Geothermie eine Diskrepanz zwischen der Bereitschaft der Bevölkerung hinsichtlich einer intensiveren Nutzung von „grüner Energie“ und der Akzeptanz der Nachbarschaft in der Nähe von geothermischen Anlagen.
- Erdwärme gilt nach dem deutschen Bundesberggesetz (BBergG) als bergfreier Bodenschatz. In der Verwaltungspraxis werden jedoch oftmals nur Erdwärmeprojekte mit Bohrungen von mehr als 100 m Tiefe oder einer Leistung von ≥ 0.2 MW bergrechtlich behandelt, was hinterfragt werden könnte.
- Zur Zeit hat eine Wärmepumpe gegenüber Gaswärme einen Kostenvorteil von geschätzt ca. 30%. Sollten jedoch die Strompreise im Zuge der Energiewende weiter steigen, und

dies ist wohl mit Sicherheit anzunehmen, so ist als fatale Konsequenz zu erwarten, *d*ass die Oberflächennahe Geothermie unwirtschaftlich wird und deren Entwicklung dann zumindest in Deutschland bei Nichtänderung bisheriger Einflussbedingungen zu Ende gehen wird.

Die Schlüsselelemente einer erfolgreichen geothermischen Energieentwicklung unter Einschluss der geowissenschaftlichen Komponenten sind übersichtlich in Abb. 28.2 dargestellt.

28.5 Schlüsselelemente bei der Entwicklung der oberflächennahen/tiefen Geothermie

Insgesamt ergeben sich die folgenden Elemente bei der Entwicklung der Geothermie vgl. (MIT 2006), welche die Forderung nach verstärktem Einsatz von wissenschaftlich-technischer Forschung und die hieraus resultierende Schaffung spezifisch geothermischer Schlüsselkompetenzen nachhaltig verständlich machen:

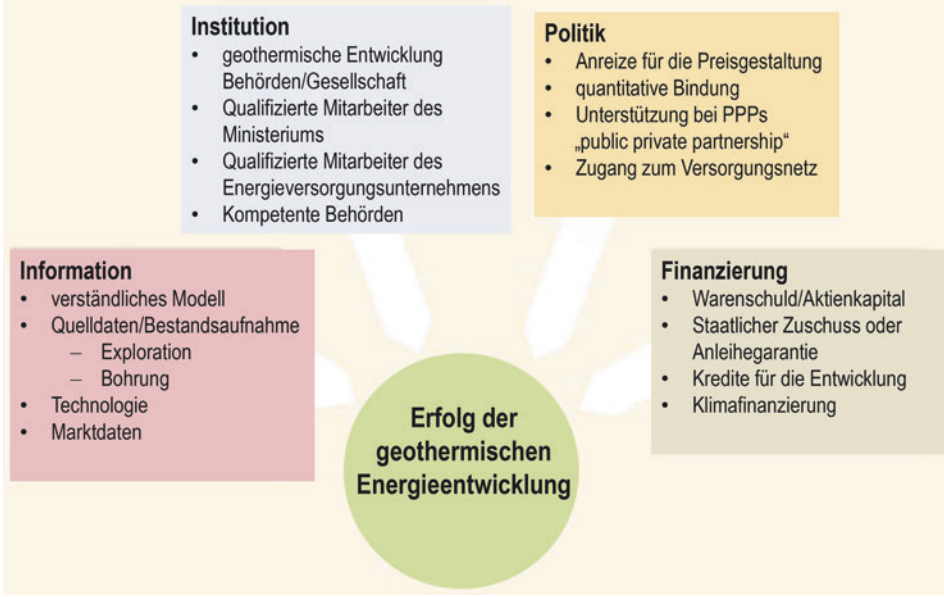


Abb. 28.2 Schlüsselelemente geothermischer Energieentwicklung. (Modifizierte Illustration nach (Gehringer und Loksha 2012))

- Geothermische Energie ist hinsichtlich ihres konzeptionellen Wesens hervorragend innerhalb der Erneuerbaren Energien aufgestellt.
- Die soziopolitische Akzeptanz in der Bevölkerung stellt mehr und mehr einen Erfolgsfaktor bei der Realisierung geothermischer Projekte dar. Die oftmals in Deutschland vorverurteilenden Indikatoren „Risikoempfindung“ und „gesellschaftlicher und individueller Nutzwert“ sind entscheidende, gewöhnlich nicht tiefer in ihrer Substanz hinterfragte Merkmale (vgl. (Aitken 2010)), deren wissenschaftlich unumstößlichen Charakter es zu ergründen und zu kommunizieren gilt.
- Moderne wissenschaftliche Methoden in Exploration, Realisierung und Nutzung sind entscheidend zur Reduzierung des Misserfolgsrisikos. Eine Förderung verstärkt interdisziplinärer und zielorientierter Forschungsaktivität ist unabdingbar, um verlässliche, wissenschaftsbasierte Meinungs- und Entscheidungsprozesse in Öffentlichkeit und Politik zu treffen.

