# Bestimmung thermischer Untergrundparameter in Erdwärmesondenfeldern und Evaluierung tiefenaufgelöster Thermal Response Tests durch thermohydraulische Modellierungen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades "Doktor der Naturwissenschaften"

im Promotionsfach Geologie / Paläontologie

am Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

von

## **Florian Malm**

geb. in Limburg an der Lahn

Mainz 2013

D77



Dekan:

- 1. Berichterstatter:
- 2. Berichterstatter:

#### Erklärung

Ich versichere hiermit gemäß § 10, Abs. 3d der Promotionsordnung des Fachbereichs 09 (Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften) der Johannes Gutenberg-Universität Mainz vom 24.07.2007, die als Dissertation vorgelegte Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel (Literatur, Apparaturen, Material) verfasst zu haben. Ich habe oder hatte die hier als Dissertation vorgelegte Arbeit nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht. Ich hatte weder die jetzt als Dissertation vorgelegte Arbeit noch Teile davon bei einer anderen Fakultät bzw. einem anderen Fachbereich als Dissertation eingereicht.

Dipl. Geol. Florian Malm

v

### Inhaltsverzeichnis

Anhangsverzeichnisxi
Abbildungsverzeichnisxiii
Tabellenverzeichnisxvii
Symbol- und Gleichungsverzeichnisxix
Kurzfassungxxiii
Abstractxxv
Einleitung1
Abschnitt I der Dissertation5
Einleitung und Überblick Abschnitt I7
I-1 Übersicht über das Forschungsprojekt11
I-2. Erfassung der Untergrundeigenschaften13
I-2.1 Geologie und Hydrogeologie13
I-2.2 Beschreibung der thermischen Eigenschaften nach VDI 464014
I-2.2.1 Die Gesteinswärmeleitfähigkeit14
I-2.2.2 Die ungestörte Bodentemperatur16
I-2.3 Die Bestimmung der Untergrundparameter mit dem Thermal Response Test16
I-2.3.1 Ermittlung der Gesteinswärmeleitfähigkeit17
I-2.3.2 Ermittlung der ungestörten Bodentemperatur im Zuge eines TRT18
I-2.3.3 Ablauf der Messungen18
I-2.4 Neue Methoden zur tiefenaufgelösten Bestimmung der Untergrundparameter19
I-2.4.1 Faseroptische Temperaturmessmethode21
I-2.4.1.1 Ermittlung der ungestörten Bodentemperatur im Zuge eines eTRT22
I-2.4.1.2 Enhanced Thermal Response Test (eTRT)24
I-2.4.1.2.1 Ablauf der Messungen24
I-2.4.1.2.2 Ermittlung der tiefenabhängigen Wärmeleitfähigkeit mit dem eTRT25
I-2.4.2 in-situ Grundwasserströmungsmessungen29
I-2.5 Vergleich der Ergebnisse von TRT und eTRT31
I-2.6 Vergleich der eTRT-Ergebnisse mit den Grundwasserströmungsmessungen32
I-2.7 Beeinflussung der Untergrundwärmeleitfähigkeit durch Grundwasserfluss33

viii

I-3. Temperaturüberwachung	37
I-3.1 Messaufbau der Langzeitüberwachung	37
I-3.2 Ergebnisse der Temperaturüberwachung	38
I-3.3 Vergleich der Untergrundtemperaturen mit den Soletemperaturen	39
I-3.4 Beeinflussung benachbarter Sonden	41
I-4. Modellierungen des EWS-Feldes	45
I-4.1 Numerische Verfahren	45
I-4.1.1 FEFLOW	46
I-4.1.2 SHEMAT	48
I-4.2 Analytische Verfahren zur Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern	56
I-4.2.1 EED-Modell	56
I-4.2.2 EWS-Modell	58
I-4.3 Vergleich der analytischen Simulationsprogramme	60
I-4.4 Vergleich VDI mit den analytischen Programmen	62
I-4.5 Vergleich Wärmebedarf Planung und Wärmebedarf real	63
I-4.6 Gegenüberstellung des geplanten und des realen Wärmebedarfs mit EED.	64
15. Zusemmenfessung der Erzehnisse von Absehnitt I	67
1-5. Zusammentassung der Ergebnisse von Abschnitt I	07
Abschnitt II der Dissertation	71
Abschnitt II der Dissertation Einleitung und Überblick Abschnitt II	71 73
I-5. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt I Abschnitt II der Dissertation Einleitung und Überblick Abschnitt II II-1. Methodik	71 73 75
I-5. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt I Abschnitt II der Dissertation Einleitung und Überblick Abschnitt II II-1. Methodik II-1.1 DTS-Messverfahren	71 73 75 75
I-5. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt I         Abschnitt II der Dissertation         Einleitung und Überblick Abschnitt II         II-1. Methodik         II-1.1 DTS-Messverfahren         II-1.1.1 Physikalische Grundlagen	71 73 75 75 75
Abschnitt II der Dissertation Einleitung und Überblick Abschnitt II II-1. Methodik II-1.1 DTS-Messverfahren II-1.1.1 Physikalische Grundlagen II-1.1.2 Messdurchführung	71 73 75 75 75 75 76
Abschnitt II der Dissertation Einleitung und Überblick Abschnitt II II-1. Methodik II-1.1 DTS-Messverfahren II-1.1.1 Physikalische Grundlagen II-1.2 Messdurchführung II-1.2 Der enhanced Thermal Response Test (eTRT)	71 73 75 75 75 75 76 77
Abschnitt II der Dissertation	71 73 75 75 75 76 76 77 77
I-5. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt I.         Abschnitt II der Dissertation	71 73 75 75 75 76 76 77 77 77
I-5. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt II.         Abschnitt II der Dissertation.         Einleitung und Überblick Abschnitt II.         II-1. Methodik         II-1.1 DTS-Messverfahren.         II-1.1.1 Physikalische Grundlagen.         II-1.1.2 Messdurchführung         II-1.2 Der enhanced Thermal Response Test (eTRT)         II-1.2.1 Messaufbau und -durchführung         II-1.2.2 Auswertung der Ergebnisse         II-1.2.3 Auswertung des Relaxationsverhaltens	71 73 75 75 75 76 76 77 77 78 80
I-3. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt I         Abschnitt II der Dissertation	
I-5. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt II         Abschnitt II der Dissertation         Einleitung und Überblick Abschnitt II         II-1. Methodik         II-1.1 DTS-Messverfahren         II-1.1 DTS-Messverfahren         II-1.1 Physikalische Grundlagen         II-1.2 Messdurchführung         II-1.2 Der enhanced Thermal Response Test (eTRT)         II-1.2.1 Messaufbau und -durchführung         II-1.2.2 Auswertung der Ergebnisse         II-1.2.3 Auswertung des Relaxationsverhaltens         II-1.2.4 Peclét-Zahl-Analyse         II-2. Vergleich zwischen LWL-Messungen und TRTs	71 73 75 75 75 75 75 76 76 77 77 78 78 80 80 80
I-3. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt I         Abschnitt II der Dissertation         Einleitung und Überblick Abschnitt II         II-1. Methodik         II-1.1 DTS-Messverfahren         II-1.1 DTS-Messverfahren         II-1.1.2 Messdurchführung         II-1.2 Der enhanced Thermal Response Test (eTRT)         II-1.2.1 Messaufbau und -durchführung         II-1.2.2 Auswertung der Ergebnisse         II-1.2.3 Auswertung des Relaxationsverhaltens         II-1.2.4 Peclét-Zahl-Analyse         II-2.1 Messdurchführung         II-2.1 Messdurchführung	
I-5. Zusammenrassung der Ergebnisse von Abschnitt I         Abschnitt II der Dissertation	

II-3. Modellierung des eTRT mit Feflow	87
II-3.1 Feflow	87
II-3.2 Modellaufbau	92
II-3.2.1 Geometrie	92
II-3.2.2 Meshing	95
II-3.2.3 3D-Einstellungen	96
II-3.2.4 globale Randbedingungen und Parameter	97
II-3.3 Modellreihen	99
II-3.3.1 Modellreihe mit reiner Konduktion	99
II-3.3.2 Modellreihe Konduktion bei einem 3-Schicht-Modell	101
II-3.3.3 Modellreihe Konduktion mit Wärmeeintragsänderungen	102
II-3.3.4 Modellreihe 3-Schicht-Modell mit Grundwasserfluss	103
II-3.4 Ergebnisse der Modellreihen	106
II-3.4.1 Modellreihe mit reiner Konduktion	106
II-3.4.2 Modellreihe Konduktion bei einem 3-Schicht-Modell	118
II-3.4.3 Modellreihe Konduktion mit Wärmeeintragsänderungen	124
II-3.4.4 Modellreihe 3-Schicht-Modell mit Grundwasserfluss	129
II-3.5 Kontrollmodellreihen mit verfeinertem Meshing	138
II-4. Vergleich der Ergebnisse	149
II-4.1 Modellreihe mit reiner Konduktion	149
II-4.2 Modellreihe Konduktion bei einem 3-Schicht-Modell	149
II-4.3 Modellreihe Konduktion mit Wärmeeintragsänderungen	150
II-4.3.1 Theoretische Lösung mit schwankender Wärmezufuhr	150
II-4.3.2 Lösung des Wärmezufuhrproblems über das Relaxationsverhalten	156
II-4.4 Modellreihe 3-Schicht-Modell mit Grundwasserfluss	158
II-5. Diskussion der Modellierungsergebnisse	161
Zusammenfassung Abschnitt I und Abschnitt II	163
Literatur	167

#### Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Rohtemperaturdaten des Vergleichs zwischen TRT- und LWL-Messungen (Dateninhaber: Stadtverwaltung Speyer)
- Anhang 2: Matlab Skripte

Die Rohdaten zu den Modellierungen in Abschnitt II befinden sich auf einer der Druckversion der Arbeit beiliegenden Daten-DVDr. Enthalten sind u.a.:

- Modellfiles der eTRT-Modellreihen "eTRT\_04" bis "eTRT\_07"
- Modellfiles der eTRT-Kontroll-Modellreihen "eTRT\_04.1\_c1-12"
- Modellfiles der eTRT-Kontroll-Modellreihen "eTRT\_03.1\_c1-7"
- Temperaturdaten der eTRT-Modellreihen "eTRT\_04" bis "eTRT\_07"
- Temperaturdaten der eTRT-Kontroll-Modellreihen "eTRT\_04.1\_c1-12"
- Temperaturdaten der eTRT-Kontroll-Modellreihen "eTRT\_03.1\_c1-7"
- Abbildungen der Modellierungen
- Dateien der erstellten Matlab Skripte

## Abbildungsverzeichnis

#### Abschnitt I

Kapitel I-Ei	nleitung:	
Abb. I-0.1	Die Nutzung oberflächennaher Geothermie (Agentur für Erneuerbare Energie)	S. 7
Abb. I-0.2	Unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlicher Bohrtiefe	S. 9

#### Kapitel I-2:

Abb. I-2.1	Profil aus der GK25 von Rheinland-Pfalz, Blatt 6512 Kaiserslautern	S. 13
Abb. I-2.2	Schichtenprofil der Erdwärmesondenbohrungen in Kaiserslautern (Terra Therm GmbH)	S. 15
Abb. I-2.3	Aufbauschema eines Thermal Response Test (GEHLIN 2002)	S. 16
Abb. I-2.4	Erdwärmesondenfeld der Firma Wipotec mit 40 eingebrachten Doppel-U-Sonden	S. 21
Abb. I-2.5	Die optische Rückstreuung (ERBAŞ et al. 1999) und Abbildung eines LWL-Hybridkabels	S. 22
Abb. I-2.6	Tiefenprofil der ungestörten Bodentemperatur der Sonden S4, S8, S10 & S12	S. 23
Abb. I-2.7	Messaufbau des eTRT	S. 24
Abb. I-2.8	Tiefenabhängige, absolute Temperaturen der Sonden S4, S8, S10 & S12	S. 26
Abb. I-2.9	Temperaturverlauf [°C] der einzelnen Tiefenabschnitte über die logarithmische Zeit	S. 27
Abb. I-2.10	Tiefenabhängige Wärmeleitfähigkeiten der Sonden S4, S8, S10 & S12	S. 28
Abb. I-2.11	Abbildungen des geklüfteten und ungeklüfteten Bereichs im Bohrloch der Sonde S12	S. 30
Abb. I-2.12	Vergleich der eTRT-Ergebnisse mit Grundwasserströmungsmessungen (PHREALOG)	S. 35

### Kapitel I-3:

Abb. I-3.1	Jahresuntergrundtemperaturverlauf aller Sonden, 01.12.2008 - 30.11.2009	S. 38
Abb. I-3.2	Jahresuntergrundtemperaturverlauf der Sonden in Gebrauch, 01.12.2008 - 30.11.2009	S. 39
Abb. I-3.3	Jahressoletemperaturverlauf des Sondenfeldes, 01.12.2008 - 30.11.2009	S. 39
Abb. I-3.4	Vergleich von Jahresuntergrund- und Jahressoletemperatur, 01.12.2008 - 30.11.2009_	S. 40
Abb. I-3.5	Skizze eines wärmedurchströmten Körpers	S. 41
Abb. I-3.6	Temperaturverlauf während der Heizphase, 19.01.2009 - 09.02.2009	S. 42
Abb. I-3.7	Temperaturverlauf während der Kühlphase, 27.07.2009 - 17.08.2009	S. 42
Abb. I-3.8	Temperaturverlauf der Sonden S10 & S15 in einer Tiefe von 50 Metern, Heizphase	S. 43
Abb. I-3.9	Temperaturverlauf der Sonden S10 & S15 in einer Tiefe von 100 Metern, Heizphase	S. 43
Abb. I-3.10	Temperaturverlauf der Sonden S8 & S12 in einer Tiefe von 50 Metern, Kühlphase	S. 44
Abb. I-3.11	Temperaturverlauf der Sonden S8 & S12 in einer Tiefe von 100 Metern, Kühlphase	S. 44

#### Kapitel I-4:

Abb. I-4.1	Kältefahnen einer Erdwärmesonde bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten	S. 45
Abb. I-4.2	Dreidimensionales Temperaturmodell mit drei Erdwärmesonden und Grundwasserfluss	S. 47
Abb. I-4.3	Temperaturisolinie bei 10,3°C. Schrägansicht	S. 47
Abb. I-4.4	Temperaturisolinie bei 10,3°C. Seitenansicht	S. 47
Abb. I-4.5	Vier Simulationen der Untergrundtemperaturen bei unterschiedlicher Dauer	S. 52
Abb. I-4.6	Drei Simulationen der Untergrundtemperaturen bei variabler Fließgeschwindigkeit	S. 54
Abb. I-4.7	Drei Simulationen der Untergrundtemperaturen bei variabler Fließgeschwindigkeit	S. 54
Abb. I-4.8	Vier Simulationen der Untergrundtemperaturen bei variablem Wärmeeintrag	S. 55
Abb. I-4.9	Zwei Simulationen der Untergrundtemperaturen bei variablem Wärmeeintrag	S. 55

Abb. I-4.10	Rechteckanordnung des EWS-Feldes	S. 57
Abb. I-4.11	Versetzte Sondenanordnung des EWS-Feldes	S. 59
Abb. I-4.12	Monatliche Temperaturentwicklung des Trägerfluids im Jahr 50 nach Inbetriebnahme	S. 61
Abb. I-4.13	Die jährlichen minimalen und maximalen Monats-Temperaturen des Trägerfluids	S. 65
Abb. I-4.14	Monatliche Temperaturentwicklung des Trägerfluids im Jahr 50 nach Inbetriebnahme	S. 65

#### Abschnitt II

## Kapitel II-1:

Abb. II-1.1	Die optische Rückstreuung (ERBAş et al. 1999) und Abbildung eines LWL-Hybridkabels	S. 76
Abb. II-1.2	Schematischer Aufbau eines LWL-Hybridkabels und Pig-Tail für DTS-Messungen	S. 77
Abb. II-1.3	Messaufbau des eTRT	S. 78

## Kapitel II-2:

Abb. II-2.1	Temperaturanstiegskurven	der LWL-Messungen und der	TRT-Messungen	S. 85
-------------	--------------------------	---------------------------	---------------	-------

## Kapitel II-3:

Abb. II-3.1	Modellgeometrie von Gesamtmodell, Sondennahfeld und Sondenquerschnitt	S. 93
Abb. II-3.2	Schema des Sondenquerschnitts	S. 94
Abb. II-3.3	Modellpositionen des LWL-Kabels innerhalb des Bohrlochs der eTRT-Modelle	S. 95
Abb. II-3.4	Meshing für Modellposition 1	S. 96
Abb. II-3.5	Aufbau von Slices und Layern bei Feflow	S. 96
Abb. II-3.6	Sinusförmige Variation des Wärmeeintrags von Modells "eTRT_06-7"	S. 103
Abb. II-3.7	Ausbreitung der Temperatur von Modell "eTRT_04-1.1" nach 3 Tagen Erhitzung	S. 107
Abb. II-3.8	Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-1.1 bis 1.6	S. 109
Abb. II-3.9	Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-2.1 bis 2.6	S. 110
Abb. II-3.10	Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-3.1 bis 3.6	S. 111
Abb. II-3.11	Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-4.1 bis 4.6	S. 112
Abb. II-3.12	Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-5.1 bis 5.6	S. 113
Abb. II-3.13	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-1.1 bis 1.6	S. 115
Abb. II-3.14	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-2.1 bis 2.6	S. 115
Abb. II-3.15	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-3.1 bis 3.6	S. 116
Abb. II-3.16	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-4.1 bis 4.6	S. 116
Abb. II-3.17	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-5.1 bis 5.6	S. 117
Abb. II-3.18	Verteilung der berechneten und der den Modellen vorgegebenen Wärmeleitfähigkeiten	S. 117
Abb. II-3.19	Ergebnisse der Modelle eTRT_05-1 auf Slice 02, 08 und 14	S. 120
Abb. II-3.20	Ergebnisse der Modelle eTRT_05-2 auf Slice 02, 08 und 14	S. 121
Abb. II-3.21	Ergebnisse der Modelle eTRT_05-3 auf Slice 02, 08 und 14	S. 122
Abb. II-3.22	Wärmeleitfähigkeits-Tiefen-Diagramm der Modelle eTRT_05-1, 2 und 3	S. 124
Abb. II-3.23	Ergebnisse der Modelle eTRT_06-1, 2 und 3	S. 125
Abb. II-3.24	Ergebnisse der Modelle eTRT_06-4, 5 und 6	S. 126
Abb. II-3.25	Ergebnisse der Modelle eTRT_06-7 und 8	S. 127
Abb. II-3.26	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_06-1 bis 6	S. 128

