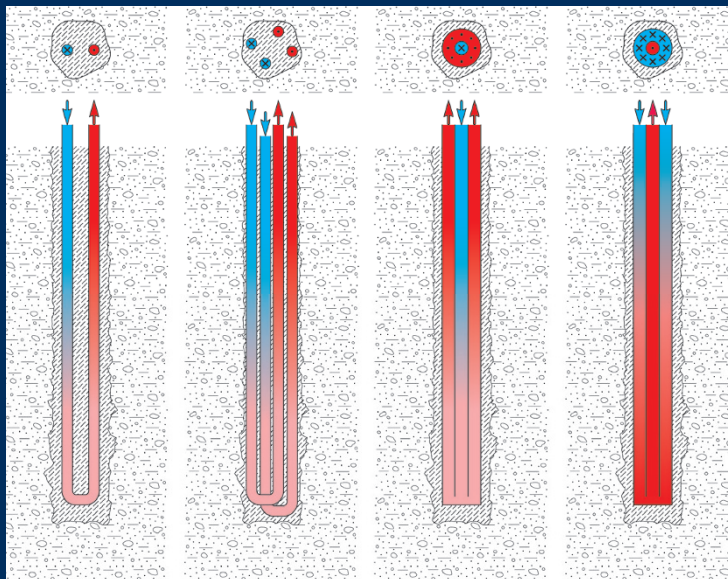


# Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie





# Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie



# Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie

Des Arbeitskreises „Geothermie“ der  
Fachsektion Hydrogeologie (FH-DGG) und Fachsektion  
Ingenieurgeologie (FI-DGGT/DGG)

Herausgegeben von der  
Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften e.V.  
(DGG)  
und der  
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik  
vertr. durch den Vorsitzenden  
Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten  
Gutenbergstr. 43  
45128 Essen

Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften  
vertr. durch den Vorsitzenden  
Prof. Dr. Gernold Zulauf  
Buchholzer Str. 98  
30655 Hannover

Titelbild: Funktionsschemata verschiedener Erdwärmesondentypen, Grafik: Sass & Mielke  
2012

Der Arbeitskreis „Geothermie“ ist ein gemeinsames Gremium der Fachsektion Ingenieurgeologie (FI-DGGT/DGG) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik und der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften und der Fachsektion Hydrogeologie der DGG (FH-DGG). Der Arbeitskreis wird geleitet von Prof. Dr. Ingo Sass, TU Darmstadt, und Dr. Dirk Brehm, BGU Bielefeld. Die Namen der weiteren Autoren finden sich im Vorwort der Empfehlungen des Arbeitskreises Geothermie.

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

© 2015 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: DesignPur  
Herstellung: pp030 Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin  
Satz: BELTZ Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza  
Druck und Bindung: CPI Books GmbH, Ebner & Spiegel, Ulm

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

**Print ISBN:** 978-3-433-02967-1  
**ePDF ISBN:** 978-3-433-60445-8  
**ePub ISBN:** 978-3-433-60489-2  
**eMobi ISBN:** 978-3-433-60488-5  
**oBook ISBN:** 978-3-433-60487-8

## Vorwort

Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie hat in den vergangenen zehn Jahren enorme Zuwächse erfahren. Mit der stetig steigenden Anzahl von Geothermieanlagen ging eine steile technische Entwicklung einher. Schadensfälle im Zusammenhang mit der Herstellung und dem Betrieb der geothermischen Anlagen traten auf und waren vielfach im Fokus medialer Aufmerksamkeit. Insbesondere zeigen diese bekannt gewordenen Schadensfälle, dass das Bohren in Tiefen von bis zu einigen hundert Metern ein technisches Handeln ist, welches ein verantwortungsvolles Vorgehen im Sinne qualitätsgesicherter Planung, Ausführung und Betrieb der Anlagen erfordert. Die Vermeidung von Schäden durch oberflächennahe geothermische Anlagen ist wesentliche Voraussetzung einer nachhaltigen geothermischen Nutzung, insbesondere beim Schutz der Grundwasservorkommen vor nachteiliger Beeinflussung. Die vorliegenden Empfehlungen verstehen sich als ein Beitrag zur qualitätsgesicherten Ausführung derartiger Anlagen. Es ist eines der Ziele des Arbeitskreises Geothermie der Fachsektion Hydrogeologie der DGG und der Fachsektion Ingenieurgeologie der DGG und der DGGT, die weite Verbreitung der Nutzung der Geothermie als umweltfreundliche Energiequelle zu fördern und dabei den Schutz der Wasservorkommen sehr weitgehend zu berücksichtigen. Die Empfehlungen wurden sowohl von den Autoren als auch von den herausgebenden Verbänden DGG und DGGT als Hilfestellung und nicht als technisches Regelwerk im Sinne einer Norm konzipiert. Dementsprechend enthalten die Empfehlungen des Arbeitskreises Geothermie auch einige lehrbuchartige Passagen und einen umfangreichen Teil zum Genehmigungsrecht. Zum Zeitpunkt der Drucklegung war ein Normungsvorhaben für die oberflächennahe Geothermie nicht in Sicht. Es wird aber weiterhin als erforderlich angesehen.

Das Autorenteam und die temporären Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Arbeitskreises sind Hydrogeologen, Ingenieurgeologen und Ingenieure aus Planung, Baugewerbe, Baustoffindustrie, Behörden und Hochschulen haben die vorliegenden Empfehlungen in mehrjähriger Arbeit erstellt. Dabei war den Beteiligten immer bewusst, dass Teile der Inhalte auch eine fachliche Kontroverse auslösen können.

Zur Sicherstellung der fachlichen Qualität des Inhaltes der vorliegenden Empfehlungen des Arbeitskreises Geothermie wurden die Empfehlungen des Arbeitskreises einem Begutachtungsverfahren unterzogen. Prof. Dr. Ingrid Stober, Regierungspräsidium Freiburg, Prof. Dr. Rolf Bracke, Internationales Geothermiezentrum, Bochum, sowie Prof. Dr. Dmitry V. Rudakov, National Mining University, Dnipropetrovsk, haben mit unterschiedlicher Sichtweise diese wichtige und anspruchsvolle Aufgabe übernommen.

Ihre Anmerkungen und Kommentare wurden sorgfältig in der vorliegenden Version der EA Geothermie berücksichtigt.