Alles in allem ist die geothermische Energie auf der Schwelle, ein wichtiger Baustein beim zunehmenden Bedarf an erneuerbarer Energieproduktion zu werden. Alle Entwicklungen und Erfolgsfaktoren sollten lokal abhängigem Verständnis von glaubwürdiger Forschungsarbeit und externem wie auch internem Interessengruppenmanagement unterliegen. Interdisziplinäre Forschung, die sich mit geothermischem Business beschäftigt, kann/wird/sollte helfen, die kritischen Punkte zu bewältigen, d. h. Risikoreduzierung, wirtschaftliche Effizienz, und schließlich die starke Dekorrelation von geothermischer Energiegewinnung und lokaler Seismizität und – so ist vor allem zu hoffen – eine erhöhte soziopolitische wissenschaftsbasierte Akzeptanz.

Literatur

Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Fakten: Die wichtigsten Daten zu den Erneuerbaren Energien – Schnell und kompakt. Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Berlin (2010a)

Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Fakten: Erneuerbare Energien 2020 - Potenzialatlas Deutschland. Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Berlin (2010b)

Ahlborn, D.: Statistische Verteilungsfunktion der Leistung aus Windkraftanlagen. World of Mining, **67**(4), 272–277 (2015)

Aitken, M.: Why we still don’t understand the social aspects of wind power? A critique of key assumptions with the literature. Energy Policy, 38, 1834-1841 (2010)

Bauer, M. , Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T., (Hrsg.): Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung. Springer Spektrum, Berlin (2014)

Czisch, G.: Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung. Dissertation, Institut für Elektrische Energietechnik / Rationelle Energiewandlung. Universität Kassel, Kassel (2005)

Gehringer, M., Loksha, V.: ESMAP (Energy Sector Management Assistence Programm), Main Findings and Recommendations (Hrsg.) Handbook on planning and financing geothermal power generation. The International Bank for Reconstruction and Developement, Washington (2012)

Kummer, S., Bleckmann, F., Schulze, M., Mai, M., Landmeyer, N., Wenzel, D., Landgraf, C.: Oberflächennahe Geothermie, S. 1–2. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg (2013)

MIT : (Massachusetts Institute of Technology), The Future of Geothermal Energy (2006)
Töpfner, C, Fritzer, T.: Oberflächennahe Geothermie. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz und Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, S. 1–17. Initiative klimafreundliches Bayern, München (2005)
Paschen, H., Oertel, D., Grünwald, R.: Büro für Technikfolgenabschätzung des deutschen Bundestages. Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland, Berlin (2003)
Mongillo, M.: International Efforts to Promote Global Sustainable Geothermal Development. GIA Annual Report Executive Summary, International Energy Association, 1–19 (2011)
Sanner, B., Erdwärme zum Heizen und Kühlen. Potenziale, Möglichkeiten und Techniken der oberflächennahen Geothermie. Kleines Handbuch der Geothermie. Bd 1. Red. B. Sanner, W. Bußmann. Geothermische Vereinigung, Geeste (3. überarb. Aufl.) (2001)
Staffell, I., Pfenninger, S.: Using Bias-Corrected Reanalysis to Simulate Current and Future Wind Power Output. Energy, published online 5th Sept. 2016. https//doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068
Stober, J., Bucher, K.: Geothermie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (2012)
Tholen, M., Walker - Hertkorn: Arbeitshilfen Geothermie Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn (2007)
Welding, L.: GLITNIR Geothermal Research, United States Geothermal Energy Market, Report 2007, 1–37.

Stichwortverzeichnis

A
A-priori-Information, 273
Abbruchvorschrift, 273
Abdichtung, 594
Abdichtungsnachweis, 594
Abstandshalter, 461, 472, 474
Adäquanzlehre, 345
Afrika, 784
Akzeptanz, 696
  Energie, 695
  gesellschaftliche, 692
  Umweltbewusstsein, 698
Akzeptanzforschung, 695
Altlasten, 202, 684
Amerika, 784
Angebote, 365
Anhydrit, 196, 287
Anomalie, thermische, 643
Anschluss- und Benutzungszwang, 33
Anzahl der Sonden, 363
Anzeigepflicht, 340
App, 704
approximative Lösung, 268
Aquifer, 11, 282
  hochdurchlässiger, 282
  offenes System, 283
Arbeitsschutz, 716
  rechtliche Bestimmungen, 724
Arbeitsschutzgesetz, 725, 726
Arbeitsschutzmanagement, 735
Arbeitsschutzrecht, 723
Arbeitssicherheit, 716, 718
Arbeitssicherheitsorganisation, 728
Arbeitssystem, komplexes, 720
Arbeitsunfall, 724
Arbeitswissenschaft, 720
Arteser, 759
Asien, 791
Auflösungsvermögen, 106
Aufsuchung
  wissenschaftliche, 338
  zu gewerblichen Zwecken, 338
Ausführung, 365
Ausführungsplanung, 364
Autarkie, 55

B
Böblingen, 99
Balneologie, 782
Bandpassfilterung, 229, 232
Bauüberwachung, 366
Baualtersklasse, 27
Bauherr, 724
Baurisiko, 312
Bauteile, thermisch aktivierte, 478
  Auslegung, 500
  Bemessung, 495
  Randbedingungen, 494
  Spezialsysteme, 491
  Typen, 479
Beanspruchung, 722
Beauftragung, 355
Behaglichkeit, 38, 405
Belastung, 718
Belastungsbeurteilung, 733
Bergbau, 685
Bergbauberechtigung, 337