Abb. II-3.27	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_06-7 und 8	S. 128
Abb. II-3.28	Ergebnisse der Modelle eTRT_07-1 auf Slice 02, 08 und 14	S. 130
Abb. II-3.29	Ergebnisse der Modelle eTRT_07-2 auf Slice 02, 08 und 14	S. 131
Abb. II-3.30	Ergebnisse der Modelle eTRT_07-3 auf Slice 02, 08 und 14	S. 132
Abb. II-3.31	Ergebnisse der Modelle eTRT_07-4 auf Slice 02, 08 und 14	S. 133
Abb. II-3.32	Ergebnisse der Modelle eTRT_07-5 auf Slice 02, 08 und 14	S. 134
Abb. II-3.33	Wärmeleitfähigkeits-Tiefen-Diagramm der Modelle eTRT_07-1 bis 5	S. 137
Abb. II-3.34	Modellgeometrie des normalen Meshs der Messreihen eTRT_04 bis eTRT_07	S. 140
Abb. II-3.35	Modellgeometrie des Meshs GruidBuilder fein	S. 140
Abb. II-3.36	Modellgeometrie des Meshs Triangle fein 2	S. 141
Abb. II-3.37	Modellgeometrie des Meshs Triangle fein 4	S. 141
Abb. II-3.38	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-4.1c0 bis c7	S. 144
Abb. II-3.39	Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-3.1c0 bis c7	S. 145
Abb. II-3.40	Konvergenzplot der Modellreihe eTRT_04-4.1c	S. 146

## Kapitel II-4:

Abb. II-4.1	Darstellung der Temperaturänderung $4\pi\lambda T_b^{q}/q_1$ als Funktion der Zeit $\alpha t/r_b^2$	S. 152
Abb. II-4.2	Temperaturkurve von Modell eTRT_06-7 mit Abklingkurve (zwischen Tag 3 und 8)	S. 155
Abb. II-4.3	Darstellung der Auswertung nach dem Relaxationsverfahren für Modell eTRT_06-7	S. 157

#### Tabellenverzeichnis

### Abschnitt I

#### Kapitel I-2:

Tab. I-2.1	Wärmeleitfähigkeit, vol. Wärmekapazität und Wärmeentzugsleistung (aus VDI 4640)	S. 15
Tab. I-2.2	Die ungestörte Bodentemperatur für einige deutsche Städte (nach EED 2.0)	S. 16
Tab. I-2.3	Ergebnisse des TRT (Bericht Lohr Consult)	S. 19
Tab. I-2.4	Standardabweichung von $T_0$ und die ungestörte Bodentemperatur der Sonden $T_{0mean}$	S. 22
Tab. I-2.5	Über den Messzeitraum gemittelte Heizleistung pro Meter Kabellänge	S. 25
Tab. I-2.6	Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes im Bereich der Sonden	S. 31
Kapitel I-3:		

Tab. I-3.1	Schaltungsmodus der Sonden während der	Temperaturüberwachungsperiode	S. 37
		. en perata abernaciangepeneae	••••

## Kapitel I-4:

Tab. I-4.1	Modellierte Wärmeentnahmeleistungen der Erdwärmesonden bei zwei Betriebsmodi	S. 48
Tab. I-4.2	Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden im alternierenden Modellierungsmodus	S. 49
Tab. I-4.3	Abschätzung der Kältefahnenlänge von Modell 1 bis 6	S. 50
Tab. I-4.4	Kältefahnenlängen von Modell 1 bis 6	S. 51
Tab. I-4.5	Kältefahnenlängen im Vergleich	S. 52
Tab. I-4.6	Heiz- und Kühlbedarf sowie der daraus berechnete Wärme- bzw. Kälteentzug	S. 58
Tab. I-4.7	Durchschnittliche monatliche Soletemperatur	S. 61
Tab. I-4.8	Bestimmung der Sondenlänge mit Hilfe von Entzugsleistungen nach VDI 4640, Blatt 2_	S. 62
Tab. I-4.9	Wärmeentzug der Planungsgrundlage und der real benötigte Wärmeentzug	S. 63
Tab. I-4.10	Kälteentzug der Planungsgrundlage und der real benötigte Kälteentzug	S. 63

### Abschnitt II

## Kapitel II-3:

Tab. II-3.1	Geometrie des Sondenquerschnitts	S. 94
Tab. II-3.2	Globale Modellparameter	S. 97
Tab. II-3.3	Wärmeleitfähigkeitskombinationen des Gesteins und des Verpressmaterials	S. 100
Tab. II-3.4	ModelInamen der Modellreihe eTRT_04	S. 100
Tab. II-3.5	Modellnamen der Modellreihe eTRT_05	S. 101
Tab. II-3.6	Änderung des Wärmeeintrags bezüglich des Ausgangsmodells "eTRT_04-1.1"	S. 102
Tab. II-3.7	Hydraulic Head Boundary Condition-Verteilung der Modellreihe eTRT_07	S. 105
Tab. II-3.8	Flow Parameter und Filtergeschwindigkeiten der Modellreihe eTRT_07	S. 105
Tab. II-3.9	Reichweite der Temperaturausbreitung	S. 107
Tab. II-3.10	Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung Modellreihe eTRT_04	S. 108
Tab. II-3.11	Mittlere Abweichung der Wärmeleitfähigkeiten bei verschiedenen Modellpositionen	S. 118
Tab. II-3.12	Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_05-1 bis 3	S. 123
Tab. II-3.13	Wärmeleitfähigkeiten der Slices 7 und 10 von Modell eTRT_05-1 und 3	S. 123
Tab. II-3.14	Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung Modellreihe eTRT_06	S. 129
Tab. II-3.15	Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_07-1 bis 5 am linken, unteren Glasfaserkabel	S. 135

Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_07-1 bis 5 am rechten, oberen Glasfaserkabel	S. 136
Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse, $I = r_0$	S. 138
Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse, I nach FOWLER 2000	S. 138
Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c und eTRT_04-3.1c	S. 139
Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung der Kontrollmodellierungen	S. 143
Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c4 bis c12	S. 146
	Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_07-1 bis 5 am rechten, oberen Glasfaserkabel Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse, I = r <sub>0</sub> Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse, I nach FOWLER 2000 Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c und eTRT_04-3.1c Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung der Kontrollmodellierungen Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c4 bis c12

### Kapitel II-4:

Tab. II-4.1	Fehler zur exakten Lösung bei unterschiedlichen $lpha t/r_b^2$	S. 153
Tab. II-4.2	Wärmeleitfähigkeit von Modell eTRT_06-7 berechnet mit dem Relaxationsverfahren	S. 157

## Symbol- und Gleichungsverzeichnis

### Abschnitt I

Gle	Gleichung I-2.1 bis I-2.5:		
	$T_{\mathrm{f}}$	mittlere Fluidtemperatur [°C]	
	Ż	Heizleistung [W]	
	λ	Wärmeleitfähigkeit Untergrund [W/(m K)]	
	Н	Tiefe der EWS [m]	
	t	Zeit [s]	
	α	Temperaturleitfähigkeit [m²/s]	
	$ ho c_p$	volumetrische Wärmekapazität Untergrund [J/(m <sup>3</sup> K)]	
	r <sub>0</sub>	Bohrlochradius [m]	
	γ	Euler-Mascheroni-Konstante (0,5772)	
	$R_b$	thermischer Bohrlochwiderstand [(m K)/W]	
	Ts	Temperatur ungestörter Untergrund [°C]	
Gle	ichung	I-3.1:	S. 40
	Ż	Wärmeleistung [W]	
	λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	
	Δx	Abstand zwischen x1 und x2 [m]	
	А	wärmedurchströmte Fläche [m <sup>2</sup> ]	
	$\Delta T$	Temperaturdifferenz am Punkt x1 und x2	
Gle	ichung	I-4.1 bis I-4.2:	S. 49-50
	Va	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]	
	Vf	Filtergeschwindigkeit [m/s]	
	φ	Porosität [-]	
	$\dot{V}$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]	
	А	Grundwasserquerschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]	
	R	Retardationsfaktor [-]	
	$\rho_s c_s$	volumetrische Wärmekapazität Gestein [J/(m <sup>3</sup> K)]	
	$\rho_f c_f$	volumetrische Wärmekapazität Fluid [J/(m <sup>3</sup> K)]	
	1	Länge der Kältefahne [m]	
	t	Zeit [s]	
	$F_L$	Wärmeentnahmeleistung pro Länge [W/m]	
	$D_{t}$	transversaler Wärmedispersionskoeffizient [m <sup>2</sup> /s]	
	$\Delta T_{x}$	Differenz zur Hintergrundtemperatur [K]	
	$\lambda_{total}$	Wärmeleitfähigkeit Gestein & Fluid [W/(m K)]	
	$\alpha_{\rm t}$	transversale Dispersivität [m]	

#### Abschnitt II

leichung II	-1.1 bis II-1.3:	S. 79-80
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	
$\dot{Q_L}$	Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]	
m	Steigung der Regressionsgeraden durch die Werte im Auswertebereich [-]	
n	Anzahl Temperaturdaten im Auswertebereich [-]	
ti	Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]	
$\overline{\ln(t)}$	arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte im Auswertebereich [-]	
$T_i$	Temperatur i der Glasfaser [°C]	
T	arithmetisches Mittel der Glasfaser-Temperaturwerte [°C]	
r <sub>0</sub>	Bohrlochradius [m]	
α	Temperaturleitfähigkeit ( $\alpha = \lambda/(\rho c_p)$ ) [m <sup>2</sup> /s]	
$ ho c_p$	volumetrische Wärmekapazität [J/(m <sup>3</sup> K)]	
r	Radius der Temperaturfront [m]	
t	Dauer der konstanten Erhitzung [s]	
φ	Porosität [-]	
th	Dauer des Aufheizvorgangs [s]	
$\overline{\ln(\frac{t}{t-t_h})}$	arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte im Auswertebereich [-]	