Neben dem Begutachtungsverfahren wurde die EA Geothermie drei Monate öffentlich über den Verlag im Internet zugänglich gemacht. Die interessierte Öffentlichkeit war aufgefordert, Anmerkungen, Kommentare und Änderungsvorschläge innerhalb eines Zeitraumes von drei Monaten abzugeben. Das Autorenteam hat jeden einzelnen Beitrag aus dieser Richtung zur Kenntnis genommen, bewertet und an vielen Stellen Änderungen an Text und Grafik vorgenommen. Wir sind Ihnen, die diese Beiträge geleistet haben, sehr dankbar für diese wertvolle Mitarbeit an der EA Geothermie.

Die Autoren der Empfehlungen sind:

Sprecher des Arbeitskreises

- Prof. Dr. rer. nat. Ingo Sass  
Fachgebiet Angewandte Geothermie  
Technische Universität Darmstadt  
Schnittspahnstraße 9  
64287 Darmstadt

Stellvertretender Sprecher

- Dr. rer. nat. Dirk Brehm  
BGU, Bielefeld

Ständige Mitglieder des AK

- Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Georg Coldewey  
Institut für Geologie und Paläontologie  
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- Dr. rer. nat. Jörg Dietrich  
HeidelbergCement, Enningerloh
- Dr. rer. nat. Rainer Klein  
boden & grundwasser, Amtzell
- Dipl.-Min. Torsten Kellner  
Berlin
- Dipl.-Ing. Dipl.-Geol. Bernd Kirschbaum  
Umweltbundesamt, Dessau



- Dipl.-Geol. Clemens Lehr  
Geotechnisches Umweltbüro Lehr, Bad Nauheim
- Dipl.-Geol. Adam Marek  
Umweltamt Stadt Bielefeld
- Dipl.-Ing. Philipp Mielke  
Fachgebiet Angewandte Geothermie  
Technische Universität Darmstadt
- Prof. Dr. rer. nat. Lutz Müller  
Fachbereich Umweltingenieurwesen  
Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Höxter
- Dr. rer. nat. Björn Panteleit  
Geologischer Dienst für Bremen
- Dipl.-Geol. Stefan Pohl  
geo consult POHL, Bendorf
- Dipl.-Geol. Joachim Porada  
Porada GeoConsult GmbH & Co.KG, Harsefeld
- Dipl.-Ing. Stefan Schiessl  
TERRASOND GmbH & Co. KG, Günzburg
- Dr. rer. nat. Marec Wedewardt  
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin
- Dominik Wesche, M. Sc. Geowissenschaften  
Institut für Geologie und Paläontologie  
Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Prof. Dr. Ingo Sass

Darmstadt, Dezember 2013

## **Dank**

Im Namen der herausgebenden Fachgesellschaften und der Mitglieder des Arbeitskreises Geothermie der DGG und DGGT ist es uns ein Anliegen, den zahlreichen engagierten Personen zu danken, die die Entstehung dieses

Buches unterstützt, gefördert und mit gestaltet haben. Als temporäre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Arbeitskreises bedanken wir uns bei

Dipl.-Geol. Gisela Augustin, Hamburg

Dipl.-Ing. Arne Buss, Berlin

Dr. Verena Herrmann, GMP-Geotechnik GmbH, Würzburg

Dr. Claus Heske, CDM Smith Consult GmbH, Bochum

Dr. habil. Holger Knoke, IBES GmbH, Neustadt/W.

Prof. Dr. Martin Sauter, Universität Göttingen

Dipl.-Geol. Ingo Schäfer, Geologisches Landesamt, Krefeld

Prof. Dr. Dietmar Schenk, Universität Mainz († 2008)

Dipl.-Geol. Christian Spang, Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, Witten

Dipl.-Geol. Andreas ter Glane, HPC AG, Göttingen

Ohne die permanente Organisation und Unterstützung durch Frau Simone Ross-Krichbaum und Frau Dunja Sehn, beide Technische Universität Darmstadt, wäre die enge Folge an Arbeitssitzungen und Abstimmungen gar nicht möglich gewesen. Dipl.-Ing. Sebastian Homuth, M. Sc., Technische Universität Darmstadt, übernahm die Rolle eines Fachlektors, wofür auch ihm besonders zu danken ist. Carolin Tissen und Andreas Hofheinz, Hilfskräfte an der TU Darmstadt, waren insbesondere bei der Zusammenführung von Texten, Layoutfragen, Einbindung von Abbildungen und Setzen der Gleichungen für die EA Geothermie zuverlässige Mitarbeiter.

Weiterhin danken wir den Vorständen und Geschäftsführungen der beteiligten Fachgesellschaften und Fachsektionen für die aktive Unterstützung der Arbeit des Arbeitskreises Geothermie.

Im Namen aller Arbeitskreismitglieder und den die EA Geothermie herausgebenden Verbände DGG und DGGT danken wir Frau Prof. Dr. Stober, Freiburg, und Herrn Prof. Dr. Bracke, Bochum, für die Übernahme der verantwortungsvollen und sehr arbeitsintensiven Aufgabe der Begutachtung.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	XIII
Tabellenverzeichnis .....	XXII
Vorbemerkung .....	XXV
Formelzeichen und Indizes .....	XXVII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen der Geologie, Hydrogeologie und Geotechnik ..	5
2.2 Grundlagen der Geothermie .....	12
2.3 Solarspeicherzone .....	27
2.4 Geosolarer Übergangsbereich .....	31
2.5 Terrestrische Zone .....	34
2.6 Anthropogene thermische Beeinflussung .....	34
2.7 Wechselwirkungen geothermischer Anlagen mit dem Untergrund .....	35
2.7.1 Hydrochemische Wechselwirkungen .....	36
2.7.2 Wechselwirkungen zwischen geothermischen Systemen und Grundwasserorganismen .....	37
<b>3 Geothermische Anlagen .....</b>	<b>39</b>
3.1 Geschlossene Systeme .....	40
3.1.1 Erdwärmesonden (Geothermiesonden) .....	40
3.1.2 Verdampfersonden .....	48
3.1.3 Erdwärmekollektoren .....	49
3.1.4 Energiepfähle und erdberührende Betonbauteile .....	53
3.2 Offene Systeme (direkte Grundwassernutzung) .....	58
3.2.1 Brunnenanlagen .....	60
3.2.2 Geothermie Nutzung im Bergbau und Hohlraumbau .....	64
3.3 Geothermische Speicher .....	68
3.3.1 Aquiferspeicher (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) ..	68
3.3.2 Erdwärmesondenspeicher (Borehole Thermal Energy Storage, BTES) .....	70
3.3.3 Kavernenspeicher (Cavernous Thermal Energy Storage, CTES)	71