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

M. Bauer et al. (Hrsg.), *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2

Bergrecht, 326, 336, 337, 540
  immissionsschutzrechtliche Anforderungen, 348
  wasserwirtschaftliche Belange, 348
Bergschadenshaftung, 340, 342
Bergschadensvermutung, 342
Berufskrankheit, 718
Besselsche Zylinderfunktion, 623
Bestandsgebäude, 33
Betain, 289
Betriebsplanpflicht, 347
Betriebsrisiko, 687
Betriebszusammenhang, 343
Bewertung
  ökologische, 48
  ökonomische, 49
Blockheizkraftwerk (BHKW), 44, 514
Bodenhebung, 344
Bodenplatte, 484
Bodenradar, 71, 110, 123, 164
  Grundwasserspiegel, 188
  Messverfahren, 164
  petrophysikalische Parameter, 123
Bodentemperatur, 625
Bohranlage, 375
Bohren von Erdwärmesonden, 381
Bohrkronen, 393
Bohrlochbergbau, 341, 342
Bohrlochmessung, 587
  Abdichtungsnachweise, 594
  Diffusionsströmungen, 606
  frei zirkulierende Fluide, 603
  hydraulische Wirksamkeit, 602
  Konvektionsströmungen, 606
  magnetische Suszeptibilität, 598
  Zielsetzung, 589
Bohrlochwiderstand, 625
  effektiver thermischer, 624
  thermischer, 623
Bohrplatz, 54
Bohrrisiko, 59, 305
Bohrtechnik, 375
  geschlossenes System, 371
  offenes System, 371
Bohrtiefe, 339
Bohrung, 339, 341
  Auslegung, 639
  geschlosses System, 458
  oberflächennahe, 373
  offenes System, 452
  petrothermale Verfahren, 336
  Planung, 639
  Platzierung, 639
  tatsächliche Tiefe, 642
  Verlauf, 641
Bohrunternehmen
  fremdüberwachtes, 665
  Qualitätssicherung, 659
Bohrverfahren, 386
  Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren, 392
  Rotary-Druckspülbohrverfahren, 387, 390
Bohrzubehör, 378
Bouguer-Schwere, 169
Brennwert, 35
Brunnen
  Filterrohr, 455
  Saugbrunnen, 453
  Schluckbrunnen, 454
Brunnenanlage, 452
Brunnenbau, 590, 662
Brunnenvorschacht, 457
Bundesberggesetz, 726

C

Cauchy-Navier-Operator, 224
Chaudes-Aigues, 6
Coefficient of Performance (COP), 36, 54
Contractor, 44
Cotta, Carl Bernhard von, 6

D

d'Alembertscher Operator, 262
Dampfdrucksäule, statische, 432
Datenkompression, 229
Datenverarbeitung, 110
Dekorrelation, 228
Deutschland, 790
DGM, 81
Dichteanomalie, 639
Dichtelog, 590
Diffusionsströmung, 606
Diffusionsverfahren, 263
Diffusivität, thermische, 621
Dilemma, 259, 264, 271
Dimensionalität, 273

Dimensionierungen des Erdwärmesondenfeldes, 363
Diracsche(s) Deltafunktion(al), 232
direktes Problem, 264
Direktverdampfersonde, 414, 473
Direktverdampfung, 410
Discrete-fracture-network-Methode (DFN-Methode), 16
Diskretisierung, 270
Dolinen, 680
Doppel-U-Sonde, 459
Doppelkopf-Bohranlage, 390
Druckprüfung, 467, 473, 476
Dual-continuum-Methode (DC-Methode), 16
Durchflussprüfung, 467, 473, 476
Durchgangswiderstand, thermischer, 624

E
Effective-continuum-Methode (ECM-Methode), 16
Effektivitätsrisiko, 305
EHPA-Gütesiegel, 656
Ehrenfriedersdorf, 570
Eigenpotentialmethode, 146
Einbau einer Erdwärmesonde, 383
Einfach-U-Sonde, 460
Einstellung, gesellschaftliche zu Technologien, 696
Eintrittswahrscheinlichkeit, 300
Eisfreihaltung, 492, 783
Elastizitätstheorie, 224
Electrical Imaging, 134
Emission, 48
Endenergie, 24
Endenergiebedarf, 398
Energieanker, 492
Energiebedarf, 400
Energieeffizienz, 331, 398, 400
  Einfluss auf Wärmepumpen, 402
  Jahresarbeitszahl, 402
  Leistungszahl, 401
Energieeinsparverordnung (EnEV), 25, 31, 330, 398
Energiekonzept, 32
Energiepfahl, 480
  Berechnungsansätze, 501
  numerische Ansätze, 504
Energieträger, 35
Energiewände, 484
Energiewende, 692, 708
EnEV, 330
Enhanced Geothermal Response Test (EGRT), 626
Entgasung, 683
Entrauschung, 229
Entwurfsplanung, 363
Entzugsleistung, 643
Erde
  Schalengestalt, 3
  Wärmepotential, 4
Erdrutsch, 198
Erdsonde, 54, 57
Erdstrahlen, 214
Erdwärmebohrung, 341
Erdwärmekollektor, 630
Erdwärmenxutzung, 339
Erdwärmesonde, 471, 588, 638, 662
  Einbau, 462
  Installation, 641
  Koaxialsonde, 460
  U-Sonde, 459
  Zentrierungen, 461
Erdwärmesondenanlage, 291
Ereigniskommunikation, 704
Erkundung, 361
Erkundungsbohrung, 338
Erkundungstiefe, 105
Erlaubnis, wasserrechtliche, 340
Erneuerbare Energien Gesetz (EEG), 56
Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz (EEWärmeG), 329
Erneuerbare-Energien-Richtlinie, 332
Erprobungsbohrung, 350
Ethylenglykol, 290
EU-Energielabel, 402
Euler-Mascheroni-Konstante, 621
Europa, 789
Exploration, 12
Expositionsklasse, 287
Exzenter-Bohrmeißel, 393

