

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                  |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>Thermisches Regime der Erde</b> .....                                         | 1  |
| 1.1      | Erneuerbare Energien, Globaler Status .....                                      | 2  |
| 1.2      | Aufbau der Erde .....                                                            | 2  |
| 1.3      | Energiedargebot der Erde .....                                                   | 7  |
| 1.4      | Wärmetransport und thermische Parameter .....                                    | 9  |
| 1.5      | Kurzer Abriss von Methoden zur Bestimmung thermischer<br>Parameter .....         | 13 |
| 1.6      | Temperaturmessungen .....                                                        | 14 |
| <b>2</b> | <b>Geschichte geothermischer Energienutzung</b> .....                            | 19 |
| 2.1      | Frühe geothermische Nutzungen .....                                              | 20 |
| 2.2      | Geothermische Nutzungen in der späteren Neuzeit .....                            | 25 |
| <b>3</b> | <b>Geothermische Energie-Ressourcen</b> .....                                    | 29 |
| 3.1      | Energie .....                                                                    | 30 |
| 3.2      | Bedeutung der Erneuerbaren Energien .....                                        | 31 |
| 3.3      | Status der Nutzung der geothermischen Energie .....                              | 33 |
| 3.4      | Geothermische Energiequellen .....                                               | 35 |
| <b>4</b> | <b>Geothermische Nutzungsmöglichkeiten</b> .....                                 | 39 |
| 4.1      | Oberflächennahe geothermische Energienutzung .....                               | 41 |
| 4.2      | Tiefe geothermische Energienutzung .....                                         | 51 |
| 4.3      | Wirkungsgrad .....                                                               | 63 |
| 4.4      | Bedeutende Geothermie-Felder, Hochenthalpie-Felder .....                         | 67 |
| 4.5      | Exkurs, Herausforderungen .....                                                  | 70 |
| <b>5</b> | <b>Potentiale und Perspektiven geothermischer Energienutzung</b> .....           | 71 |
| <b>6</b> | <b>Erdwärmesonden</b> .....                                                      | 75 |
| 6.1      | Planungsgrundsätze .....                                                         | 76 |
| 6.2      | Bau von Erdwärmesonden .....                                                     | 76 |
| 6.3      | Auslegung von Erdwärmesonden .....                                               | 85 |
| 6.3.1    | Wärmepumpen .....                                                                | 86 |
| 6.3.2    | Thermische Parameter und Programme<br>für die Auslegung von Erdwärmesonden ..... | 90 |

|           |                                                                                                            |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.4       | Bohrverfahren für Erdwärmesonden . . . . .                                                                 | 98  |
| 6.4.1     | Direktspülverfahren . . . . .                                                                              | 102 |
| 6.4.2     | Imlochhammerbohrverfahren. . . . .                                                                         | 104 |
| 6.4.3     | Abschließende Hinweise, Bohrrisiken. . . . .                                                               | 105 |
| 6.5       | Hinterfüllung/Verpressung von Erdwärmesonden. . . . .                                                      | 109 |
| 6.6       | Bau von Erdwärmesonden mit Überlänge<br>(Mitteltiefe EWS). . . . .                                         | 115 |
| 6.7       | Potentielle Risiken, Fehler und Schäden<br>bei Erdwärmesonden . . . . .                                    | 117 |
| 6.8       | Spezielle Nutzungssysteme und Weiterentwicklungen . . . . .                                                | 121 |
| 6.8.1     | Erdwärmesonden-Felder . . . . .                                                                            | 122 |
| 6.8.2     | Erdsonden und Kühlung. . . . .                                                                             | 125 |
| 6.8.3     | Kombination Solarthermie/Erdwärmesonden . . . . .                                                          | 125 |
| 6.8.4     | Vermessung von Erdwärmesonden,<br>Qualitätskontrolle. . . . .                                              | 129 |
| 6.8.5     | Erdwärmesonden mit Phasenwechsel . . . . .                                                                 | 136 |
| <b>7</b>  | <b>Geothermische Brunnenanlagen</b> . . . . .                                                              | 141 |
| 7.1       | Bau von Grundwasserbrunnen . . . . .                                                                       | 143 |
| 7.2       | Wasserqualität . . . . .                                                                                   | 146 |
| 7.3       | Thermischer Einflussbereich, Modellrechnungen . . . . .                                                    | 147 |
| <b>8</b>  | <b>Hydrothermale Nutzung, Geothermische Dublette</b> . . . . .                                             | 151 |
| 8.1       | Geologischer und tektonischer Bau . . . . .                                                                | 152 |
| 8.2       | Thermische und hydraulische Eigenschaften<br>des Nutzhorizontes. . . . .                                   | 156 |
| 8.3       | Hydraulische und thermische Reichweite geothermischer<br>Dubletten, numerische Modellierungen. . . . .     | 163 |
| 8.4       | Hydrochemie heißer Wässer aus großer Tiefe . . . . .                                                       | 168 |
| 8.5       | Ertüchtigungsmaßnahmen, Stimulation. . . . .                                                               | 172 |
| 8.6       | Fündigkeit, Risiko, Wirtschaftlichkeit . . . . .                                                           | 174 |
| 8.7       | Beispiele hydrothermaler Nutzungen. . . . .                                                                | 181 |
| 8.7.1     | Hydrothermale Dubletten. . . . .                                                                           | 182 |
| 8.7.2     | Aquiferspeicher . . . . .                                                                                  | 191 |
| 8.8       | Projektierung hydrothermaler Anlagen . . . . .                                                             | 195 |
| <b>9</b>  | <b>Enhanced-Geothermal-Systems (EGS), Hot-Dry-Rock Systeme<br/>(HDR), Deep-Heat-Mining (DHM)</b> . . . . . | 199 |
| 9.1       | Verfahren, Vorgehen, Ziele. . . . .                                                                        | 201 |
| 9.2       | Geschichte, erste HDR-Verfahren . . . . .                                                                  | 202 |
| 9.3       | Vorgehen bei der Stimulation. . . . .                                                                      | 204 |
| 9.4       | Erfahrungen und Umgang mit der Seismizität. . . . .                                                        | 210 |
| 9.5       | Empfehlungen, Hinweise. . . . .                                                                            | 211 |
| <b>10</b> | <b>Geothermische Nutzungen in Hochenthalpie-Gebieten</b> . . . . .                                         | 217 |
| 10.1      | Charakteristika von Hochenthalpie-Gebieten . . . . .                                                       | 218 |
| 10.2      | Erschließung von Hochenthalpie-Gebieten, Inbetriebnahme . . . . .                                          | 223 |