<b>4</b>	<b>Rechtliche Grundlagen</b> .....	73
4.1	Wasserrecht .....	76
4.1.1	Europäische Regelungen .....	76
4.1.2	Deutsches Recht .....	77
4.2	Bergrecht .....	78
4.3	Lagerstättenrecht .....	80
4.4	Naturschutz und Landschaftspflege .....	81
4.4.1	Eingriffsregelung nach dem Bundesnaturschutzgesetz .....	81
4.4.2	Schutzausweisungen in Landschaftsplänen .....	82
4.4.3	Europäisches ökologisches Netz „Natura 2000“ .....	82
4.5	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung .....	84
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Planung</b> .....	85
5.1	Projekttablauf .....	86
5.2	Erkundungsbedarf für Erdwärmesondenanlagen .....	90
5.3	Modelle zur Simulation des Wärmetransportes .....	92
<b>6</b>	<b>Bohrungen und Ausbau</b> .....	97
6.1	Bohrverfahren .....	97
6.2	Hinweise zum Ausbau von Bohrungen .....	100
6.3	Bohrlochabweichung .....	103
6.4	Geologische und hydrogeologische Einflüsse .....	111
6.5	Response Test Verfahren .....	116
6.5.1	Grundlagen und Messprinzip eines Geothermal Response Tests .....	118
6.5.2	Auswertung .....	119
6.5.3	Thermischer Bohrlochwiderstand .....	122
6.5.4	Qualitätssicherung mit Hilfe des GRT .....	123
6.5.5	Auswertung instationärer GRT-Daten .....	125
6.5.6	Zylinderquellen-Verfahren .....	127
6.5.7	Enhanced Geothermal Response Test .....	144
<b>7</b>	<b>Planung, Herstellung und Betrieb geschlossener Systeme</b> . . . .	151
7.1	Erdwärmesondenanlagen .....	151
7.1.1	Planung und Dimensionierung .....	151
7.1.2	Verfüllung des Ringraums .....	163
7.1.3	Anforderungen an den Verfüllbaustoff .....	166
7.1.4	Nicht vollständig abgedichtete Erdwärmesonden .....	184
7.1.5	Druck- und Durchflussprüfung an Erdwärmesonden .....	190
7.1.6	Wärmeträgermedien .....	197

7.1.7	Horizontale Anschlussleitungen und Schnittstelle zur Haustechnik .....	200
7.1.8	Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung .....	202
7.1.9	Dokumentation .....	205
7.1.10	Rückbau und Stilllegung .....	207
7.2	Erdwärmekollektoren (EWK) .....	207
7.2.1	Planung und Bemessung von Kollektoranlagen .....	208
7.2.2	Bauausführung von Flächenkollektoren .....	211
7.2.3	Bauausführung von Erdwärmekörpern .....	212
7.2.4	Verlegung der Leitungen .....	212
7.2.5	Füllen und Entlüften .....	213
7.2.6	Wärmeträgermedien .....	213
7.2.7	Druckprüfung .....	213
7.2.8	Inbetriebnahme .....	213
7.2.9	Dokumentation .....	214
7.2.10	Betrieb der Erdwärmekollektoren .....	215
7.2.11	Auswirkungen des Betriebes der Erdwärmekollektoren .....	215
7.2.12	Rückbau / Stilllegung .....	217
<b>8</b>	<b>Planung, Herstellung und Betrieb offener Systeme .....</b>	<b>219</b>
8.1	Brunnenanlagen .....	219
8.1.1	Planung und Dimensionierung .....	226
8.1.2	Bauausführung, Qualitätssicherung, Dokumentation .....	228
8.1.3	Pumpversuch und Brunnentest .....	228
8.1.4	Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung .....	228
8.1.5	Hydrochemische und mikrobiologische Einflüsse .....	232
8.1.6	Dokumentation .....	237
8.1.7	Stilllegung und Rückbau .....	237
8.1.8	Praxisbeispiel Brunnenanlage .....	238
8.2	Aquiferspeicher .....	242
<b>9</b>	<b>Risikopotenziale .....</b>	<b>245</b>
9.1	Die 5-M-Methode .....	245
9.1.1	Mensch .....	246
9.1.2	Methode .....	246
9.1.3	Material .....	247
9.1.4	Maschinen .....	248
9.1.5	Medium .....	248
9.1.6	Fazit .....	249
9.2	Geologische Risiken .....	250
9.2.1	Quellfähige und setzungsempfindliche Gesteine .....	250

9.2.2	Lösliche Gesteine . . . . .	251
9.2.3	Überkonsolidierte und porenwasserdruckanfällige Gesteine . . . . .	251
9.2.4	Tektonik . . . . .	252
9.2.5	Massenbewegungen . . . . .	252
9.2.6	Erdfall-, Senkungs- und Bergsenkungsgebiete. . . . .	252
9.2.7	Gasaustritte. . . . .	253
9.3	Hydrogeologische Risiken . . . . .	254
9.3.1	Gespanntes und artesisch gespanntes Grundwasser . . . . .	254
9.3.2	Stockwerke . . . . .	254
9.3.3	Hydrochemische Gradienten . . . . .	256
9.3.4	Entgasung . . . . .	256
9.3.5	Wasserqualität. . . . .	256
9.4	Umwelttechnische Risiken . . . . .	257
9.4.1	Altlasten und Altablagerungen. . . . .	257
9.4.2	Bergbau, Bergbaufolgeschäden . . . . .	257
9.5	Risiken beim Sondeneinbau. . . . .	258
9.6	Betriebsrisiken. . . . .	260
	<b>Literatur</b> . . . . .	263
	<b>Gesetze, Normen, Regelwerke</b> . . . . .	269
	<b>Leitfäden von Ländern und Kommunen</b> . . . . .	275
	<b>Glossar A bis Z</b> . . . . .	277