F
Förderbrunnen, 453
Förderprogramm, 31
Füllgrad, 427
Fallfilmverdampfer, 417

Fehlerspezifikation, 267
Feld, elektrisches, 107
Fernwärme, 47
Filtermethoden, 273
Filterrohr, 455
Filterschüttung, 456
Filterung, 229
Filterverfahren, 112
Finanzrisiko, 305
Flächenheizung, 54
Flächenverbrauch, 27
Flüssiggas, 518
Flüssiggastank, 515
Flüssigkeitszirkluationssonde, 414
Fließgeschwindigkeit, 189
Fluten, 425
Fortsetzung, analytische, 115
Frac-Maßnahmen, 349
Fracking, 349
  Technologie, 349
Fracking-Gesetz, 336, 341
Fracture-matrix-Methode (FM-Methode), 16
Frankreich, 6
Freiberg, 562
Frequenzelektromagnetik, 137
Frequenzlokalisierung, 229
Frostschutzmittel, 289
Fundamentallösung, 223
Funktionenräume, 272

G

Gütesiegel, 656, 737, 764
Gamma-Gamma-Dichte-Log, 646
Gamma-Gamma-Messung, 596
Gamma-Ray-Log, 590, 645
Gammastrahlung, 596
Gasaustritt, 680
Gastank, 518
Gebäudeausrüstung, technische, 30
Gebäudehülle, thermische, 29
Gebäudeschäden, 345
Gebäudetypologie, 27, 34
Gefährdung, 718, 731
  latente, 345
Gefährdungsbeurteilung, 733
Gefährdungshaftung, 345
Gefahr, 718
Gefahren für die Oberfläche, 346
Gefahrschwelle, 346
Geländemodell, digitales (DGM), 81
Genehmigung, wasserrechtliche, 325
Genehmigungsplanung, 364
Geoelektrik, 103, 120, 130, 639
  Grundwasserspiegel, 188
  Messverfahren, 130
  petrophysikalischen Parameter, 120
Geologie, 67, 72
Geomagnetik, 102, 125, 170, 261
  Messverfahren, 170
  petrophysikalische Parameter, 125
Geophon, 154
Geophysik, 67, 639
  Messverfahren, 128
Georadar, 123
GeoScan Systems, 640
Geosniff, 648
Geothermal Response Test (GRT), 96, 614
Geothermie
  bergrechtliche Haftung, 342
  Betriebskosten, 53
  direkte Nutzung, 17
  Geschichte, 6
  geschlossenes System, 94
  historische Projekte, 374
  hydrothermales System, 11
  indirekte Nutzung, 17
  Klassifikation, 7
  Messverfahren, 175
  mitteltiefe, 69
  Nachteile, 697
  Netzanschluss, 53
  offenes System, 92
  petrothermales System, 11
  Platzbedarf, 53
  rechtliche Bestimmungen, Schweiz, 770
  Risiko, 694, 700, 734
  Schweiz, 756
  tiefe, 11
  Verfügbarkeit, 52
  Vorteile, 694, 697
  weltweit, 780
  Wertschöpfung, 52
  Wirkungsgrad, 53
  Wissen, 695
Geothermieanlage
  Rahmenbedingungen, 324
Geothermiebohrung, 342–344, 350

