

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Thermisches Regime der Erde</b>	1
1.1	Erneuerbare Energien, Globaler Status	1
1.2	Aufbau der Erde	2
1.3	Energiedargebot der Erde	6
1.4	Wärmetransport und thermische Parameter	10
1.5	Kurzer Abriss von Methoden zur Bestimmung thermischer Parameter	15
1.6	Temperaturmessungen	16
<b>2</b>	<b>Geschichte geothermischer Energienutzung</b>	21
2.1	Frühe geothermische Nutzungen	22
2.2	Geothermische Nutzungen in der späteren Neuzeit	27
<b>3</b>	<b>Geothermische Energie-Ressourcen</b>	31
3.1	Energie	31
3.2	Bedeutung der Erneuerbaren Energien	33
3.3	Status der Nutzung der geothermischen Energie	35
3.4	Geothermische Energiequellen	37
<b>4</b>	<b>Geothermische Nutzungsmöglichkeiten</b>	41
4.1	Oberflächennahe geothermische Energienutzung	43
4.1.1	Kollektoren, Erdwärmekörbe	44
4.1.2	Geostrukturen	48
4.1.3	Erdwärmesonden	50
4.1.4	Phasenwechselsonden	52
4.1.5	Brunnensysteme	52
4.1.6	Grubenwassernutzungen, Nutzungen im Altbergbau	53
4.1.7	Weitere oberflächennahe geothermische Nutzungen	55
4.2	Tiefe geothermische Energienutzung	56
4.2.1	Hydrothermale Systeme	56
4.2.2	Petrothermale Systeme, EGS	64
4.2.3	Tiefe Erdwärmesonden	67
4.3	Wirkungsgrad	71
4.4	Bedeutende Geothermie-Felder, Hochenthalpie-Felder	74
4.5	Exkurs, Herausforderungen	81

<b>5 Perspektiven geothermischer Energienutzung</b>	83
5.1 Nachhaltigkeit und Potentiale geothermischer Nutzung	84
5.2 Untergrundspeicher	87
5.3 Groß- und Hochtemperatur-Wärmepumpen	88
5.4 Fernwärmesysteme, Kältenetze	89
5.5 Sektorkopplung	91
5.6 Information und Kommunikation	92
<b>6 Erdwärmesonden</b>	97
6.1 Planungsgrundsätze	98
6.2 Bau von Erdwärmesonden	98
6.3 Auslegung von Erdwärmesonden	108
6.3.1 Wärmepumpen	109
6.3.2 Thermische Parameter und Programme für die Auslegung von Erdwärmesonden	113
6.3.3 Thermal Response Test	117
6.4 Bohrverfahren für Erdwärmesonden	121
6.4.1 Direktspülverfahren	125
6.4.2 Imlochhammerbohrverfahren	130
6.4.3 Abschließende Hinweise, Bohrrisiken	131
6.5 Hinterfüllung/Verpressung von Erdwärmesonden	135
6.6 Bau von Erdwärmesonden mit Überlänge (Mitteltiefe EWS)	141
6.7 Potentielle Risiken, Fehler und Schäden bei Erdwärmesonden	144
6.8 Spezielle Nutzungssysteme und Weiterentwicklungen	148
6.8.1 Erdwärmesonden-Felder	148
6.8.2 Erdsonden und Kühlung	151
6.8.3 Kombination Solarthermie/Erdwärmesonden	152
6.8.4 Vermessung von Erdwärmesonden, Qualitätskontrolle	155
6.8.5 Erdwärmesonden mit Phasenwechsel	163
<b>7 Geothermische Brunnenanlagen</b>	167
7.1 Bau von Grundwasserbrunnen	169
7.2 Wasserqualität	172
7.3 Thermischer Einflussbereich, Modellrechnungen	173
<b>8 Hydrothermale Nutzung</b>	177
8.1 Geologischer und tektonischer Bau	178
8.2 Thermische und hydraulische Eigenschaften des Nutzhorizontes	182
8.3 Numerische Modellierung	190
8.4 Hydrochemie heißer Wässer aus großer Tiefe	195
8.5 Ertüchtigungsmaßnahmen, Stimulation	199
8.6 Fündigkeits-, Risiko-, Wirtschaftlichkeit	202
8.7 Beispiele und Erfahrungen hydrothermaler Anlagen	210
8.7.1 Pariser Becken	210