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1.0.1</b> Prognose der Geothermischen Energieerzeugung in Deutschland bis in das Jahr 2020, Stand Oktober 2009 . . . . .	2
<b>Abbildung 2.2.1</b> Prinzip der konduktiven Wärmeleitung in einem Gesteinskörper ( $l$ = Länge der Probe; $T$ = absolute Temperatur) . . . . .	14
<b>Abbildung 2.2.2</b> Effektive Wärmeleitfähigkeit von Quarz und Wasser in Abhängigkeit von der Gesamtporosität . . . . .	18
<b>Abbildung 2.2.3</b> Effektive Wärmeleitfähigkeit von Quarz und Luft in Abhängigkeit von der Gesamtporosität . . . . .	19
<b>Abbildung 2.2.4</b> Effektive Wärmeleitfähigkeit von Quarz und Eis in Abhängigkeit von der Gesamtporosität . . . . .	20
<b>Abbildung 2.2.5</b> Modellbildung zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit . . . . .	20
<b>Abbildung 2.2.6</b> Erscheinungsformen des unterirdischen Wassers . . . . .	23
<b>Abbildung 2.2.7</b> Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Wasser von der Temperatur. . . . .	24
<b>Abbildung 2.2.8</b> Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität $c$ von Wasser von der Temperatur bei Normaldruck . . . . .	25
<b>Abbildung 2.2.9</b> Abhängigkeit der kinematischen Viskosität von Wasser von der Temperatur . . . . .	26
<b>Abbildung 2.2.10</b> Abhängigkeit der spezifischen Dichte von Wasser von der Temperatur . . . . .	27
<b>Abbildung 2.3.1</b> Ausbildung der Solarspeicherzone, Geosolarer Übergangsbereich und Terrestrischer Zone durch den solaren und terrestrischen Wärmestrom . . . . .	28
<b>Abbildung 2.3.2</b> Jahrestemperaturverläufe in der Solarspeicherzone mit geosolarem Übergangsbereich am Beispiel Berlins; Stadtrandlage, Versiegelungsgrad 20 bis 30 % . . . . .	29
<b>Abbildung 2.3.3</b> Jahrestemperaturverläufe in der Solarspeicherzone mit geosolarem Übergangsbereich am Beispiel Berlins; Innenstadtbereich, Versiegelungsgrad > 60 % . . . . .	30
<b>Abbildung 2.4.1</b> Klimazonen nach DIN 4710 . . . . .	32
<b>Abbildung 2.4.2</b> Wärmeentzugsleistungen je Klimazone . . . . .	33

<b>Abbildung 3.0.1</b> Funktionsschema einer Wärmepumpe .....	39
<b>Abbildung 3.1.1</b> Funktionsschemata einer a) U-Rohr-Erdwärmesonde, einer b) Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonde, einer c) Koaxial-Erdwärmesonde mit innengeführtem Rücklauf und einer d) Koaxial-Erdwärmesonde mit außengeführtem Rücklauf .....	41
<b>Abbildung 3.1.2</b> Schema einer typischen Standard-U-Rohr-Erdwärmesonde mit erdverlegter Horizontalanbindung, wie sie auch unter Bebauung häufig realisiert wird .....	42
<b>Abbildung 3.1.3</b> Schema einer U-Rohr-Erdwärmesonde mit Horizontalanbindung über ein Schachtbauwerk .....	43
<b>Abbildung 3.1.4</b> Schema einer koaxialen Erdwärmesonde mit erdverlegter Horizontalanbindung .....	44
<b>Abbildung 3.1.5</b> Schema einer koaxialen Erdwärmesonde, mit Horizontalanbindung über ein Schachtbauwerk .....	45
<b>Abbildung 3.1.6</b> Prinzipskizze einer EWS-Anlage für ein Einfamilienhaus .....	46
<b>Abbildung 3.1.7</b> Prinzipskizze einer Erdwärmekollektoranlage für ein Einfamilienhaus .....	47
<b>Abbildung 3.1.8</b> Prinzipskizze einer Brunnenanlage für ein Einfamilienhaus .....	47
<b>Abbildung 3.1.9</b> Prinzipskizze einer Verdampfersonde .....	48
<b>Abbildung 3.1.10</b> Bau eines Flächenkollektors .....	50
<b>Abbildung 3.1.11</b> Bau eines Grabenkollektors .....	51
<b>Abbildung 3.1.12</b> Konstruktionsprinzip eines Erdwärmekorbs .....	52
<b>Abbildung 3.1.13</b> Einbau eines Erdwärmekorbes .....	52
<b>Abbildung 3.1.14</b> Energiepfahlgründung unter einem Hochhaus .....	54
<b>Abbildung 3.1.15</b> Baustellenfoto und Schemazeichnung einer Energiepfahlanlage integriert in Verbauwand mit überschnittenen, rückverankerten Bohrpfählen .....	55
<b>Abbildung 3.1.16</b> Systembild einer Energiepfahlanlage .....	55
<b>Abbildung 3.1.17</b> Pfahlbewehrung mit Wärmeaustauschrohren und Rohrleitungsausfädelung .....	56
<b>Abbildung 3.1.18</b> Energiepfahlausfädelungen in einer Hochhausbodenplatte .....	56



<b>Abbildung 3.1.19</b> Horizontale Anbindung von Energiepfählen an den Verteiler . . . . .	57
<b>Abbildung 3.2.1</b> Schemaskizze eines Entnahmebrunnens mit Unterwasserpumpe als Kiesschüttungs-Bohrbrunnen . . . . .	61
<b>Abbildung 3.2.2</b> Prinzip geothermischer Brunnenanlagen im ungespannten Grundwasser dargestellt für die Wärmegegewinnung . . . . .	62
<b>Abbildung 3.2.3</b> Prinzip geothermischer Entnahme- und Infiltrationsbrunnenanlagen im gespannten Grundwasser . . . . .	63
<b>Abbildung 3.2.4</b> Dampfender Neuhoffungsstollen in Bad Ems. . . . .	64
<b>Abbildung 3.2.5</b> Wasserführender „Alter Mann“ . . . . .	65
<b>Abbildung 3.2.6</b> Eisenausfällungen an einer Grubenwassereinleitung in die Vorflut . . . . .	66
<b>Abbildung 3.2.7</b> Schemaskizze zur Erdwärmenutzung in „abgesoffenen“ Bergwerken bei freiem Grubenwasserauslauf . . . . .	66
<b>Abbildung 3.2.8</b> Schemaskizze zur Erdwärmenutzung in abgesoffenen“ Bergwerken bei tiefer Grundwasserdruckfläche . . . . .	67
<b>Abbildung 3.3.1</b> Numerische Simulation eines Erdsonden-Wärmespeichers . . . . .	69
<b>Abbildung 3.3.2</b> Noch ungeordneter Bauzustand des Erdwärmesondenspeichers Crailsheim vor dem Aufbringen der Rekultivierungsschicht . . . . .	70
<b>Abbildung 4.2.1</b> Schematische Aufsicht auf den Einflussbereich einer EWS in Bezug auf eine Grundstücksgrenze . . . . .	79
<b>Abbildung 6.1.1</b> Bohranlage beim Ansatz des pneumatischen Imlochhammer-Verfahrens . . . . .	99
<b>Abbildung 6.2.1</b> Haspelwagen mit Eigenantrieb und 400 m Doppel-U-Rohrsonde . . . . .	102
<b>Abbildung 6.3.1</b> Geometrische Bohrlochabweichung bei einer um 1°, 2° und 3° geneigten Bohranlage. . . . .	103
<b>Abbildung 6.3.2</b> Vertikalitätsüberprüfung einer Erdwärmesondenbohrung, die mit dem Imlochhammer-Verfahren hergestellt wurde . . .	104
<b>Abbildung 6.3.3</b> Schematische Darstellung einer Bohrung ohne Stabilisatoreinsatz . . . . .	106