mit Frac-Behandlung, 350
ohne Frac-Maßnahmen., 350
wasserrechtliche Anforderungen, 350
zu Lehr- und Unterrichtszwecken, 350
Geothermiesonde
Phasenwechselsonde, 410
Thermosiphon, 410
Wärmerohr, 410
Geschichte der Geothermie, 6
Gestein
überkonsolidiertes, 679
lösliches, 678
quellfähiges, 677
sulfathaltiges, 286
Gesundheitsschutz, 716
Gesundheitsschutzmanagement, 735
Gesundheitsschutzrecht, 723
Gewässerschutz, 59
Gewinnung, grundstücksbezogene, 337
Gewinnungsgrundstück, 337
Gips, 196, 287
Glasfaserkabel, 627
Glykol, 289
GPR, 123
Gradient
geothermischer, 5
hydrochemischer, 682
Gradientenverfahren, 116
Gravimeter, 169
Gravimetrie, 102, 123, 166, 222, 224, 260
Messverfahren, 166
petrophysikalische Parameter, 123
Gravimetrieproblem, 260
GRT, 97
Grubengas, 343
Grubenluft, 562
Grubenwasser, 523
Nutzungspotential, 534
Grubenwasseranlage
Anlagendaten, 529, 548, 559
Aufbau und Funktionsweise, 525
Beispiele, 561
Ehrenfriedersdorf, 570
Europa, 559
Nachteile, 531
Nordamerika, 561
Nutzungsarten des Grubenwassers, 526
Planung, 532, 533
Reiche Zeche Freiberg, 562
Umsetzung und Betrieb, 539
Vorteile, 530
Wasserchemie, 542, 565
weltweit, 548
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, 538
Grundgleichungen, 259
Grundlagenermittlung, 359
Grundlastanforderungen, 367
Grundstücksnutzung, private, 350
Grundwasser, 340, 499, 681, 759
Änderungen der Chemie, 290
als Trägermedium, 339
nachdrängendes, 346
rechtliche Bestimmungen, 325
Grundwasserbeschaffenheit, 281, 283
Probenahme, 283
Grundwassereinfluss (GRT), 619
Grundwasserfließrichtung, 189
Grundwasserspiegel, 186
Grundwasserstockwerke, 682
Grundwasserwiederanstieg, 342

H

Haftung, 341
bergrechtliche, 342
Kausalität, 344
Hangrutsch, 198
Haspel, 383
Hauptbetriebsplan, 348
Heat Pipe, 412
Heizanforderungen, 367
Heizen, 398, 782
Heizlast, 34
Heizlastberechnung, 403
Heizleistung, 625
spezifische, 625
Heizwärmebedarf, 34
Helmholtz-Operator, 224, 261
Hochenthalpielagerstätte, 7
Hohlraumortung, 199
Hot-Dry-Rock-System, 12
Hybridkabel, 627
Hydratationswärme, 631
Hydrogeologie, 72

I

Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren, 377, 392
Impulselektromagnetik, 137, 141

Industrie, 783
Infrarotspektroskopie, 287
Ingenieurgeophysik, 206
Injektionsbrunnen, 454
Integralgleichung, 259
Internationale Energie Agentur (IEA), 788
inverse Probleme, 264
Inversion, 251
Island, 7

J
Jahresarbeitszahl (JAZ), 36, 57, 401, 402
Jahresnutzungsgrad, 401
Jahresprimärenergiebedarf, 399
Japan, 6
JAZ, 57

K
Kältemittel, 396
Kühlanforderungen, 367
Kühlen, 398, 405
  Behaglichkeit, 405
  Kühlfläche, 407
  Kühllast, 406
  Kosten, 407
  passive Kühlung, 406
  Planung und Auslegung, 407
Kühlfläche, 407
Kühllast, 406
Kühlung, 57
  direkte, 339
  passive, 406
Kanada, 784
Karst, 194
Karte
  geologische, 73
  geothermische, 80
  hydrogeologische, 78
  topographische, 77
Kenia, 784
Keymark, 658
KfW-Förderbank, 32
Klimaschutz, 57
Koaxialsonde, 460
Kollektor, 54, 57
Kommunikation, 699
  Goldene Regeln, 703
Kommunikations- und Interaktionsformat, digitales, 703
Kommunikationsgrundsätze, 702
Kommunikationskonzept, 699
Kommunikationsstrategie, 699, 700
  Zielgruppe, 702
Kommunikationstool, 703
Kompaktmischanlage, 383
Kompressionswärmepumpe, 396
Kondensator, 397
Kontaktwiderstand, thermischer, 624
Konvektionsströmung, 606
Konvergenzrate, 268
Kooperationsbereitschaft, 58
Korea, 791
Korrosion, 285
  mikrobiell induzierte (MIC), 285
Korrosionsinhibitor, 289
Kostenfeststellung, 365
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), 44, 515
Kreiselpumpe, 380
Krise, 707
Krisenkommunikation, 707

L
Landweber-Iteration, 273
Laplace-Operator, 224
Larderel, 6
Lebenszykluskosten (LZK), 49
Leckage, 290
Leistungsbeschreibung, 365
Leistungszahl, 401
Linienquellentheorie, 620
Luft-Wärmetauscher, 517

M
Mängelfeststellungen, 365
Machbarkeitsprüfung, 359
Magnetfeld, 107
Magnetlog, 590
Magnetotellurik, 136
Marktanreizprogramm (MAP), 31, 329
  KfW-Teil, 330
Massenbewegung, 680
Medien, 706
Medienanalyse, 707
Messkette, 627

Messkugel, 648
Messmolch, 648
Messrammsonde, 629
Messsonde, 645
Messtechnik
  Geothermal Response Test, 615
  Temperaturprofilmessung, 631
Messung
  geophysikalische, Mehrdeutigkeit, 118
Messungen
  Beweissicherung, 638
  Enhanced Geothermal Response Test, 626
  faseroptische, 627
  Gamma-Gamma-Dichte-Log, 646
  Gamma-Ray-Log, 645
  Messkugel, 648
  Messmolch, 648
  Messsonde, 645
  Monitoring, 638
  Neutron-Neutron-Log, 646
  Profilmessungen, 631
  Qualitätskontrolle, 638
  Temperaturprofil, 646
  Thermal Response Test, 614, 650
Messverfahren
  Geophysik, 128
  geophysikalische, 100
5-M-Methode, 673
Mexiko, 786
MIC, 285
Migration, 12
Mineral
  prograder Löslichkeitsverhalten, 290
  retrograder Löslichkeitsverhalten, 290
Mineralisation, 566
Mischanlage, 383
Mise-à-la-masse-Methode, 148
Modellierung, 12, 16
Moratorium für Fracking, 349
Multiple-interacting-continua-Methode (MINC-Methode), 16
Multiskalenmethode, 224