8.7.2	Norddeutsche Tiefebene . . . . .	214
8.7.3	Süddeutsches Molassebecken . . . . .	215
8.7.4	Oberrheingraben . . . . .	219
8.8	Aquiferspeicher . . . . .	223
8.8.1	Funktionsweise von Aquiferspeichern . . . . .	224
8.8.2	Beispiele für Aquiferspeicher mit hohen Einspeisetemperaturen . . . . .	227
8.8.3	Berechnungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten . . . . .	229
8.9	Projektierung hydrothermaler Anlagen . . . . .	232
<b>9</b>	<b>Enhanced-Geothermal-Systems (EGS)</b> . . . . .	<b>239</b>
9.1	Verfahren, Vorgehen, Ziele . . . . .	241
9.2	Geschichte, EGS-Projekte . . . . .	242
9.3	Vorgehen bei der Stimulation . . . . .	247
9.4	Erfahrungen und Umgang mit der Seismizität . . . . .	255
9.5	Empfehlungen, Hinweise . . . . .	256
<b>10</b>	<b>Geothermische Nutzungen in Hochenthalpie-Gebieten</b> . . . . .	<b>263</b>
10.1	Charakteristika von Hochenthalpie-Gebieten . . . . .	264
10.2	Erschließung von Hochenthalpie-Gebieten, Inbetriebnahme . . . . .	269
10.3	Unerwünschte Begleiterscheinungen, Gegenmaßnahmen . . . . .	278
10.4	Herausforderungen und Chancen der Erschließung über- kritischen Wassers . . . . .	286
<b>11</b>	<b>Potentielle Umweltauswirkungen bei der Tiefen Geothermie</b> . . . . .	<b>293</b>
11.1	Seismizität und Tiefe Geothermie . . . . .	295
11.1.1	Induzierte Erdbeben . . . . .	298
11.1.2	Erdbebenskalen . . . . .	300
11.1.3	Die Ereignisse von Basel . . . . .	303
11.1.4	Die Ereignisse von St. Gallen . . . . .	307
11.1.5	Seismische Beobachtungen bei EGS-Projekten . . . . .	309
11.1.6	Folgerungen aus der Stimulation bei Tiefer Geothermie . . . . .	314
11.1.7	Regelungen für hydrothermale und petrothermale Vorhaben (EGS) . . . . .	320
11.2	Auswirkungen durch und auf den Untergrund . . . . .	324
11.3	Übertägige Auswirkungen . . . . .	329
<b>12</b>	<b>Bohr- und Pumpentechnik bei Tiefbohrungen</b> . . . . .	<b>333</b>
12.1	Tiefbohrungen . . . . .	334
12.2	Pumpen in Geothermiebohrungen . . . . .	353
<b>13</b>	<b>Geophysikalische Untersuchungen</b> . . . . .	<b>357</b>
13.1	Geophysikalische Vorerkundung, Seismik . . . . .	358
13.1.1	Gravimetrie, Geomagnetik, Magnetotellurik . . . . .	359
13.1.2	Seismik . . . . .	360
13.2	Geophysikalische Bohrlochmessungen und Interpretation . . . . .	366

---

<b>14 Bestimmung hydraulischer Parameter des Reservoirs . . . . .</b>	373
14.1 Grundlagen. . . . .	374
14.2 Testarten, Planung und Durchführung, Auswerteverfahren. . . . .	383
14.3 Tracerversuche . . . . .	393
14.4 Temperaturauswerteverfahren . . . . .	396
14.5 THMC-Modellierung. . . . .	397
<b>15 Chemische Zusammensetzung von Tiefenwässern, Folgerungen für Planung und Betrieb geothermischer Anlagen . . . . .</b>	401
15.1 Probenahme und Analytik . . . . .	403
15.2 Chemische Parameter zur Charakterisierung tiefer Fluide . . . . .	407
15.3 Grafische Darstellungen der Zusammensetzung tiefer Fluide. . . . .	412
15.4 Abschätzung der Reservoirtemperatur aus hydrochemischen Analysen . . . . .	415
15.4.1 SiO <sub>2</sub> Geothermometer . . . . .	416
15.4.2 K-Na Geothermometer. . . . .	420
15.4.3 Mg–K Geothermometer . . . . .	422
15.4.4 Weitere Kationen Geothermometer . . . . .	424
15.4.5 Giggenbach Dreiecks-Geothermometer. . . . .	425
15.4.6 Multikomponenten Geothermometer. . . . .	428
15.5 Herkunft der Fluide . . . . .	428
15.6 Sättigungszustände, Sättigungsindex. . . . .	430
15.7 Sinterbildung und Korrosion, Inhibitoren . . . . .	432
15.8 Gewinnung von Rohstoffen aus geothermalen Fluiden. . . . .	446
<b>Literatur. . . . .</b>	451
<b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>	485