<b>Abbildung 6.3.4</b> Durch richtige Dimensionierung von Bohrstrang, Bohrkopf und Vortriebsart kontrollierte Vertikalbohrung bei kleinem Bohrgestängebiegerradius . . . . .	107
<b>Abbildung 6.3.5</b> Schematische Darstellung eines Stabilisatorgestänges .	108
<b>Abbildung 6.3.6</b> Möglichkeiten der Bohrlochabweichungen durch Formationswechsel . . . . .	109
<b>Abbildung 6.3.7</b> Kaliberaufweitung und initiale Aufrichtung einer Bohrung an einem flach liegenden Kompetenzwechsel im Gebirge . . .	110
<b>Abbildung 6.3.8</b> Links: Entstehung eines Bohrlochversatzes (dogleg) durch Kompetenzwechsel im Gebirge; rechts: Ablenken einer Bohrung durch Aufrichten des Meißels beim mehrfachen inkompetent/kompetent-Übergang . . . . .	111
<b>Abbildung 6.5.1</b> Schemaskizze eines Geothermal Response Tests. . . . .	117
<b>Abbildung 6.5.2</b> Kompakte, mobile GRT-Einheit . . . . .	118
<b>Abbildung 6.5.3</b> Zeitlicher Verlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der mittleren Temperatur im Wärmeträgermedium während eines GRT . . . . .	121
<b>Abbildung 6.5.4</b> Beispiel für die Regression zur Auswertung eines GRT Ergebnisses . . . . .	122
<b>Abbildung 6.5.5</b> Schematischer Schnitt durch einen Doppel-U-Erdwärmehaustauscher mit assoziierten thermischen Teilwiderständen . . . . .	124
<b>Abbildung 6.5.6</b> Darstellung einer typischen GRT-Messkurve und ihrer Ableitung erster Ordnung . . . . .	126
<b>Abbildung 6.5.7</b> Beispiel für unterschiedliche Leitfähigkeiten der den Erdwärmehaustauscher umgebenden Gesteine . . . . .	128
<b>Abbildung 6.5.8</b> Vergleichende Darstellung des Temperaturverlaufs unter Zugrundelegung von Linien- und Zylinderquellentheorie . . . . .	131
<b>Abbildung 6.5.9</b> Daten von Messungen an einer Doppel-U-Erdwärmehaustauscher und an einem zylindrischen Erdwärmehaustauscher . . . . .	133
<b>Abbildung 6.5.10</b> Auswertung einer Messung an einer Doppel-U-Sonde . . . . .	134
<b>Abbildung 6.5.11</b> Auswertung einer Messung an einer Doppel-U-Sonde . . . . .	135
<b>Abbildung 6.5.12</b> Auswertung einer Messung an einem zylindrischen Erdwärmehaustauscher . . . . .	136

<b>Abbildung 6.5.13</b> Auswertung mittels zeitgebundener Superposition bei schwankender Stromspannung während der GRT-Durchführung .	137
<b>Abbildung 6.5.14</b> Sensitivitätsanalyse für den Kennwert Wärmeleitfähigkeit in einem GRT . . . . .	138
<b>Abbildung 6.5.15</b> Sensitivitätsanalyse für den Kennwert Volumetrische Wärmekapazität in einem GRT . . . . .	139
<b>Abbildung 6.5.16</b> Sensitivitätsanalyse für den Kennwert Heizleistung in einem GRT . . . . .	140
<b>Abbildung 6.5.17</b> Sensitivitätsanalyse für den Kennwert Thermische Leitfähigkeit in einem GRT. . . . .	141
<b>Abbildung 6.5.18</b> Widerstände an einem Erdwärmeaustauscher . . . . .	142
<b>Abbildung 6.5.19</b> Einbau einer koaxialen Erdwärmesonde mit Glasfaser-Kupfer-Kabelbündel als Rollenware . . . . .	144
<b>Abbildung 6.5.20</b> Messergebnisse EGRT an einer 150 m tiefen Erdwärmesonde . . . . .	145
<b>Abbildung 6.5.21</b> Ausgewertete Messergebnisse des EGRT mit Bohrprofil . . . . .	146
<b>Abbildung 6.5.22</b> Messergebnisse eines EGRT bei Hamburg . . . . .	147
<b>Abbildung 6.5.23</b> Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofile zweier EGRT mit lokal begrenztem Grundwassereinfluss . . . . .	148
<b>Abbildung 7.1.1</b> Druckverluste in Abhängigkeit des Massen- bzw. Volumenstroms für die Doppel-U-Rohr-EWS $32 \times 2,9$ mm und $40 \times 3,7$ mm für Wasser mit $4^\circ\text{C}$ als Wärmeträgermedium und einer Sondenlänge von 120 m . . . . .	154
<b>Abbildung 7.1.2</b> Druckverluste in Abhängigkeit der EWS-Länge für typische Doppel-U-Rohrsonden mit Wasser ( $4^\circ\text{C}$ ) als Wärmeträgermedium und einem Volumenstrom von $2\text{ m}^3/\text{h}$ (turbulente Strömung) sowie die zugehörigen Leistungsaufnahmen der Umwälzpumpe (angenommener Wirkungsgrad: 25 %) . . . . .	155
<b>Abbildung 7.1.3</b> Orientierende Werte für Einbettungen des Sondenbündels bei beispielhaften Verpressrohrdurchmessern (grau) bei üblichen Bohrdurchmessern . . . . .	156
<b>Abbildung 7.1.4</b> Beispiele für Ausführungen des Sondenfußes . . . . .	158
<b>Abbildung 7.1.5</b> Gewichte wassergefüllter Erdwärmesondenrohre in Abhängigkeit von der Sondenlänge und dem PE-Rohrmaterial . . . . .	159