N
Nahwärmenetz, 41
  kaltes, 46
Neutron-Neutron-Log, 590, 646
Newtonsches Gesetz, 227
Nichtwissen, 696
Nichtwohngebäude, 26
Niederenthalpielagerstätte, 8
Niederlande, 790
NIMBY-Phänomen, 696
NMR-Verfahren, 179
Normen, SIA-Norm, 761
Nutzerverhalten, 58
Nutzung, gewerbliche, 337
Nutzungspotential, geothermisches, 626

O
Oberflächennahe Geothermie, 779
Oberflächenwasser, 340
Öffentlichkeit
  kritische, 692
Öffentlichkeitsarbeit, 693
Öffentlichkeit, 333
Operatorgleichung, 264
Organismus
  hyperthermophiler, 291
  psychrophiler, 291
Ortslokalisierung, 229

P
Pamukkale, 6
Parameter
  geothermische, 127
  petrophysikalische, 119
Parameterwahl, 272
Partizipation, 694, 699
  aktive und passive, 701
  Dialog, 700
PEF, 57
Permeabilität, 181
Phasenwechselsonde, 410, 473
  Anwendungsbeispiele, 417
  Aufbau und Funktion, 411
  Auslegung, 420
  Betriebsverhalten, 427
  energetische Bilanzierung, 438
  Füllmenge, 432
  geothermische, 410
  Grenzen/Arbeitsbereich, 421
  Heat Pipe, 412
  physikalische Grundlagen, 420
  Regeneration, 435

Phasenwechselsonde *(Forts.)*
Simulation, 441
Temperaturverteilung, 431
Piper-Diagramm, 544
Platzbedarf, 384
Poisson-Gleichung, 260
Polarisation, induzierte (IP), 133, 188
Porosität, 181
Potentialmethode, 222
Potentialverfahren, 263
Presse, 693
Preventer, 381
Primärenergie, 398
Primärenergiefaktor (PEF), 57
Profilmessung, 631
Prognose, bergbauliche, 348
Projektablauf, 359
Projektplanung, 368
Propan, 515
Propylenglykol, 290
Prozesswärme, 783
Pumpe, 457
Pumprate, 468

Q
Qualitätsanforderungen, 365
Qualitätsmanagement, 737
Qualitätssicherung, 641, 655
Bohrunternehmen, 659
Fachplaner, 668
Gütesiegel, 656
Installateure, 667
Keymark, 658
Personalqualifikationen, 662
Querschnittsrisiko, 301

R
Röntgendiffraktrometrie, 287
Rücklauftemperatur, 625
Radiometrie, 126, 173
Radiowellenmethode, 142, 193
Randbedingungen, 361
Rauschen, 108
Rauschfehler, 269
Rechenmodell, 96
Rechnungsprüfung, 365
Referenzgebäudeverfahren, 399
Referenzklima, 399
Reflexionsseismik, 158
Refraktionsseismik, 155
Regelenergie, 56
Regelkommunikation, 704
Regelwerk, technisches, 326
Regenwasserzisterne, 517
Regularisierer, 267
Regularisierung, 230, 266
Regularisierungsfehler, 269
Regularisierungsproblem, 268
Reiche Zeche, 562
Remote Sensing, 639
Restrisiko, 276
Reykjavik, 7
Ringraumhinterfüllung, 463, 473, 476
Risiko, 672, 693, 716
Betriebsrisiko, 687
geologisches, 96, 677
überkonsolidierte Gesteine, 679
Gasaustritte, 680
lösliche Gesteine, 678
Massenbewegungen, 680
quellfähige Gesteine, 677
Senkungsgebiete, 680
Tektonik, 679
hydrogeologisches
chemische Gradienten, 682
Entgasung, 683
Grundwasser, 681
Stockwerke, 682
Wasserqualität, 684
Sondeneinbau, 685
Staufen, 693
umwelttechnisches
Altlasten, 684
Bergbau, 685
wirtschaftliches, 312
Risikobewertung, 300
Risikoidentifizierung, 298
Risikokatalogisierung, 299
Risikomanagement, 296
Schadensminimierung, 312
Baurisiko, 312
Bewertung, 300
Bohrrisiko, 305
Finanzrisiko, 305
Identifikation, 298
Risikoreduzierung, 258

Risikoursachen
Maschinen, 676
Material, 675
Medium, 676
Mensch, 673
Methode, 674
Risikowahrnehmung, 333
Rollenmeißel, 390
Rotary-Druckspülbohrverfahren, 380, 387
mit gleichzeitiger Verrohrung, 390