### Gleichung II-1.4 bis II-1.6: S. 81

Pe	Péclet-Zahl [-]
Re	Reynolds-Zahl [-]
Pr	Prandtl-Zahl [-]
$\lambda_{kond}$	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein [W/(m K)]
$\lambda_{total}$	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein + advektiver Anteil durch Grundwasserfluss [W/(m K)]
1	charakteristische Länge [m]
v	Fließgeschwindigkeit Grundwasser [m/s]
ρ	Dichte Grundwasser [kg/m <sup>3</sup> ]
Cp	spezifische Wärmekapazität Grundwasser [J/(kg K)]

 Gleichung II-2.1:
 S. 84

 m Steigung der Regressionsgeraden durch die Werte im Auswertebereich [-]

 ti Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]

  $\overline{\ln(t)}$  arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte [-]

 Ti Temperatur i der Glasfaser [°C]

  $\overline{T}$  arithmetisches Mittel der Glasfaser-Temperaturwerte [°C]

Gleici	hung II	-3.1 bis II-3.10: S. 87-91
	S <sub>0</sub>	spezifischer Speicherkoeffizient (Kompressibilität) [m <sup>-1</sup> ]
	h	Hydraulic Head [m]
	t	Zeit [s]
	$q_{\mathrm{i}}{}^{\mathrm{f}}$	Vektor der Darcy Geschwindigkeit des Fluids [m/s]
	Xi	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
	$Q_{ ho}$	Quellen-/Senkenfunktion des Fluids für Massen ( $Q_C$ ), und Wärmetransport ( $Q_T$ ) (DIERSCH 2005)
	Qeb	Term der erweiterten Boussinesq-Approximation (DIERSCH 2005)
	φ	Porosität [-]
	$\rho^{\rm f}$	Dichte des Fluids [kg/m <sup>3</sup> ]
	ρs	Dichte der Festphase [kg/m <sup>3</sup> ]
	Cf	spezifische Wärmekapazität des Fluids [J/(kg K)]
	Cs	spezifische Wärmekapazität der Festphase [J/(kg K)]
	Т	Temperatur [°C]
	T <sub>0</sub>	Referenztemperatur [°C]
	$\lambda_{ij}$	Tensor hydrodynamischer Thermodispersion [W/(m K)]
	K <sub>ij</sub>	Tensor hydraulischer Konduktivität [m/s]
	$\mathbf{k}_{ij}$	Tensor hydraulischer Permeabilität [m²]
	ej	Gravitations-Einheitsvektor (e <sub>j</sub> =-g <sub>j</sub> /g) [-]
	g	Gravitationsbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
	fμ	konstitutive Viskositäts-Verhältnisfunktion [-]
	$\boldsymbol{\mu}^{f}$	dynamische Viskosität des Fluids [Ns/m²]
	$h_{i^{R}} \\$	fester Randbedingungswert für den Hydraulic Head [m]
	$q_{n_h}$	normaler Darcy Fluss des Fluids [m/d]
	$q_{\mathrm{h}}{}^{\mathrm{R}}$	fester Randbedingungswert für den Darcy Fluss in oder aus dem Modell [m/d]
	$\Phi_{\rm h}$	Fluid-Transfer-Koeffizient [d <sup>-1</sup> ]
	$h_2^R$	fester Randbedingungswert für den Hydraulic Head [m]
	$Q_{\rho^{W}}$	Quellenfunktion [m <sup>3</sup> /d]
	$Q_1{}^w \\$	fester Randbedingungswert für den Wasserzu- oder -abstrom [m³/d]
	$T_{i}{}^{R} \\$	fester Randbedingungswert für die Temperatur [°C]
	$q_{n_T}$	normaler Wärmefluss [J/m²/d]
	$\mathbf{q}_{\mathrm{T}^{\mathrm{R}}}$	fester Randbedingungswert für den Wärmefluss in oder aus dem Modell [J/m²/d]
	$\Phi_{\mathrm{T}}$	Wärme-Transfer-Koeffizient [J/m²/K/d]
	$T_3^R$	fester Randbedingungswert für die Temperatur [°C]
	$Q_{T^W} \\$	Wärmequellenfunktion [J/d]
	$Q_1{}^w \\$	fester Randbedingungswert für den Wärmezu- oder -abstrom [J/d]
	P <sub>total</sub>	Gesamtparameter ( $\lambda$ oder $\rho c_p$ ) [W/(m K) oder J/(m <sup>3</sup> K)]
	P <sub>fluid</sub>	Fluidparameter ( $\lambda$ oder $\rho c_p$ ) [W/(m K) oder J/(m <sup>3</sup> K)]
	$P_{solid}$	Gesteinsparameter ( $\lambda$ oder $\rho c_p$ ) [W/(m K) oder J/(m <sup>3</sup> K)]
	φ	Porosität [-]

			_	
Gleic	hung II-	3.11 bis II-3.13:	S.	104
	V	Durchflussrate [m <sup>3</sup> /s]		
	$\mathbf{k}_{\mathrm{f}}$	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]		
	F	durchströmte Fläche [m <sup>2</sup> ]		
	i	hydraulischer Gradient [-]		
	h	Druckhöhenunterschied [m]		
	1	Länge der Fließstrecke [m]		
	Vf	Filtergeschwindigkeit [m/s]		
Gleic	hung II-	4.1 bis II-4.7:	S.	150-156
	Τ <sup>q</sup>	Temperatur [K]		
	r	Radius [m]		
	t	Zeit [s]		
	q	Wärmefluss [W/m]		
	λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]		
	r <sub>b</sub>	Bohrlochradius [m]		
	α	Temperaturleitfähigkeit [m²/s]		
	J <sub>0</sub> (u), J <sub>1</sub>	(u) Bessel Funktion erster Ordnung		
	Y <sub>0</sub> (u), Y <sub>1</sub>	(u) Bessel-Funktion zweiter Ordnung		
	K <sub>v</sub> (x)	modifizierte Bessel-, bzw. MacDonald-Funktion		
	Γ(k)	Gamma-Funktion, $\Gamma(k)$ entspricht (k-1)! (ABRAMOWITZ & STEGUN 1964)		
	$T_{\mathrm{f}}$	Temperatur Fluid [K]		
	$\mathbf{q}_{\mathbf{k}}$	konstanter Wärmefluss [W/m]		
	γ	Euler-Mascheroni-Konstante [-]		
	R <sub>b</sub>	thermischer Bohrlochwiderstand [(m K)/W]		

 $T_{s}$ 

 $\dot{Q_L}$ 

th

 $T_{b}$ 

th

 $Q_{total}$ 

Temperatur ungestörter Untergrund [°C]

ungestörte Temperatur der Glasfaser [°C]

eingebrachte Gesamtwärmemenge [J/m]

Dauer des Aufheizvorgangs [s]

Dauer des Aufheizvorgangs [s]

Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]

#### Kurzfassung

Die oberflächennahe Geothermie leistet im Bereich der Nutzung regenerativer Wärme einen wichtigen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz. Um die technische Nutzung oberflächennaher Geothermie zu optimieren und Risiken zu minimieren, ist die Kenntnis der Beschaffenheit des geologischen Untergrundes ausschlaggebend. Die Bestimmung von Untergrundparametern, wie z.B. der Wärmeleitfähigkeit der erbohrten Gesteine, ist eine zentrale Herausforderung an die Planer von Erdwärmesondenanlagen, um Unsicherheiten in der Planungsgrundlage von oberflächennahen Geothermieprojekten zu minimieren.

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in zwei Abschnitte: Abschnitt I befasst sich mit der praktischen Qualitätssicherung an einem Beispielobjekt, Abschnitt II mit der Überprüfung einer neuen Messmethode zur Ermittlung von tiefenaufgelösten Wärmeleitfähigkeiten bei Erdwärmesonden mittels numerischer Modellierung.

In Abschnitt I zeigte sich, dass der enhanced Thermal Response Test (eTRT) ein wirksames Werkzeug zur Bestimmung tiefenaufgelöster Wärmeleitfähigkeiten bei Erdwärmesonden ist und überdies dazu beitragen kann, unverpresste, sowie von Grundwasser durchströmte Bereiche im Untergrund der Erdwärmesonde festzustellen.

Eine Temperaturüberwachung des Erdwärmesondenfeldes im ersten Betriebsjahr zeigte keine gegenseitige Beeinflussung einzelner Sonden. Mittels numerischer Modelle konnte gezeigt werden, dass Beeinflussungsmaxima von Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung, sowie von der Dauer des Wärmeentzugs abhängig sind und die nicht zu erkennende Beeinflussung benachbarter Sonden alle drei Gründe als Ursache haben kann.

Die Dimensionierung des Erdwärmesondenfeldes wurde mittels zweier unterschiedlicher Modellierungsprogramme durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigte, dass sie nur unwesentlich voneinander abweichen und die Effizienz des Feldes nicht beeinflussen. Der Vergleich zwischen dem geplanten und dem tatsächlichem Wärmebedarf des ersten Betriebsjahres ergab eine Abweichung von ca. 35%. Dies zeigt, dass die Nutzungsparameter (Wärme-, Kältebedarf, etc.) die Effizienz der Anlage maßgeblich beeinflussen können.