<b>Abbildung 7.1.6</b> Auf das Sondenrohr wirkende Auftriebskraft in Abhängigkeit von der Suspensionsdichte und der Bohrlochtiefe . . . . .	160
<b>Abbildung 7.1.7</b> Restauftrieb in Abhängigkeit von der Länge der wassergefüllten Sondenrohre für verschiedene Suspensionsdichten . . .	161
<b>Abbildung 7.1.8</b> Notwendiges Zusatzgewicht in Abhängigkeit von der Länge einer wassergefüllten PE-100 Doppel-U-Rohr (32 × 2,9 mm) Sonde für verschiedene Suspensionsdichten . . . . .	162
<b>Abbildung 7.1.9</b> Scherfestigkeitsentwicklung eines Standardverfüllbaustoffes bei 10 °C Bodentemperatur . . . . .	165
<b>Abbildung 7.1.10</b> Einsatz der Laborflügelsonde in einem noch nicht stichfesten Hinterfüllbaustoff . . . . .	166
<b>Abbildung 7.1.11</b> Entwicklung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit eines Standardverfüllbaustoffes bei 10 °C Bodentemperatur . . . . .	167
<b>Abbildung 7.1.12</b> Spülungswaage . . . . .	169
<b>Abbildung 7.1.13</b> Marshtrichter . . . . .	170
<b>Abbildung 7.1.14</b> Feldaräometer zur Bestimmung der Spüldichte . . . . .	170
<b>Abbildung 7.1.15</b> Fehlstellen durch Bereiche unterschiedlicher Dichte . . . . .	172
<b>Abbildung 7.1.16</b> Hohlraumbildung an der Sonde . . . . .	172
<b>Abbildung 7.1.17</b> Hohlraumbildung an der Bohrlochwand . . . . .	173
<b>Abbildung 7.1.18</b> Thermischer Bohrlochwiderstand in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes . . . . .	173
<b>Abbildung 7.1.19</b> Schematische Darstellung von Rissbildungen durch Frost-Tau-Wechsel . . . . .	175
<b>Abbildung 7.1.20</b> Massenverlust von Hinterfüllbaustoffen nach 10 Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchungen . . . . .	176
<b>Abbildung 7.1.21</b> Hinterfüllbaustoffe mit unzureichendem Frost-Tau-Widerstand nach 2 bis 5 Frost-Tauwechsel-Belastungen . . .	177
<b>Abbildung 7.1.22</b> Hinterfüllbaustoffe mit hohem Frost-Tau-Widerstand nach 10 und mehr Befrostungs- und Auftauzyklen . . . . .	177
<b>Abbildung 7.1.23</b> Temperaturverlauf für einen Frost-Tau-Wechsel; Diagramm: nach DIN EN 12371 . . . . .	178
<b>Abbildung 7.1.24</b> Wasserdurchlässigkeitszelle für Frost-Tau-Versuche . .	180

<b>Abbildung 7.1.25</b> Schematische Darstellung des Frost-Tau-Wechsel-Versuchstandes . . . . .	181
<b>Abbildung 7.1.26</b> Risse in einem Prüfkörper mit geringem Frost-Tau-Widerstand nach einem Frost-Tau-Zyklus . . . . .	182
<b>Abbildung 7.1.27</b> Prüfkörper eines Baustoffes mit hohem Frost-Tau-Widerstand nach sechs Frost-Tau-Zyklen . . . . .	182
<b>Abbildung 7.1.28</b> Fallbeispiel Erdwärmesondenausbau in einem gespannten Grundwasser . . . . .	184
<b>Abbildung 7.1.29</b> Fallbeispiel Erdwärmesondenausbau über Grundwasserstockwerke hinweg . . . . .	185
<b>Abbildung 7.1.30</b> Fallbeispiel Erdwärmesondenausbau in einem Festgesteinsgrundwasserleiter . . . . .	186
<b>Abbildung 7.1.31</b> Fallbeispiel Erdwärmesondenausbau in einem Karstgrundwasserleiter . . . . .	187
<b>Abbildung 7.1.32</b> Fallbeispiel Erdwärmesondenausbau in einem schwebenden Grundwasserkörper im Hangenden eines Grundwasserleiters . . . . .	188
<b>Abbildung 7.1.33</b> Fallbeispiel: Erdwärmesondenausbau in einer Kontamination . . . . .	189
<b>Abbildung 7.1.34</b> Erfolgreicher Durchflusstest einer über 350 m tiefen Erdwärmesonde . . . . .	191
<b>Abbildung 7.1.35</b> Nachweis von Luft einschüssen in einer 400 m tiefen Erdwärmesonde durch einen Durchflusstest. . . . .	192
<b>Abbildung 7.1.36</b> Vergleichsdiagramm von berechneten und gemessenen Druckverlustwerten eines Erdwärmesondenfeldes . . . . .	193
<b>Abbildung 7.1.37</b> Durchflussdiagramm für eine Erdwärmesonde mit $d = 25$ mm pro Kreis mit verschiedenen Längen bei Wasser ( $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	194
<b>Abbildung 7.1.38</b> Durchflussdiagramm für eine Erdwärmesonde mit $d = 32$ mm pro Kreis mit verschiedenen Längen bei Wasser ( $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	195
<b>Abbildung 7.1.39</b> Durchflussdiagramm für eine Erdwärmesonde mit $d = 40$ mm pro Kreis mit verschiedenen Längen bei Wasser ( $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	196
<b>Abbildung 7.1.40</b> Druckprüfung; Diagramm nach SIA 384/6 . . . . .	198

<b>Abbildung 7.1.41</b> Verteiler für sechs Erdwärmesonden mit Mikroblasenabscheider .....	200
<b>Abbildung 7.1.42</b> Getrennte Verlegung der Rohre und Einsanden als Schutzmaßnahme für die Rohre .....	202
<b>Abbildung 7.1.43</b> Prüfung der Dichte des Wärmeträgermediums mit einem Aräometer und Refrakometer .....	204
<b>Abbildung 7.2.1</b> Einfluss des Rohrabstandes auf die Energieeffizienz ..	209
<b>Abbildung 7.2.2</b> Kollektorbezogene Annuität bei optimierter Spreizung und optimierter Rohrstranglänge bzw. 100 m Rohrstranglänge ..	210
<b>Abbildung 8.1.1</b> Erbohrung eines artesischen Grundwasservorkommens .....	220
<b>Abbildung 8.1.2</b> Definition der Grenzstromlinie, neu gezeichnet nach LFU .....	221
<b>Abbildung 8.1.3</b> Bestimmung des Mindestabstands zweier Brunnen, neu gezeichnet nach LFU .....	222
<b>Abbildung 8.1.4</b> Grafische Bestimmung des kritischen Abstands zweier Förder- und Verpressbrunnen mit unterschiedlichem Anströmwinkel, neu gezeichnet nach LFU .....	222
<b>Abbildung 8.1.5</b> Thermische Nettoleistung in Abhängigkeit von Zirkulationsmenge und Temperaturspreizung .....	224
<b>Abbildung 8.1.6</b> Simulierter hydrothermischer Kurzschluss zwischen zwei konkurrierenden geothermischen Brunnenanlagen .....	225
<b>Abbildung 8.1.7</b> Verockerung .....	229
<b>Abbildung 8.1.8</b> Inkrustation .....	230
<b>Abbildung 8.1.9</b> Versinterung .....	230
<b>Abbildung 8.1.10</b> 3D-FEM des Fallbeispiels: Grundwasserströmungssituation bei Heizbetrieb .....	239
<b>Abbildung 8.1.11</b> 3D-FEM des Fallbeispiels: Grundwasserströmungssituation bei Kühlbetrieb .....	240
<b>Abbildung 8.1.12</b> Hydroisohypsen- und Isothermenkarte nach der 8. Heizperiode im Fallbeispiel .....	241
<b>Abbildung 8.1.13</b> Hydroisohypsen- und Isothermenkarte nach der 9. Kühlperiode im Fallbeispiel .....	241