S
Säuerungstechnik, konventionelle, 350
Sauerwasser, 347
Saugbrunnen, 453
Schachtwasser, 524
Schadensfälle, 333, 672
Schadenshöhe, 673
Schadensminimierung, 312
Schadensrisiko, 673
Schalenbau der Erde, 3
Schlechtgestelltheit, 264
Schluckbrunnen, 454
Schutzzweck bergrechtlicher Normen, 346
Schweden, 789
Schweiz, 756, 789
Schwereanomalie, 169
Schwerefeld, 107
Schwerekurve, 107
Schwingungsgleichung, 261
SCOP, 402
Seismik, 122, 222, 224, 639
Grundwasserspiegel, 187
Messverfahren, 149
petrophysikalische Parameter, 122
Reflexionsseismik, 158
Refraktionsseismik, 155
Sejong City, 792
Sensor, 468
SG-ready-Standard, 56
SIA-Norm, 761
Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument, 722
Sicherheitsbegehungsprotokoll, 734
Sicherheitstechnik, 517
Sicherheitswissenschaft, 720
Siedegrenze, 427
Signal-Rausch-Verhältnis, 108
Signalrekonstruktion, 229
Signalzerlegung, 229
Single-fracture-Methode (SF-Methode), 16
Skalierungsfunktion, 229
Smart Metering, 56
Social Media, 706
Facebook, 707
Solarthermie, 36
Sondeneinbau, 462, 472, 475, 685
Sondenhaspel, 384
Sonderbetriebsplan, 348
Sozialadäquanz, 345
Spülungspreventer, 391
Spülungstank, 382
Spa, 782
Speicher, 38, 50
Speichersonde, 470
koaxiale, 470
Speicherung, 367
Staatshaftung, 342
Staufen, 99, 338
Staugrenze, 425
Steigen des Wasserspiegels, 347
Stichnadelsonde, 630
Stochastic-continuum-Methode (SC-Methode), 16
Stockwerk, 682
Stollenwasser, 524
Strompreis, 59
Strukturgleichungsmodell, 698
Suszeptibilität, 646
magnetische, 598
Suszeptibilitätslog, 590
Synergie, 56

T
Türkei, 6
Tektonik, 191, 679
Temperatur, 7
Temperaturänderung, 291
Temperaturprofil, 631, 646
Temperaturprofilmessung, 631
Thermal Response Test (TRT), 97, 614, 650
erweiterter, 650
Thermisches Leistungsvermögen, 363
Thermosyphon, 410
Thresholding, 229
Tiefbohrung, 349

Tiefe, 8
Tiefpassfilterung, 232
TOM-Modell, 721
Tomographie, 262
TOP-Modell, 720
Transmissivität, 181
Transparenz, 697
Trinkwarmwasser, 34
Trinkwassererwärmung, 403
Triplex-Pumpe, 380
Trocknen, 783
Tunnel
  geschlossene Bauweise, 489
  offene Bauweise, 488
Tunnelbauwerk, thermische Aktivierung, 487
Tunnelwassernutzung, 789

U
U-Sonde, 459
U-Wert, 29
Übergangswiderstand, thermische, 624
Umweltbewusstsein, 696, 698
Umwelteinflüsse, 536
Unfall, 718, 724
Unschärfeprinzip, 229
Untergrundparameter, thermophysikalische, 632
Untergrundtemperatur, 495, 621
Urban Heat Island Effect (UHI-Effekt), 498
Ursache, 264
Ursache-Wirkungs-Schadens-Modell, 732
Ursachenzusammenhang, 344
USA, 785

V
Verdampfer, 396
Vergabeart, 365
Vergabe der Leistungen, 364
Verkarstung, 194
Verkehrssicherungspflicht, 342
Vernässung, 345
Verockerung, 284, 543, 546
Verordnung, städtebauliche, 33
Verpressgestänge, 468
Verpresslanze, 468
Verpressschlauch, 468
Verpresssystem, 383
Verpressungssuspension, 59
Versinterung, 285
Vertragsgestaltung, 357
Vertrauen, 697
Vollbohrwerkzeuge, 390
Vollwandrohr, 456
Volterra, 6
Vor-Ort-Parameter, 283
Vorlauftemperatur, 625
Vorplanung, 360
Vulkan, 6

W
Wärme, Physik, 90
Wärmeübertragung, 37
  Grundgleichung, 37
Wärmebedarf, 34
Wärmedurchgangskoeffizient, 29
Wärmeenergie
  Einleitung in den Boden, 339
  Entnahme, 339
  Speicherung, 339
Wärmeerzeugung, 35
Wärmehotspot, 6
Wärmeinsel, urbane, 631
Wärmekapazität, effektive, 619
Wärmeleitfähigkeit, 621, 628
  effektive, 632
Wärmemarkt, 327, 328
Wärmepotential der Erde, 4
Wärmepumpe, 396, 782
  Lebensdauer, 54
Wärmepumpen-System-Modul, 767
Wärmerohr, 410, 412, 473
  Anwendungsbereiche, 415
  Aufbau und Funktionsweise, 411
  geschichtliche Entwicklung, 416
  Simulation, 441
  Vor- und Nachteile, 414
Wärmeschutzverordnung (WSchV), 31
Wärmespeicher, 38, 50
Wärmestrom, 4, 619
  axialer, 619
  radialer, 619
Wärmetauscher, 339, 349
Wärmeträgerflüssigkeit, 289
Wärmeträgerfluid, 289
Wärmeträgermedien

