

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XXIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	2
<b>2 Oberflächennahe Geothermie</b>	<b>4</b>
2.1 Allgemeine Grundlagen.....	4
2.2 Grundlagen der Wärmepumpentechnik.....	8
2.3 Systeme der oberflächennahen Geothermie.....	9
2.3.1 Erdwärmesonden.....	10
2.3.2 Erdwärmekollektoren.....	12
2.3.3 Offene Systeme.....	13
<b>3 Thermo-aktive Bauteile – Stand der Technik</b>	<b>16</b>
3.1 Einführung.....	16
3.1.1 Planung und Auslegung von thermo-aktiven Bauteilen.....	19
3.1.2 Thermo-mechanisches Verhalten von thermo-aktiven Bauteilen.....	20
3.2 Energiepfähle.....	22
3.3 Energiewände- und Bodenplatten.....	26
3.4 Thermische Aktivierung von Tunnelbauwerken.....	29
3.4.1 Tunnel in offener Bauweise.....	30
3.4.2 Tunnel in geschlossener Bauweise.....	31
3.4.3 Nutzung der Abwasserwärme aus Kanälen.....	34
3.4.4 Energieanker.....	34
3.5 Systeme zur Eisfreihaltung.....	35
<b>4 Theoretische Grundlagen zum Wärmetransport</b>	<b>38</b>
4.1 Wärmetransport im Untergrund.....	38
4.1.1 Wärmeleitung (Konduktion).....	40
4.1.2 Konvektion.....	41
4.1.3 Wärmestrahlung.....	44

4.1.4	Hydrodynamische Dispersion .....	45
4.1.5	Wärmetransportgleichung .....	47
4.2	Wärmetransport im bzw. am Bauteil .....	48
4.2.1	Temperaturausbreitung im Untergrund infolge des thermo-aktiven Bauteiles (instationärer Wärmetransport).....	48
4.2.2	Wärmetransport im thermo-aktiven Bauteil .....	50
4.2.3	Konvektion an der Bauteiloberfläche .....	52
4.3	Wärmetransport im Absorbersystem .....	55
4.3.1	Fluidmechanische Grundlagen und Kennzahlen einer Rohrströmung .....	56
4.3.2	Druckverluste .....	59
4.3.3	Wärmeleitung .....	60
4.3.4	Konvektion .....	61
4.4	Thermische Materialeigenschaften .....	64
4.4.1	(Thermische) Eigenschaften von Wasser bzw. Wasser-Glykol-Gemischen .....	65
4.4.2	Thermische Eigenschaften von Böden .....	67
4.4.3	Thermische Eigenschaften von Beton .....	75
<b>5</b>	<b>Temperatur in den oberflächennahen Bodenschichten</b> .....	<b>77</b>
5.1	Vertikale Temperaturverteilung im Untergrund .....	77
5.1.1	Berechnung der Temperaturverteilung im Untergrund .....	78
5.1.2	Analytische Berechnung der Erdoberflächentemperatur .....	80
5.2	Energiebilanz an der Erdoberfläche .....	82
5.2.1	Strahlungsbilanz .....	83
5.2.2	Konvektiver (fühlbarer) Wärmestrom .....	86
5.2.3	Latenter Wärmestrom .....	88
5.2.4	Bodenwärmestrom .....	89
5.2.5	Schneebedeckte Oberflächen .....	89
5.2.6	Parametersatz zur Berechnung der Erdoberflächentemperatur .....	90
5.3	Urban Heat Island Effekt .....	92
5.4	Einfluss des jahreszeitlichen Temperaturverlaufs auf thermo-aktive Bauteile .....	94
5.4.1	Böden ohne Grundwasserströmung .....	95
5.4.2	Böden mit Grundwasserströmung .....	98
<b>6</b>	<b>Thermo-aktive Abdichtungselemente</b> .....	<b>102</b>
6.1	Prinzip des Systems und Einsatzgebiete .....	102
6.2	Konstruktive Ausbildung der Elemente .....	104
6.3	Laborversuche .....	107
6.3.1	Aufbau des Versuchsstandes .....	107

6.3.2	Verwendete Materialien.....	109
6.3.3	Versuchsprogramm und Ergebnisübersicht.....	110
6.3.4	Zusammenfassende Bewertung der Laborversuche .....	121
<b>7</b>	<b>Thermische Berechnung von Erdwärmesonden und thermo-aktiven Bauteilen</b>	<b>123</b>
7.1	Berechnungsansätze für Erdwärmesonden .....	124
7.1.1	Analytische Ansätze zur Beschreibung der Temperaturantwort im Umfeld einer Erdwärmesonde .....	124
7.1.2	Thermische Widerstände für Erdwärmesonden.....	126
7.1.3	Numerische Ansätze für Erdwärmesonden .....	129
7.1.4	Einfluss einer Grundwasserströmung .....	131
7.2	Berechnungsansätze für Energiepfähle .....	135
7.2.1	Analytische Ansätze .....	135
7.2.2	Thermische Widerstände für Energiepfähle .....	136
7.2.3	Numerische Ansätze für Energiepfähle .....	138
7.3	Berechnungsansätze für horizontale Systeme.....	138
7.3.1	Berechnung von Erdwärmekollektoren .....	139
7.3.2	Berechnung von Systemen zur Eisfreihaltung.....	140
7.4	Berechnungsansätze für Energiewände und Energietunnel .....	141
7.5	Anforderungen an ein Berechnungsmodell für flächige thermo-aktive Bauteile .....	143
<b>8</b>	<b>Berechnungsmodell und numerische Umsetzung für flächige thermo-aktive Bauteile</b>	<b>145</b>
8.1	Allgemeine Hinweise und Grundlagen .....	145
8.2	Widerstandsmodell für flächige thermo-aktive Bauteile .....	146
8.2.1	Aufbau des System .....	146
8.2.2	Widerstandsanalogie.....	147
8.2.3	Bauteilwiderstand .....	149
8.2.4	Widerstände für das Rohrsystem.....	156
8.2.5	Bodenwiderstand .....	160
8.3	Numerische Umsetzung .....	164
8.3.1	Das Finite Differenzen Programm SHEMAT bzw. SHEMAT-Suite.....	164
8.3.2	Integration des Berechnungsansatzes in SHEMAT-Suite .....	165
8.4	Verifizierung und Kalibrierung des Berechnungsansatzes .....	168
8.4.1	Benchmark-Test.....	168
8.4.2	Vergleich mit den Laborversuchen.....	169
<b>9</b>	<b>Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von Energiewänden</b>	<b>176</b>
9.1	Betriebsparameter .....	179

9.1.1	Volumenstrom .....	179
9.1.2	Vorlauftemperatur .....	180
9.1.3	Wärmeträgermedium .....	181
9.2	Untergrund- bzw. Standorteigenschaften .....	184
9.2.1	Untergrundtemperatur .....	184
9.2.2	Innenraumtemperatur .....	186
9.2.3	Thermische Bodeneigenschaften .....	188
9.2.4	Grundwasser .....	190
9.3	Geometrische Randbedingungen / konstruktive Ausbildung des Bauteils .....	193
9.3.1	Rohranordnung .....	193
9.3.2	Rohr- bzw. Schenkelabstand .....	196
9.3.3	Rohrdurchmesser .....	198
9.3.4	Wandaufbau .....	200
9.4	Zusammenfassende Bewertung der Parameterstudie .....	205
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>208</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>212</b>
	<b>Forschungsvorhaben / Vorveröffentlichungen</b>	<b>242</b>