<b>Abbildung 9.1.1</b> 5-M-Risiken und die Grundlagen der Verantwortlichkeit in Anlehnung an die von Englert & Schalk (2003) entwickelte 5-M Methode . . . . .	245
<b>Abbildung 9.1.2</b> Methoden (gekürzt) zur Beeinflussung des Bohrvorganges . . . . .	247
<b>Abbildung 9.3.1</b> Durch Erdwärmesonden verursachte Stockwerksverbindung und die daraus entstehenden Gefahrenpotenziale . . . . .	255
<b>Abbildung 9.5.1</b> Verteilung von Erdwärmesonden im Bohrloch mit größerem Durchmesser . . . . .	258
<b>Abbildung 9.5.2</b> Einbauerschwernis bei Verwendung ungeeigneter Abstandhalter . . . . .	259
<b>Abbildung 9.5.3</b> Einbaurisiken bei gebrächem Gebirge . . . . .	259

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1</b> Wärmekapazität $C_{th}$ ( $W_s \cdot K^{-1}$ ) von ungefrorenen Böden. . .	8
<b>Tabelle 2.2</b> Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) von ungefrorenen Böden. . . . .	9
<b>Tabelle 2.3</b> Wärmekapazität $C_{th}$ ( $W_s \cdot K^{-1}$ ) von gefrorenen Böden. . . .	10
<b>Tabelle 2.4</b> Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) von gefrorenen Böden. . . . .	11
<b>Tabelle 2.5</b> Typische Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Gesteine . . .	15
<b>Tabelle 2.6</b> Die 15 Klimazonen in Deutschland . . . . .	31
<b>Tabelle 4.1</b> Zuständige Behörden für den Vollzug der Gesetze, die für die Zulassung und den Betrieb von oberflächennahen Geothermischen Anlagen von Bedeutung sind . . . . .	74
<b>Tabelle 5.1</b> Planungsprogramme und numerische Simulationsmodelle zur Auslegung von geothermischen Anlagen . . . . .	95
<b>Tabelle 6.1</b> Übersicht über Bohrverfahren. . . . .	98
<b>Tabelle 6.2</b> Einbauhilfen für Erdwärmesonden-Schlauchware . . . . .	102
<b>Tabelle 6.3</b> Vereinfachte geologische Verhältnisse und die zugehörigen Bemessungskennwerte für den berechneten Beispielfall . . . .	112
<b>Tabelle 6.4</b> Variation der Sondentiefe bei der Anordnung der EWS im Quadrat . . . . .	112
<b>Tabelle 6.5</b> Geologische Risikomerkmale und vorbereitende Maßnahmen mit technischen Gegenmaßnahmen in der Ausführungsphase . . . . .	114
<b>Tabelle 7.1</b> Verfüllbaustoffe für Erdwärmesonden – Baustoffkennwerte und Anforderungsprofil. . . . .	168
<b>Tabelle 7.2</b> Grenzwerte für die Expositionsklassen von betonaggressiven Wässern gemäß der DIN EN 206-1 . . . . .	183
<b>Tabelle 7.3</b> Beispiele für Rohrleitungen und zugehörige Volumen . . . .	192
<b>Tabelle 7.4</b> Zulässige abgelassene Wassermenge pro Meter Erdwärmesonde nach SN EN 805, die für die Druckabsenkung nicht überschritten werden darf . . . . .	197
<b>Tabelle 7.5</b> Vergleich einiger physikochemischer Kennwerte von Monoethylenglykol und Monopropylenglykol. . . . .	199



<b>Tabelle 8.1</b> Chronologische Arbeitsschritte der iterativen Brunnenbemessung . . . . .	227
<b>Tabelle 8.2</b> Hydrochemie und Brunnenleistungseinschränkungen . . . .	231
<b>Tabelle 8.3</b> Typische anorganische Verbindungen bei Fouling- und Scalingerscheinungen in Brunnen . . . . .	233
<b>Tabelle 8.4</b> Analytik bei Erkundung eines Grundwasservorkommens .	235
<b>Tabelle 8.5</b> Kostenfreie analytische und numerische Berechnungssoftware für hydrochemische Fragestellungen . . . . .	236
<b>Tabelle 9.1</b> Die Inanspruchnahme-Risiken eines Bohrunternehmens und deren Absicherung . . . . .	249
<b>Tabelle 9.2</b> Beispiele rechtlicher Grundlagen für einen Anspruch gegenüber einem Schädiger . . . . .	250



## Vorbemerkung

Die Mitglieder des Arbeitskreises Geothermie (AK Geothermie) der Fachsektionen Hydrogeologie (FH-DGG) und Ingenieurgeologie (FI-DGG/DGGT) der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) freuen sich, dass Sie Interesse an den Empfehlungen „Oberflächennahe Geothermie – Empfehlungen zu Planung, Bau, Betrieb und Qualitätssicherung“ (EA Geothermie) haben. Diese Empfehlungen sind das Ergebnis der laufenden Arbeit des AK Geothermie. Der Arbeitskreis wird als AK 4.11 bei der DGGT geführt. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des AK sind Experten aus allen Bereichen, die mit Geothermie zu tun haben: Industrie, Behörden, Consulting, Fachhochschulen und Universitäten.

