

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Der Wärmehaushalt der Erdkruste bei der Erdwärmegewinnung . . . . .</b>	<b>1</b>
	Literatur .....	5
<b>2</b>	<b>Der Aufbau von Erdwärmeanlagen . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1	Drei Systeme zur Erdwärmegewinnung .....	7
2.2	Oberflächennahe EWS-Systeme mit Wasserzirkulation .....	10
2.3	Oberflächennahe EWS-Systeme als Direktverdampfer (Phasenwechselsonden) .....	13
2.4	Tiefe Erdwärmesonden .....	18
	Literatur .....	20
<b>3</b>	<b>Wärmepumpen . . . . .</b>	<b>21</b>
3.1	Arbeitsprinzip der Wärmepumpe .....	21
3.2	Leistungszahl und Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen .....	22
	Literatur .....	25
<b>4</b>	<b>Berechnung von Erdwärmeanlagen . . . . .</b>	<b>27</b>
4.1	Thermo- und fluidynamische Grundlagen des Wärmetransportes im Erdreich und in Erdwärmesonden .....	27
4.1.1	Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes im Erdreich .....	28
4.1.2	Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes in Erdwärmesonden .....	29
4.2	Mathematisch-analytische Lösungen für die Einzelsonde .....	32
4.2.1	Zeitlich konstante Temperatur im Inneren der Erdwärmesonde .....	32
4.2.2	Speicherung von Wärme mit konstantem Wärmestrom .....	33
4.2.3	Speicherung von Wärme durch Wasserinjektion in eine Schicht .....	33
4.2.4	Erdwärmesonde mit Wasserzirkulation als U-Rohr oder Koaxialsonde .....	35

4.2.5	Thermal Response Test . . . . .	39
4.3	Numerische Simulation der Einzelsonde – ModTherm . . . . .	41
4.3.1	Örtliche Diskretisierung (Zelleinteilung) . . . . .	42
4.3.2	Stetigkeit der Eigenschaften . . . . .	43
4.3.3	Randbedingungen . . . . .	45
4.3.4	Wärmeübergang zwischen Fließräumen und Feststoff . . . . .	47
4.3.5	Zeitliche Diskretisierung . . . . .	47
4.3.6	Steuerung von Wärme- und Kälteleistung . . . . .	48
4.3.7	Flutpunkt-/Staupunktberechnung beim Direktverdampferverfahren . . . . .	50
4.3.8	Vergleich der numerischen Lösung mit analytischen Lösungen . . . . .	51
4.3.9	Speicherung der Ergebnisse für die 3D-Simulation von Sondenfeldern . . . . .	52
4.3.10	Auswertung von Thermal Response Tests mit numerischen Verfahren . . . . .	53
4.4	3D-Simulation von Sondenfeldern – ModGeo3D . . . . .	59
4.4.1	Bilanzverfahren und Zeitschrittbeschränkung . . . . .	60
4.4.2	Die Denkweise des U.S.G.S. für hydrogeologische Aufgabenstellungen (Modflow/MT3D) . . . . .	61
4.4.3	Numerische Lösung der Strömungs- und Wärmetransportgleichung . . . . .	63
4.4.4	Berücksichtigung von Erdwärmesonden (EWS) . . . . .	65
4.4.5	Eingabe der Daten, die nicht in Modflow/MT3D vorgesehen sind . . . . .	66
4.5	Software . . . . .	67
4.6	Berechnungsbeispiele und Vergleiche . . . . .	68
4.6.1	Erdwärme für ein Einfamilienhaus . . . . .	68
4.6.2	Beheizung und Klimatisierung eines Geschäftshauses . . . . .	72
4.7	Optimierung von Erdwärmesonden . . . . .	79
4.7.1	Tiefe der Sonde . . . . .	81
4.7.2	Thermische Leitfähigkeit der Rohre und Wärmeübergangszahlen . . . . .	82
4.7.3	Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes . . . . .	84
4.7.4	Einfluss der Zirkulationsrate . . . . .	85
4.7.5	Einfluss des Sondendurchmessers (großvolumige EWS, GeoKOAX) . . . . .	86
	Literatur . . . . .	89
5	<b>Bau von Erdwärmesonden . . . . .</b>	91
5.1	Geologisches Vorprofil, Sondentyp und –eckwerte . . . . .	92
5.2	Thermal Response Test . . . . .	95
5.3	Genehmigungsantrag . . . . .	96

<b>5.4</b>	<b>Bohrverfahren und Technik . . . . .</b>	<b>97</b>
5.4.1	Bohrverfahren . . . . .	97
5.4.2	Informationsgewinn aus Bohrungen . . . . .	99
5.4.3	Bohranlagen . . . . .	102
<b>5.5</b>	<b>Sondenkomplettierung, Verrohrung, Verfüllung . . . . .</b>	<b>104</b>
5.5.1	Wasserzirkulationsverfahren . . . . .	104
5.5.2	DVD-Sonden, Phasenwechselsonden . . . . .	106
5.5.3	Verfüllung von Erdwärmesonden . . . . .	107
<b>5.6</b>	<b>Qualitätssicherung . . . . .</b>	<b>109</b>
Literatur	.....	113
<b>6</b>	<b>Überblick über genehmigungsrechtliche Aspekte für Erdwärmbohrungen . . . . .</b>	<b>115</b>
6.1	Rechtsverbindliche Regelwerke (Bundesgesetze) . . . . .	115
6.2	Nicht rechtsverbindliche Regelwerke . . . . .	117
6.2.1	Arbeitspapier der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-Papier) . . . . .	117
6.2.2	VDI-Richtlinie 4640 . . . . .	117
6.2.3	Leitfäden der Bundesländer . . . . .	119
Literatur	.....	122
<b>7</b>	<b>Anlagen zur Energiespeicherung . . . . .</b>	<b>125</b>
7.1	Oberflächennahe Wärmespeicher im Erdreich . . . . .	127
7.2	Oberflächennahe Kältespeicherung im Erdreich . . . . .	128
7.3	Wärmespeicherung mit Tiefen Erdwärmesonden . . . . .	128
7.4	Hydrothermale Wärmespeicherung mit Tiefbohrungen . . . . .	128
Literatur	.....	132
<b>8</b>	<b>Kostenvergleiche . . . . .</b>	<b>133</b>
8.1	Kosten für die in Abschn. 4.6.1 beschriebene Einfamilienhaus-Heizungsanlage . . . . .	134
8.2	Kosten für die in Abschn. 4.6.2 beschriebene Geschäftshaus-Anlage . . . . .	135
<b>9</b>	<b>Ergänzende Informationen . . . . .</b>	<b>137</b>
9.1	Input-Datei ModTherm für das Beispiel Einfamilienhaus . . . . .	137
9.2	Zusammenfassung der gesetzlichen Grundlagen, Richtlinien und Vorschriften . . . . .	139
9.3	Zusammenfassung der wichtigsten Leitfäden der Deutschen Bundesländer . . . . .	147
<b>Sachverzeichnis</b>	.....	<b>181</b>