In Abschnitt II wurde der eTRT mittels numerischer Modellierung auf seine Reproduzierbarkeit hin überprüft. Bei einem rein konduktiven Wärmetransport im Untergrund zeigte sich, dass die Ergebnisse der berechneten Wärmeleitfähigkeiten sehr gut mit den im Modell vorgegebenen Wärmeleitfähigkeiten übereinstimmen. Selbst unter ungünstigen Bedingungen betrug die maximale Abweichung lediglich ca. 6% vom zu erwartenden Wert. Auch die vertikale Auflösung von Gesteinsschichten mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten gelingt bei den Modellierungen sehr gut. Die Detektion von grundwasserdurchflossenen Schichten ist in den Modellen gut abbildbar und es zeigt sich eine große Abhängigkeit zwischen der Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der Grundwasserfließgeschwindigkeit.

Problematisch bleibt die auch bereits bei Feldversuchen festgestellte hohe Abhängigkeit des Tests von einer konstanten Wärmezufuhr (konstante elektrische Spannung). Die Modelle, die sich mit Abfällen, bzw. Anstiegen der Wärmezufuhr, sowie fluktuierendem Wärmeeintrag befassten, liefern in der Modellierung ohne Nachbearbeitung keine brauchbaren Ergebnisse. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit über das Relaxationsverhalten des Untergrundes liefert jedoch auch bei Wärmeeintragsschwankungen hinreichend genaue Ergebnisse. Die mathematische Nachbearbeitung von fehlerhaften Temperaturkurven bietet zusätzlich einen Einstiegspunkt für weiterführende Forschung.

#### Abstract

Shallow geothermal energy plays a major role in the field of regenerative energy utilization, thereby making a significant contribution to the protection of climate and environment. To optimize the technical utilization of shallow geothermal district heating and to minimize uncertainties in the planning criteria, knowledge of the local geology is crucial. The determination of underground parameters, such as the thermal conductivity of the intersected rocks, is a central challenge for the planners of borehole heat exchangers (BHE).

This dissertation is divided into two main chapters: chapter I deals with the practical quality control at an example site. Chapter II describes the numerical testing of a new measuring method that determines depth dependent thermal conductivities for borehole heat exchangers.

In chapter I it was shown, that the enhanced thermal response test (eTRT) is a powerful tool for the determination of depth dependent thermal conductivities of BHEs. It can furthermore help to point out ungrouted zones as well as areas that are characterized by groundwater flow.

Temperature monitoring of the BHE-field during the first operating year has shown no mutual influence between single BHEs. With numerical modeling it has been shown, that influence maxima are dependent on flow velocity and flow direction, as well as the duration of the heat withdrawal. The observed lack of influence between the heat exchangers can be caused by the three parameters mentioned above.

The dimensioning of the BHE-field has been carried out using two different modeling programs. A comparison of the results showed, that they produce only insignificant differences which do not influence the efficiency of the field. The comparison between the results of the planned and the real heat demand of the first operating year showed a deviation of about 35%. This demonstrates that the utilization parameters such as heat or cooling demand can have a crucial effect on the efficiency of the facility.

In chapter II numerical modeling has been used to test the reproducibility of the eTRT. It has been shown that the calculated results are consistent with the given thermal conductivities of the models, when there is only conductive heat transport in the underground. Even under unfavorable conditions the maximum deviation from the expected value did not exceed 6%. The vertical resolution of rock layers with different thermal conductivities did show a good reproducibility as well. It was also shown that the method is capable of detecting layers with groundwater flow. A high dependency between the increase of effective thermal conductivity and groundwater flow velocity has been observed.

The models as well as observations from field experiments have shown that a stable heat supply (constant voltage) during the test is crucial. The models that contained an increase or a decrease as well as a fluctuation of the heat supply, provide no useful results without post-processing of the data. Only the evaluation of the thermal conductivity with the thermal relaxation behavior provides suitable results when the heat supply is fluctuating. The mathematical post-processing of flawed temperature data presents an entry point for further research.

Dissertationsschrift

Bestimmung thermischer Untergrundparameter in Erdwärmesondenfeldern und Evaluierung tiefenaufgelöster Thermal Response Tests durch thermohydraulische Modellierungen

#### Einleitung

Die Gewinnung von im Untergrund gespeicherter, geothermischer Wärme ist heute eine weltweit verbreitete Technologie zur Erzeugung von Heizwärme und elektrischer Energie. Da der natürliche geothermische Wärmefluss aus dem Erdinneren den weltweiten jährlichen Energiebedarf deutlich übersteigt (CLAUSER 2006, STOBER & BUCHER 2012), bietet die Geothermie ein enormes theoretisches Potential zur regenerativen Energieversorgung.

Die Nutzung von im Erdreich gespeicherter Wärme wird in zwei Hauptgruppen unterteilt. Zum einen die **Tiefe Geothermie**, bei der die Wärme meist über Tiefbohrungen mit mehr als 1.000 m Tiefe erschlossen wird und je nach Temperaturniveau der geförderten Fluide zur Strom- und Wärmeerzeugung verwendet werden kann. Zum anderen die **Oberflächennahe Geothermie**, deren geförderte Wärme ausschließlich zu Heiz- aber auch Kühlzwecken verwendet wird. Die Aufteilung beider Gruppen erfolgt über die Tiefe der Gewinnung. Geschieht die Förderung der Wärme aus Tiefenbereichen größer 400 m, so spricht man von Tiefer, liegt der Förderbereich darüber, so spricht man von Oberflächennaher Geothermie.

Das durch Oberflächennahe Geothermie erschlossene Temperaturniveau bewegt sich in Deutschland in den meisten Fällen in einem Temperaturbereich, der für eine direkte Heizung von Gebäuden ungeeignet ist (ca. 8-15°C). Aus diesem Grund wird die erschlossene Wärme mittels einer Wärmepumpe auf ein erhöhtes Temperaturniveau gehoben, welches für den Betrieb von Niedertemperatur-Heizsystemen (Fuß- / Wandbodenheizung, Flächenheizung, etc.) ausreichend ist (ca. 35-45°C). Im Bereich der Oberflächennahe Geothermie gibt es wiederum eine zweifache Einteilung der Wärmegewinnungssysteme. Man teilt sie in **offene** und **geschlossene Systeme** ein.

Als offene Systeme bezeichnet man die Nutzung von geothermischer Wärme durch die Direktentnahme eines Wärmeträgermediums aus dem Untergrund. In den meisten Fällen ist dies natürlich im Untergrund vorhandenes Grundwasser, welches über einen Entnahmebrunnen gefördert und nach der thermischen Nutzung durch einen zweiten Brunnen wieder in den Untergrund reinfiltriert wird. Es gibt jedoch auch Sondersysteme, bei denen z.B. Gruben- oder Drainagewässer zur Wärmegewinnung verwendet werden. Die Grubenwassernutzung nimmt unter dem Begriff der Oberflächennahen Geothermie zusätzlich eine Sonderstellung ein, da sie über das untertägige Grubengebäude oft auch Wärme aus Tiefen größer 400 m erschließen kann.

Als ein **geschlossenes System** bezeichnet man ein im Untergrund eingebrachtes Wärmetauschersystem, bei dem das Wärmeträgermedium nicht in direktem Kontakt zum

Umgebungsgestein steht. Zumeist handelt es sich bei den Wärmetauschern um in den Untergrund eingebrachte Rohre, die mit einem flüssigen Wärmeträgermedium gefüllt sind. Das Medium besteht meist aus einem Wasser / Frostschutzmittelgemisch, welches landläufig auch Sole genannt wird (nicht zu verwechseln mit dem hydrogeologischen Begriff der Sole). Wird dem Wärmeträgermedium an der Erdoberfläche z.B. durch eine Wärmepumpe Wärme entnommen, kann durch Zirkulation der im Rohr befindlichen Sole, die Umgebungswärme des Untergrundes durch das entstandene Temperaturgefälle dem Untergrund entzogen werden. Die im Untergrund erwärmte Sole wird mittels einer Zirkulationspumpe zur Wärmepumpe gebracht, dort durch die Entnahme der zwischengespeicherten Wärme herabgekühlt und wieder in den Sondenrücklauf reinjiziert. Der so entstandene Kreislaufprozess ermöglicht die Nutzung der geothermischen Wärme. Beispiele für geschlossene Systeme sind z.B. Erdwärmekollektoren und -körbe, Energiepfähle und Grabenkollektoren, sowie **Erdwärmesonden**.

**Erdwärmesonden** sind die in Deutschland gebräuchlichsten Systeme zum Entzug oberflächennaher Erdwärme. Sie bestehen aus einem vertikal in den Untergrund eingebrachten Wärmetauscher, der sich meist aus 2 bis 4, über U-Stücke am unteren Ende miteinander verbundenen Kunststoff-Rohren zusammensetzt. Diese sind über an die Sondenendstücke angebrachte Vertikalrohre mit dem Heizsystem des zu beheizenden (oder zu kühlenden) Objektes verbunden. Bei Erdwärmesonden sind in den meisten Fällen Wärmepumpen zur Nutzung der geförderten Wärme unerlässlich.

Die vorliegende Dissertationsschrift befasst sich in der Hauptsache mit der Nutzung von geothermischer Wärme durch Erdwärmesonden, sowie der Bestimmung von thermischen Untergrundparametern, die zur richtigen Bemessung von Erdwärmesondenanlagen benötigt werden. Hierfür wurden vor Ort-Messungen, als auch verschiedene Arten der Modellierung zur Beschreibung und Verifizierung der erhaltenen Daten durchgeführt.