Die Herausgabe der vorliegenden Empfehlungen ist eine der Hauptaufgaben des Arbeitskreises. Die vorliegenden Empfehlungen beschränken sich zunächst auf die oberflächennahe Geothermie, doch sollen auch Aspekte der Tiefengeothermie berücksichtigt werden. Weiterhin sollen die Empfehlungen eine fachliche Grundlage für die Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen für gewerbliches Bohrpersonal in Anlehnung an DIN EN ISO 22475-1 „Fachkraft Bohrungen für geothermische Zwecke und Einbau von geschlossenen Wärmeüberträger-Systemen (Erdwärmesonden)“ (DGGT/DGG, 2010) gewährleisten.

Der AK Geothermie tritt zu regelmäßigen Arbeitssitzungen etwa vier bis sechs Mal im Jahr zusammen. Eine der Hauptaufgaben des AK ist die Herausgabe von Hinweisen, Tipps und Handlungsempfehlungen für die Mitglieder der Fachsektionen und andere Personen und Körperschaften, die mit Fragestellungen im Bereich der Geothermie Berührung haben. Diese Empfehlungen berücksichtigen insbesondere den Untergrundteil der verschiedenen Geothermieanlagen. Es sollen die wichtigsten Aspekte der geothermischen Nutzung des Untergrundes angerissen werden, wobei der Fokus eindeutig auf den häufigsten Anwendungsformen Erdwärmesonden und Brunnenanlagen liegt. Spezielle Verfahren, Techniken oder Verfahrenskombinationen gibt es am Markt in großer Zahl. Der Umstand, dass diese in der EA Geothermie zumeist nicht ausführlich diskutiert werden, impliziert keineswegs, dass es sich bei den verschiedenen Spezialitäten etwa um untaugliche oder weniger gut geeignete Systeme handelt. Die Beschränkung auf die gebräuchlichsten Systeme ist lediglich der Begrenzung des Umfangs dieses Buches geschuldet.

Ein besonderes Anliegen der Empfehlungen sind die qualitätsgesicherte Planung, der Bau und Betrieb von oberflächennahen geothermischen Anlagen sowie deren qualifizierte Überwachung. Die Empfehlungen sollen helfen,

den Schutz der Grundwasservorkommen sicher zu stellen, ohne die weitere Verbreitung geothermischer Heiz- und Kühlsysteme zu behindern. Dazu steht die Vermeidung von Schäden an der geothermischen Anlage sowie Schäden durch die Herstellung und den Betrieb der Anlagen im Mittelpunkt. Aufgrund aktueller Projekte wurden die Empfehlungen mit einem separaten Abschnitt zur Bewältigung von Risikopotenzialen ausgestattet.

In der Nutzung der oberflächennahen Geothermie besteht eine große, umweltfreundliche und auch sichere Möglichkeit, den Primärenergieverbrauch unserer Gesellschaft zu reduzieren. 50 % bis 60 % des Gesamtenergieverbrauchs der Industrienationen in Mitteleuropa ist durch den Betrieb von Gebäuden verursacht. Hier setzt die Geothermie fast ortsunabhängig, frei von direkten Emissionen, wirtschaftlich und grundlastfähig an.

## Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Beschreibung	Gebäuchliche Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$A_f$	offene Filterfläche	$m^2$
$a_k^*$	dimensionsloser kritischer Brunnenabstand	1
$b_l$	Abstrom-/Entnahmebreite	m
$C_p$	Wärmekapazität bei konst. Druck (isobar)	$Ws \cdot K^{-1}$
$C_{th}$	Wärmekapazität eines Bereiches	$Ws \cdot K^{-1}$
$C_v$	Wärmekapazität bei konst. Volumen (isochor)	$Ws \cdot K^{-1}$
$c$	spezifische Wärmekapazität	$Ws \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck ( $= C_p / m$ )	$Ws \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_v$	spezifische Wärmekapazität bei konst. Volumen ( $= C_v / m$ )	$Ws \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{pm}$	molare Wärmekapazität bei konst. Druck (isobar)	$Ws \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{vm}$	molare Wärmekapazität bei konst. Volumen (isochor)	$Ws \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
$d$	Durchmesser	m
$d_a$	Außendurchmesser	m
$d_B$	Bohrdurchmesser	m
$d_{Br}$	Durchmesser des Brunnenrohres	m
$d_i$	Innendurchmesser	m
$d_k$	Korndurchmesser	m
$d_p$	Durchmesser der Pumpe	m
$d_{Rr}$	Durchmesser des Ringraumes	m
$d_s$	Filterschlitzweite	m
$d_{so}$	Durchmesser eines Sondenbündels mit Abstandhaltern	m
$E_i$	Exponential-Integral	1
$F$	Kraft	N
$g$	örtliche Fallbeschleunigung	$m \cdot s^{-2}$
$h_G$	Grundwassermächtigkeit	m

Formelzeichen	Beschreibung	Gebrauch- liche Einheit
$h_{GL}$	Grundwasserleitmächtigkeit	m
$h_{GLD}$	Grundwasserleiterüberdeckung	m
$I$	hydraulischer Gradient (Potenzialgefälle)	1
$i_z$	Tiefenintervall	m
$K$	spezifische Permeabilität	$m^2$
$k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert	$m \cdot s^{-1}$
$k_{fg}$	Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwert	$m \cdot s^{-1}$
$l$	charakteristische Länge	m
$l_B$	Länge einer Bohrung	m
$l_f$	Filterlänge	m
$l_k$	Länge eines überströmten Körpers	m
$l_{So}$	produktive Sondenlänge	m
$l_z$	gebohrte Länge (Teufe)	m
$m$	Masse	kg
$n_{eff}$	effektiver, durchflusswirk- samer Porenraumanteil	100 % = 1
$n_f$	fluidgefüllter Anteil des Porenraumes	100 % = 1
$n_{ges}$	Gesamtporosität	100 % = 1
$p$	Druck	$Pa = N \cdot m^{-2}$
$Q$	Wärmemenge	Ws
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$\dot{Q}_H$	jährlicher Heizenergiebedarf	$kWh \cdot a^{-1}$
$q$	spezifische Wärmestromdichte	$W \cdot m^{-2}$
$q_V$	volumetrische Wärmestromdichte	$W \cdot m^{-3}$
$R$	Reichweite der Grund- wasserabsenkung	m
$R_{th}$	thermischer Widerstand	$K \cdot W^{-1}$
$R_B$	thermischer Bohrlochwiderstand	$K \cdot W^{-1}$
$R_{B, eff}$	effektiver thermischer Bohrlochwiderstand	$K \cdot W^{-1}$
$R_i$	thermischer Widerstand der Einzelkompartimente	$K \cdot W^{-1}$
$R_S$	thermischer Widerstand der Skinzone	$K \cdot W^{-1}$