

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Thermisches Regime der Erde</b> . . . . .	<b>1</b>
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> . . . . .	<b>21</b>
2.1	Frühe geothermische Nutzungen . . . . .	22
2.2	Geothermische Nutzungen in der späteren Neuzeit . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Geothermische Energie-Ressourcen</b> . . . . .	<b>31</b>
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> . . . . .	<b>41</b>
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</b>	<b>Perspektiven geothermischer Energienutzung</b> . . . . .	83
5.1	Nachhaltigkeit und Potentiale geothermischer Nutzung . . . . .	84
5.2	Untergroundspeicher . . . . .	87
5.3	Groß- und Hochtemperatur-Wärmepumpen . . . . .	88
5.4	Fernwärmenetze, Kältenetze . . . . .	89
5.5	Sektorkopplung . . . . .	91
5.6	Information und Kommunikation . . . . .	92
<b>6</b>	<b>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</b>	<b>Geothermische Brunnenanlagen</b> . . . . .	167
7.1	Bau von Grundwasserbrunnen . . . . .	169
7.2	Wasserqualität . . . . .	172
7.3	Thermischer Einflussbereich, Modellrechnungen . . . . .	173
<b>8</b>	<b>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	Fündigkeit, Risiko, Wirtschaftlichkeit . . . . .	202
8.7	Beispiele und Erfahrungen hydrothermalen 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 hydrothormaler 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</b>	<b>Bestimmung hydraulischer Parameter des Reservoirs</b>	<b>373</b>
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</b>	<b>Chemische Zusammensetzung von Tiefenwässern, Folgerungen für Planung und Betrieb geothermischer Anlagen</b>	<b>401</b>
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>	<b>451</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>485</b>