**Abschnitt I** der vorliegenden Schrift ist dem ersten Teil des Abschlussberichts einer wissenschaftlichen Studie entnommen (MALM et al. 2010), die vom Autor als Mitarbeiter des Instituts für Geothermisches Ressourcenmanagement (igem) durchgeführt und vom Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz, Rheinland-Pfalz (MUFV, RLP) beauftragt und finanziert wurde. Der vorliegende Abschnitt I wurde gegenüber dem am 23.06.2010 beim Ministerium eingereichten Bericht (MALM et al. 2010) im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift überarbeitet und geringfügig erweitert.

Innerhalb des Forschungsprojekts wurden verschiedene Arten der Erfassung von Untergrundparametern an einem Erdwärmesondenfeld in Kaiserslautern getestet und die

Bemessung des Feldes sowie verschiedene Untergrundeigenschaften mit analytischen und numerischen Methoden überprüft. Abschnitt I stellt das ursprüngliche Dissertationsprojekt dar, welches zur Erweiterung der Dissertationsschrift um die Arbeiten im folgenden Abschnitt II ergänzt wurde. Der restliche, vom Autor nicht verfasste Teil des Forschungsberichtes kann in MALM et al. (2010) nachgelesen werden.

Abschnitt II der Arbeit bezieht sich auf eine ausgewählte Methode zur Ermittlung der Untergrundwärmeleitfähigkeit, dem bereits in Abschnitt I beschriebenen und innerhalb des Projektes durchgeführten enhanced Thermal Response Test (eTRT). Numerische Modellierungen sollen hier die Anwendbarkeit des Tests, sowie die möglichen Fehlerquellen und die Genauigkeit der Messergebnisse überprüfen und eventuelle Schwachstellen in Versuchsaufbau und Datenauswertung aufzeigen. Direktvergleiche zwischen verschiedenen Thermal Response Test-Arten sollen zusätzlich Hinweise zur Übertragbarkeit der erhaltenen Werte liefern.

#### Datenerhebung

Die im Rahmen der Dissertationsschrift bearbeiteten Daten wurden, falls nicht anders vermerkt, vom Autor im Rahmen seiner Tätigkeit für das Institut für geothermisches Ressourcenmanagement (igem) erhoben und dem Autor für die Erstellung seiner Dissertationsschrift überlassen. Mit der Durchführung des Thermal Response Tests aus Kapitel II-2 wurde das hydrogeologische Fachbüro André Voutta Grundwasserhydraulik (www.avoutta.de) vom igem im Rahmen eines Projektes für die Stadtverwaltung Speyer beauftragt. Die Daten wurden dem Autor vom Dateninhaber (Stadtverwaltung Speyer) zur Verwendung in seiner Dissertationsschrift freundlich überlassen.

#### **Abschnitt I der Dissertation**

Abschlussbericht

"Qualitätssicherung bei Erdwärmesondenfeldern für Heiz- und Kühlzwecke und Überprüfung ihrer Effizienz im Ziel 2 Gebiet"

#### Teil A: Das Erdwärmesondenfeld

Auftraggeber: Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz

Institut für Geothermisches Ressourcenmanagement (igem) Berlinstr. 107a · 55411 Bingen am Rhein · www.igem-energie.de

Dipl. Geol. Florian Malm

Einreichung und Veröffentlichung des Berichts am 23.06.2010 Überarbeitung und Ergänzung im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift
## Einleitung und Überblick Abschnitt I

Die Nutzung von oberflächennaher Geothermie ist ein fester Bestandteil der regenerativen Energiegewinnung in Deutschland. Neben anderen erdgebundenen Wärmepumpensystemen wie Erdwärmekollektoren, -registern und -körben sowie einer thermischen Grundwasserdirektnutzung mittels Brunnenbohrungen, sind Erdwärmesonden die in Deutschland am weitesten verbreitete Anwendung zur Erschließung von im Untergrund vorhandener Wärme (Abb. I-0.1). Erdwärmesonden bieten gegenüber anderen alternativen Energiequellen wie etwa der Solarthermie oder der Biomasse den Vorteil, dass sie sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen verwendet werden können.



Abbildung I-0.1 Die Nutzung oberflächennaher Geothermie (Agentur für Erneuerbare Energie).

Der Wärmeaustausch mit dem Untergrund erfolgt über Bohrungen in denen durch Rohre ein Wärmeträgermedium (Sole) gepumpt wird. Die Wärme des umgebenden Gesteins kann auf diese Weise von der Sole aufgenommen und mittels einer Umwälzpumpe nach oben zur Haustechnik befördert werden. Das so entstandene geschlossene Wärmetauschersystem im Untergrund wird, im Fall der Wärmegewinnung, mit einer Wärmepumpenanlage verbunden. Innerhalb der Wärmepumpe zirkuliert ein Arbeitsmittel, welches der Sole über einen Wärmetauscher (Verdampfer) Wärme entzieht und sie auf einem höheren Temperaturniveau über einen zweiten Wärmetauscher (Verflüssiger) an das Heizkörperfluid abgibt. Richtig ausgelegte Erdwärmesondenanlagen können so bis zu vier Teile Wärmeenergie aus einem Teil elektrischer Energie erzeugen.

Für die Errichtung einer Erdwärmesondenanlage, müssen zuerst Bohrungen in den Untergrund abgeteuft werden. Die Erdwärmesonden bestehen in der Regel aus vier HDPE-Rohren (Doppel-U-Sonde), von denen jeweils zwei am unteren Ende über U-Stücke

miteinander verbundenen sind. Diese Rohre werden in die Bohrlöcher abgelassen und dann mit einer Spezial-Zement-Mischung im Bohrloch verpresst. Die Verpressung ermöglicht eine gute thermische Anbindung der Rohre an den umgebenden Untergrund und ist auch für die Abdichtung der Bohrungen nötig. Sie verhindert damit einen hydraulischen Kurzschluss zwischen mehreren, übereinanderliegenden Grundwasserleitern und ist somit entscheidend für den Grundwasserschutz am Standort.

Um einzelne Erdwärmesonden und kleinere Erdwärmesondenanlagen zu planen, kann die Auslegung der Anlage entsprechend den Vorgaben der VDI 4640, Blatt 2 erfolgen. Diese Richtlinie gibt für bestimmte Gesteine und Vollbenutzungsdauern der Wärmepumpe Wärmeentzugsleistungen an, die bei der Bestimmung der jeweiligen Erdwärmesondenlänge helfen. Allerdings geben diese Tabellenwerte lediglich eine Richtgröße, bzw. -länge an, die mit einer relativ hohen Ungenauigkeit behaftet ist. Für kleinere Anlagen bietet diese Methode jedoch genügend Sicherheitsspielraum, um Fehldimensionierungen zu vermeiden. Bei Anlagen ab einer Gesamtleistung von 30 kW müssen jedoch spezielle Softwareprogramme verwendet werden, welche die Auslegung der Anlage detaillierter betrachten können.

Für solche Modellierungsprogramme (z.B. Earth Energy Designer, EWS, etc.), die auf einer analytischen Berechnungsmethode von Sondenlängen und Soletemperaturen beruhen, ist die Wahl der Eingabeparameter sehr wichtig. Vor allem die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und des Verfüllmaterials, die ungestörte Bodentemperatur, der örtliche geothermische Wärmefluss (bzw. der geothermische Gradient), die monatlich aufgeteilte Heiz- und Kühlarbeit der Anlage (Wärme- und Kältebedarf des Objektes) sowie die vorgesehene Benutzungsdauer des Erdwärmesondensystems sind von großer Bedeutung. Während der monatliche Wärme- und Kältebedarf (inkl. Spitzenlast) von den Planern der Haustechnik ermittelt werden muss und die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials vom Hersteller angegeben wird, ist eine schnelle Angabe der übrigen Parameter meist problematisch. Der geothermale Wärmefluss kann Standardkartenwerken (HURTER & CERMAK & RYBACH 1979, HUBER & PAHUD 1999b, HAENEL 2002. POLLACK et al. 2002) entnommen werden. Allerdings sind in diesen Karten keine kleinräumigen Unterschiede im lokalen Wärmefluss berücksichtigt. Für die Wärmeleitfähigkeiten des Gesteins können Tabellen zwar ungefähre Werte für gewisse Gesteinstypen angeben (z.B. aus der VDI 4640, Blatt 1), die Gegebenheiten vor Ort werden jedoch damit nicht mit ausreichender Genauigkeit abgebildet. Die ungestörte Bodentemperatur lässt sich mit der örtlichen durchschnittlichen Jahreslufttemperatur abschätzen, liefert jedoch ebenfalls keinen exakten, dem Untergrund entsprechenden Wert.

Um die angesprochenen Datenunsicherheiten zu minimieren, sind vor-Ort-Messungen der angesprochenen Parameter für größere Erdwärmesondenprojekte unerlässlich. Thermal Response Tests (TRTs) haben sich in den letzten zehn Jahren als nützliche Werkzeuge zur Bestimmung der in-situ-Wärmeleitfähigkeit und der ungestörten Untergrundtemperatur herausgestellt. Sie basieren auf der mathematischen Auswertung des zeitlichen Temperaturverlaufs, der sich bei einem konstantem Wärmeeintrag durch die in der Sonde zirkulierende Sole ergibt. Ein TRT liefert somit eine über die Bohrlänge der Sonde gemittelte Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und den Bohrlochwiderstand, der den Wärmeübertragungswiderstand zwischen Sole und dem umgebenden Gestein angibt.