|           |                                                                                            |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.3      | Unerwünschte Begleiterscheinungen, Gegenmaßnahmen . . . . .                                | 232        |
| 10.4      | Herausforderungen und Chancen der Erschließung überkritischen Wassers . . . . .            | 238        |
| <b>11</b> | <b>Potentielle Umweltauswirkungen bei der Tiefen Geothermie . . . . .</b>                  | <b>243</b> |
| 11.1      | Seismizität und Tiefe Geothermie . . . . .                                                 | 245        |
| 11.1.1    | Induzierte Erdbeben . . . . .                                                              | 247        |
| 11.1.2    | Erdbebenskalen . . . . .                                                                   | 250        |
| 11.1.3    | Die Ereignisse von Basel . . . . .                                                         | 251        |
| 11.1.4    | Die Ereignisse von St. Gallen . . . . .                                                    | 255        |
| 11.1.5    | Seismische Beobachtungen bei EGS-Projekten. . . . .                                        | 257        |
| 11.1.6    | Folgerungen und Empfehlungen für hydrothermale und petrothermale Nutzungen (EGS) . . . . . | 261        |
| 11.2      | Auswirkungen durch und auf den Untergrund. . . . .                                         | 268        |
| 11.3      | Übertägige Auswirkungen . . . . .                                                          | 272        |
| <b>12</b> | <b>Bohrtechnik für Tiefbohrungen. . . . .</b>                                              | <b>275</b> |
| <b>13</b> | <b>Geophysikalische Untersuchungen . . . . .</b>                                           | <b>297</b> |
| 13.1      | Geophysikalische Vorerkundung, Seismik. . . . .                                            | 298        |
| 13.2      | Geophysikalische Bohrlochmessungen und Interpretation . . . . .                            | 305        |
| <b>14</b> | <b>Hydraulische Untersuchungen, Tests . . . . .</b>                                        | <b>311</b> |
| 14.1      | Grundlagen. . . . .                                                                        | 312        |
| 14.2      | Testarten, Planung und Durchführung, Auswerteverfahren. . . . .                            | 320        |
| 14.3      | Tracerversuche . . . . .                                                                   | 327        |
| 14.4      | Temperaturauswerteverfahren . . . . .                                                      | 330        |
| <b>15</b> | <b>Hydrochemische Untersuchungen. . . . .</b>                                              | <b>333</b> |
| 15.1      | Probennahme und Analytik . . . . .                                                         | 334        |
| 15.2      | Wichtigste Untersuchungsergebnisse und Interpretationen. . . . .                           | 336        |
| 15.3      | Ausfällungen, Korrosion . . . . .                                                          | 345        |
|           | <b>Literatur. . . . .</b>                                                                  | <b>355</b> |
|           | <b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>                                                       | <b>381</b> |