Auslegungsgrundlagen, 420
geschlossenes System, 286
Wärmetransport
advektiver, 614
konduktiver, 614
Wärmeversorgung, 24, 26
Wärmeverteilung, 37
Wünschelrute, 214
Warmwasser, Trinkwarmwasser, 34
Wasser, nachdrängendes, 344
Wasser-Wasser-Anlage, 457
Wasserbeprobung, 544
Wasserchemie, 542, 565
Wasserhaltung, 343
Wasserinhaltsstoff, 283
Wasserqualität, 284, 684
Wasserrecht, 340
Wavelet, 228
Waveletrücktransformation, 249
Wegeunfall, 718
Wellenfeld, 261
Wellengleichung, 262
Wellenverfahren, 263
Widersstandsgeoelektrik, 188
Widerstand, 695
Widerstandsgeoelektrik, 130
Widerstandstomographie, 134
Wirkung, 264
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, 361
Wissen, 693, 694, 699, 704
Serious Game, 704
Wohngebäude, 25

Z

Zementierung, Qualitätsprüfung, 642
Zentrierung, 461, 472, 474
Zertifizierung, 737, 764
Ablauf, 663
EHPA-Gütesiegel, 656
Fremdüberwachung, 665
Keymark, 658
W 120, 660
Zirkulation in Extensionsstrukturen, 349
Zylinderquellentheorie, 622

Springer

springer.com

Willkommen zu den Springer Alerts

Jetzt anmelden!

- Unser Neuerscheinungs-Service für Sie:
  aktuell *** kostenlos *** passgenau *** flexibel

Springer veröffentlicht mehr als 5.500 wissenschaftliche Bücher jährlich in gedruckter Form. Mehr als 2.200 englischsprachige Zeitschriften und mehr als 120.000 eBooks und Referenzwerke sind auf unserer Online Plattform SpringerLink verfügbar. Seit seiner Gründung 1842 arbeitet Springer weltweit mit den hervorragendsten und anerkanntesten Wissenschaftlern zusammen, eine Partnerschaft, die auf Offenheit und gegenseitigem Vertrauen beruht.

Die SpringerAlerts sind der beste Weg, um über Neuentwicklungen im eigenen Fachgebiet auf dem Laufenden zu sein. Sie sind der/die Erste, der/die über neu erschienene Bücher informiert ist oder das Inhaltsverzeichnis des neuesten Zeitschriftenheftes erhält. Unser Service ist kostenlos, schnell und vor allem flexibel. Passen Sie die SpringerAlerts genau an Ihre Interessen und Ihren Bedarf an, um nur diejenigen Information zu erhalten, die Sie wirklich benötigen.

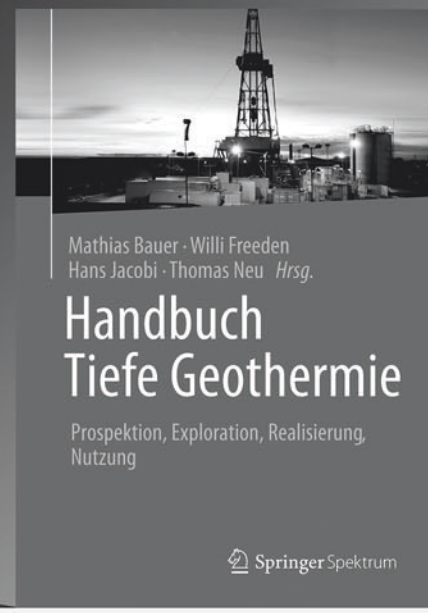
Mehr Infos unter: springer.com/alert

A14445 | Image: Tashatuvango/iStock

Springer

springer.com

M. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi,
Th. Neu (Hrsg.)
Handbuch Tiefe Geothermie
Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung
2014, XXXII, 854 S. 333 Abb.,
264 Abb. in Farbe, Hardcover
*149,99 € (D) | 154,20 € (A) | CHF 187.00
ISBN 978-3-642-54510-8



Erstes deutschsprachiges Handbuch zum Thema

- Umfasst die Themenbereiche Prospektion, Exploration, Realisierung und Nutzung
- Wichtig für alle an der Konzeption und Erschließung tiefengeothermischer Ressourcen Beteiligten

Das vorliegende Handbuch stellt erstmalig in deutscher Sprache umfassend alle Themen im Bereich Tiefe Geothermie vor: Prospektion, Exploration, Realisierung und Nutzung. In zwei abschließenden Kapiteln werden Zukunft und Perspektiven von Tiefer Geothermie vorgestellt und diskutiert. Die von anerkannten Spezialisten verfassten Artikel sind so konzipiert und geschrieben, dass alle an der Konzeption und Erschließung tiefengeothermischer Ressourcen Beteiligten einen direkten Nutzen für ihre Arbeit daraus ziehen können.

* € (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt; € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. CHF und die mit ** gekennzeichneten Preise für elektronische Produkte sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Programm- und Preisänderungen (auch bei Irrtümern) vorbehalten. Es gelten unsere Allgemeinen Liefer- und Zahlungsbedingungen.

Jetzt bestellen: springer.com/shop