Diese Messmethoden reichen jedoch nicht aus, um die Wärmetransportprozesse im Untergrund in ihrer Gänze zu beschreiben. Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten des Gesteins können im Tiefenverlauf einer Bohrung je nach Geologie vor Ort durchaus beträchtlich variieren und somit zu Problemen bei der Bewertung der durch einen TRT erhaltenen Ergebnisse führen. Im Fall einer Untergrundgeologie mit einem thermisch schlecht leitenden Gestein im oberen Bereich der Bohrung sowie einem thermisch gut leitenden Gestein im unteren Bereich (Abb. I-0.2), gelten die Messwerte einer herkömmlichen Wärmeleitfähigkeitsmessung (TRT) nur für diese spezielle Bohrtiefe. Wird nun aufgrund der guten Gesamtwärmeleitfähigkeitswerte die Bohrtiefe weiterer Sonden verringert, so sinkt auch die effektive Gesamtwärmeleitfähigkeit dieser Sonden, da in diesem Fall der Anteil des thermisch schlecht leitenden Gesteins im oberen Bereich anteilig überwiegt. Eine Anpassung der Werte für die effektive Gesamtwärmeleitfähigkeit bei geringerer Bohrtiefe kann bis zu einem gewissen Maße über eine reine Interpretation des geologischen Profils der Bohrung und



über hinzugezogene tabellarische Wärmeleitfähigkeitswerte für verschiedene Gesteinstypen erfolgen. Allerdings handelt es sich dabei lediglich um Abschätzungen, deren Qualität von der Genauigkeit des geologischen Profils abhängt und bei denen z.B. feine Variationen der Wärmeleitfähigkeiten über die Tiefe nicht erfasst werden können.

Abbildung I-0.2 Gleiche Messmethode, gleiches Gestein, unterschiedliche vom TRT ermittelte Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlicher Bohrtiefe (Beispielwerte). Ein weiterer Unsicherheitsfaktor bei der Planung von Erdwärmesondenanlagen ist das evtl. im Untergrund vorhandene fließende Grundwasser. Umströmt Grundwasser eine Erdwärmesonde, so führt es ständig thermisch unbelastetes Wasser mit sich und verringert somit die Auskühlung des näheren Untergrundes. Je nach Fließgeschwindigkeit und Porenraum ist diese Regenerierung des Untergrundes stärker oder schwächer ausgeprägt. Diese eigentlich für die Effizienz einer einzelnen Erdwärmesonde positive Auswirkung kann jedoch bei Erdwärmesondenfeldern (EWS-Feldern) zu einer Verstärkung der gegenseitigen Beeinflussung der Sonden führen, wenn die Sonden hintereinander im Abstrom des Grundwassers liegen. Im schlechtesten Fall kann dies zu einer verstärkten Auskühlung der Umgebung einzelner Sonden und damit zu einer Erniedrigung der Effizienz führen. Bei großen Erdwärmesondenfeldern ist es daher ratsam, sowohl die Wärmeleitfähigkeiten aller durchteufter Gesteinsschichten als auch die Auswirkungen des lokalen Grundwasserstroms zu untersuchen.

Des Weiteren ist bekannt, dass die bei der Planung eines Erdwärmesondenfeldes berechnete und der Dimensionierung zugrunde gelegte Jahresarbeitszahl der Erdwärmesondenanlage (Verhältnis des Wärmebedarfs zu dem für Umwälz- und Wärmepumpe aufgewandten Stromverbrauch; JAZ 4 = 1 Teil Strom, 4 Teile Wärme  $\rightarrow$  3 Teile Wärme aus dem Untergrund) teils erheblich von den realen Jahresarbeitszahlen einer Anlage im Gebrauch abweicht. Auch verschiedene Regelungsarten der Haustechnik können einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz von Erdwärmesondenanlagen besitzen.

Das im Folgenden vorgestellte Forschungsprojekt zielte darauf ab, die genannten Unsicherheiten bei der Planung und dem Ausbau eines Erdwärmesondenfeldes mit neuen, innovativen Methoden zu minimieren und Verbesserungen für einen optimalen Ausbau einer Erdwärmesondenanlage zu definieren. Der Arbeitsbereich erstreckte sich sowohl über das Gebiet der Gebäudetechnik, als auch über die Bestimmung verschiedener geologischer und hydrogeologischer Parameter. Der Bericht des Forschungsprojektes wurde in zwei Teilbereiche getrennt. Der erdgekoppelte **Teil A** ist im Folgenden aufgeführt. **Teil B**, der sich mit der Haustechnik befasst, findet kann im Originalbericht (MALM et al. 2010) nachgeschlagen werden.

Die Erkenntnisse bezüglich Projektablauf und Durchführung der im Folgenden vorgelegten Auswertung im Hinblick auf weitere Projekte, wurden in einer Vorschlagsliste dargestellt und zusammengefasst (MALM et al. 2010). Aus dieser Liste lassen sich Handlungsabläufe für zukünftige Projekte ableiten.

### I-1 Übersicht über das Forschungsprojekt

Von 2007 bis 2008 wurde auf dem Firmengelände der Firma Wipotec eine weitere, an das Bestandsgebäude angegliederte Werkshalle gebaut. Die Firma Wipotec in Kaiserslautern ist ein Hersteller innovativer Wägetechnik im Industrie- und Handelssektor. Der Produktionsschwerpunkt liegt bei präzisen Hochgeschwindigkeitswägesystemen und intelligenter Wägetechnik. Die Entwicklung neuer Techniken und individueller Lösungen für Industriefragen steht seit über 20 Jahren im Vordergrund der Firmenphilosophie. Die Nutzung oberflächennaher Geothermie wurde bei der Werkserweiterung als bevorzugtes System zur Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs der Werkshalle gewählt. Nach vorangegangener Dimensionierung wurde ein Erdwärmesondenfeld mit insgesamt 40 Sonden à 130 m Tiefe gebaut. Zwei Wärmepumpen vervollständigen das System.

An diesem Standort beauftragte das Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (MUFV) das Institut für Geothermisches Ressourcenmanagement (igem) mit dem Forschungsvorhaben "Qualitätssicherung bei Erdwärmesondenfeldern für Heiz- und Kühlzwecke und Überprüfung ihrer Effizienz im Ziel 2 Gebiet".

Ziel des Projektes ist unter anderem die Erstellung einer Energiebilanz eines Erdwärmesondenfeldes bei vermuteter Grundwasserströmung in einem geklüfteten Aquifer. Das Projekt beinhaltet eine Dimensionierung des Erdwärmesondenfeldes nach VDI-Norm sowie nach verschiedenen analytischen Verfahren. Diese Modelle sollen miteinander verglichen und nach ihren Ein- und Ausgabeparametern bewertet werden. Gleichzeitig sollen die Eingabeparameter durch direkte Messungen im Versuchsfeld bestimmt werden. Hierzu wurde neben einem tiefenaufgelösten enhanced Thermal Response Test (eTRT) eine Langzeitüberwachung sowohl der Temperaturen im Untergrund (faseroptische Messungen) als auch der Energieströme der Wärmepumpenanlage angelegt.

Ein weiteres Ziel des Projektes war eine Einschätzung des Grundwassereinflusses auf das fertige Erdwärmesondenfeld. Die hierfür entscheidenden Parameter, wie tiefenabhängige Wärmeleitfähigkeit und Grundwasserfließeigenschaften, wurden in-situ bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden bewertet und mit numerischen Modellrechnungen verglichen.

Eine Beschreibung der Haustechnik sowie des integrierten Zählerkonzeptes zur Bestimmung der Arbeitszahlen und Optimierung des Betriebes der Anlage sowie die Auswertung der hausseitigen Feldüberwachung sind in **Teil B** des Originalberichtes (MALM et al. 2010) zusammengefasst.

Der folgende Bericht beschreibt die Methoden, die zur Bestimmung der benötigten Untergrundparameter angewendet wurden, sowie deren Ergebnisse und die damit zusammenhängenden Optimierungsmöglichkeiten für den laufenden Betrieb eines Erdwärmesondenfeldes. Die Ergebnisse einer Langzeittemperaturüberwachung des Untergrundes und numerischer Simulationen zeigen, dass fließendes Grundwasser nur unter speziellen Bedingungen größere, direkte Auswirkungen auf die Temperaturen der Nachbarsonden hat. Tiefenaufgelöste Wärmeleitfähigkeitsmessungen ergeben, dass Grundwasserfluss Auswirkungen auf die effektiven Wärmeleitfähigkeiten einzelner Sonden besitzt und deren Wärmeentzug verbessert. Es wird dargelegt, wie neue Möglichkeiten der Dimensionierung von großen Erdwärmesondenfeldern zu genaueren Ergebnissen der Sondenanzahl und -tiefe führen und dass neue, innovative Methoden zu einer Verbesserung der Planungssicherheit bei größeren erdgekoppelten Wärmepumpensystemen beitragen.

Der im Folgenden aufgeführte Projektablauf bezeichnet die wichtigsten zeitlichen Stationen der erdseitigen Anlagen- und Messtechnik. Angaben zum hausseitigen Projektablauf finden sich in Kapitel 10 von **Teil B** des Originalberichtes (MALM et al. 2010).

