

# 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 fluiddynamische 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
<b>5</b>	<b>Bau von Erdwärmesonden .....</b>	<b>91</b>
5.1	Geologisches Vorprofil, Sondentyp und –eckwerte .....	92
5.2	Thermal Response Test .....	95
5.3	Genehmigungsantrag .....	96

5.4	Bohrverfahren und Technik .....	97
5.4.1	Bohrverfahren .....	97
5.4.2	Informationsgewinn aus Bohrungen .....	99
5.4.3	Bohranlagen .....	102
5.5	Sondenkomplettierung, Verrohrung, Verfüllung .....	104
5.5.1	Wasserzirkulationsverfahren .....	104
5.5.2	DVD-Sonden, Phasenwechselsonden .....	106
5.5.3	Verfüllung von Erdwärmesonden .....	107
5.6	Qualitätssicherung .....	109
	Literatur .....	113
<b>6</b>	<b>Überblick über genehmigungsrechtliche Aspekte für Erdwärm Bohrungen</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>