Frühjahr 2007	Bohrbeginn (Terra Therm)
Mai 2007	Thermal Response Test (Lohr Consult)
April-Juni 2007	$\label{eq:in-Situ} In-Situ \ Grundwasserflie \& geschwindigkeitsmessung \ (PHREALOG)$
Juli-August 2007	Einbau der Glasfaserkabel (igem)
Herbst 2007	Spleißen der Glasfaserkabel (igem)
Dezember 2007	Hausinstallation und erste Messung der Glasfaserkabel (igem)
März 2008	Installation der Wärmepumpen
20.0623.06.2008	Durchführung des ersten eTRT (igem)
29.0801.09.2008	Durchführung des zweiten eTRT (igem)
09.10.2008	Konfigurations- und Fasereinstellungen (Start Heizperiode) (igem)
01.12.2008	Start der Temperaturüberwachung (igem)
01.12.2009	Ende der Temperaturüberwachung (igem)

#### I-2. Erfassung der Untergrundeigenschaften

Um die Dimensionierung des Erdwärmesondenfeldes zu überprüfen und den Einfluss von Grundwasserströmung auf die Effizienz des Feldes zu erfassen, müssen die thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes hinreichend bekannt sein. Vor allem die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist als entscheidender Faktor besonders wichtig, aber auch die ungestörte Untergrundtemperatur, die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins, sowie effektive Fließgeschwindigkeiten und -richtungen müssen für das Forschungsvorhaben erfasst werden. Diese Parameter sind die Basis für alle weiterführenden Untersuchungen und daher für die Ergebnisse des Projektes unerlässlich.

#### I-2.1 Geologie und Hydrogeologie

Die Bohrungen im Untersuchungsgebiet haben in ihrem Tiefenverlauf die Trifels-Schichten und die Staufer Schichten des Buntsandsteins erbohrt (Abb. I-2.1). Die Trifels-Schichten setzen sich aus grob- bis mittelkörnigen, kieselig gebundenen Sandsteinen zusammen, die in einzelnen Lagen geröllführend sein können (KONRAD et al. 1985). Die Staufer Schichten, die den unteren Teil der erbohrten Bereiche bilden, setzen sich ebenfalls aus grob- bis

mittelkörnigen, teils geröllführenden Sandsteinen zusammen, die teils schluffig-tonig gebunden sind und in die Konglomerat- sowie Ton- und Schlufflinsen eingeschaltet sein können (KONRAD et al. 1985).

Abbildung I-2.1 Profil aus der geologischen Karte (GK25) von Rheinland-Pfalz, Blatt 6512 Kaiserslautern mit Legende und Profilschnitt (NW-SE). Die schwarze Linie im Profilschnitt zeigt die ungefähre Position und Tiefe der Erdwärmesonden im Untersuchungsgebiet.



Die Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes ist in den zwei erbohrten Schichten unterschiedlich. Während die Trifels-Schichten aufgrund ihres oft geringeren Anteils an Ton und Schluff insgesamt bessere Grundwasserleiter ergeben, sind die Staufer Schichten in vielen Bereichen aufgrund ihres höheren Ton- und Schluffanteils eher als Grundwasserhemmer zu betrachten (KONRAD et al. 1985). Die aus den Trifels-Schichten zufließenden

Grundwässer werden an der Grenze zu den Staufer Schichten häufig gestaut, was die Bedeutung dieser Grenze als Quellhorizont erhöht (KONRAD et al. 1985).

Insgesamt handelt es sich bei den erbohrten Schichten um Mischaquifere, die ein Fließen von Grundwasser sowohl in den porösen als auch in den geklüfteten Bereichen vorweisen. Die geklüfteten Bereiche sind in ihrer Durchlässigkeit in der Regel höher als in den porösen Bereichen. Die hydraulische Durchlässigkeit von Sandsteinen liegt im Allgemeinen bei  $k_f$ -Werten (Durchlässigkeitsbeiwerten) zwischen 10<sup>-4</sup> und 10<sup>-6</sup> m/s (KRAPP 1979).

## I-2.2 Beschreibung der thermischen Eigenschaften nach VDI 4640

Im Folgenden wird die Bestimmung der örtlichen thermischen Eigenschaften des Untergrundes nach VDI 4640 vorgestellt. Die VDI 4640 gibt für verschiedene Untergrundparameter Tabellen an, die eine grobe Bestimmung der jeweiligen Verhältnisse vor Ort ermöglichen.

## I-2.2.1 Die Gesteinswärmeleitfähigkeit

Die Richtlinie VDI 4640, Blatt 1 enthält für einige Gesteinstypen gemittelte Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten. Diese werden in der Regel für die Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen herangezogen, wenn keine Möglichkeit der Bestimmung dieser Parameter durch in-situ Versuche oder Labormessungen besteht.

Zur Bestimmung der Gesteinswärmeleitfähigkeiten nach VDI 4640 muss die Lithologie des Untergrundes bekannt sein. Eine Zuordnung der Lithologie kann anhand von Kartenwerken (Abb. I-2.1) und Archivdaten erfolgen, aber auch direkt vor Ort durch Probebohrungen aufgenommen werden. Von der ausführenden Bohrfirma Terra Therm wurde am 20.04.2007 ein Schichtenprofil aufgenommen (Abb. I-2.2). Das Profil zeigt analog zu den Daten aus der geologischen Karte (Abb. I-2.1) eine größtenteils homogene Gesteinsverteilung auf. Vorherrschend sind vor allem Sandsteine, die im unteren Bereich teils in geröllführende Sandsteine und Konglomerate übergehen. Die Gesteinswärmeleitfähigkeiten werden entsprechend der Gesteinsverteilung ebenfalls relativ homogen über die Tiefe verteilt sein. Laut Tabelle I-2.1 kann eine gemittelte Gesteinswärmeleitfähigkeit von ca. 2,3 W/(m K) für den erbohrten Gesteinsverband herangezogen werden.

Die VDI 4640, Blatt 2 gibt für Anlagen mit einer Heizleistung kleiner als 30 kW eine Tabelle mit spezifischen Entzugsleistungen an, nach der kleinere Anlagen dimensioniert werden können. Ein zusätzlich angegebenes Nomogramm kann bei der Dimensionierung ebenfalls helfen, es gilt jedoch nur bis zu einer maximalen Heizleistung von 10 kW. Wenn man die Tabelle I-2.1 mit den Entzugsleistungen für das Erdwärmesondenfeld in Kaiserslautern und den jährlichen Gesamtwärmeentzug der Anlage heranzieht, so kann man daraus die benötigte Gesamtlänge der Sonden berechnen (siehe Kapitel I-4.4).



Schichtenprofil Bohrung Wipotec GmbH Kaiserslautern (20.04.2007)

Tabelle I-2.1 Bandbreite der Wärmeleitfähigkeit und volumetrischen Wärmekapazität, sowie der theoretischen Wärmeentzugsleistung für Sandstein nach VDI 4640, Blatt 1, Wärmeentzugsleistung nach

Abbildung I-2.2 Schichtenprofil der

Kaiserslautern (Terra Therm GmbH).

	Sandstein (0-130 m)
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	1,5 – 5,1 (2,3)
Vol. Wärmekapazität [MJ/(m <sup>3</sup> K)]	1,6 – 2,8
Wärmeentzugsleistung [W/m]	55 – 80

VDI 4640, Blatt 2.

Zusätzliche Labormessungen an wassergesättigtem Probenmaterial der Trifels-Schichten im Untersuchungsgebiet ergaben für deren Wärmeleitfähigkeit Werte von ca. 2,7 W/(m K).

I-2.2.2 Die ungestörte Bodentemperatur

Die ungestörte Bodentemperatur wird häufig über die mittlere Jahreslufttemperatur des Standortes abgeschätzt. Einige Dimensionierungsprogramme für Erdwärmesonden wie EED (Earth Energy Designer) besitzen eine eigene Datenbank mit durchschnittlichen ungestörten Bodentemperaturen für verschiedene Standorte (Tab. I-2.2).

Tabelle I-2.2         Die ungestörte         Bodentemperatur
für einige deutsche Städte (nach EED Vers. 2.0).

Stadt	ungestörte
	Bodentemp. [°C]
Berlin	8.7
Bremen	9
Dresden	9
Düsseldorf	11
Frankfurt/M	8.9
Gießen	9
Hamburg	8.8
Karlsruhe	10.9
Köln	11
Leipzig	8.5
München	8.9
Nürnberg	8.8
Saarbrücken	9
Stuttgart	9.1

Der Deutsche Wetterdienst gibt als mittlere Jahreslufttemperatur für Kaiserslautern einen Wert von 9,4°C an, der als Richtwert für die zur Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern benötigten, ungestörten Bodentemperatur dienen kann.

## I-2.3 Die Bestimmung der Untergrundparameter mit dem Thermal Response Test

Ein konventioneller <u>Thermal Response Test</u> (GEHLIN 2002) wird zur Bestimmung verschiedener Untergrundparameter (Wärmeleitfähigkeit, Bohrlochwiderstand, ungestörte Untergrundtemperatur) verwendet und mittlerweile standardmäßig bei der Planung und

Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern eingesetzt. Der Test basiert auf der Zirkulation und gleichzeitigen Temperaturmessung von Soleflüssigkeit in den Rohren einer Erdwärmesonde mittels eines eigens dafür entwickelten Gerätes (Abb. I-2.3). Das Gerät besteht im Wesentlichen aus einer Umwälzpumpe, Temperaturfühlern am Vor- und Rücklauf, sowie einem Erhitzer.

> Abbildung I-2.3 Aufbauschema eines Thermal Response Test (GEHLIN 2002).



#### I-2.3.1 Ermittlung der Gesteinswärmeleitfähigkeit

Ein TRT wird an einer fertig ausgebauten und verpressten Erdwärmesonde durchgeführt (THOLEN & WALKER-HERTKORN 2008). Die Sole wird mit einer spezifischen Wärmeleistung erhitzt und die Sonde damit durchspült. Die Temperaturen in der Sole werden am Ein- und Auslauf der Sonde gemessen. Über die Kurve des Temperaturanstiegs der Sonde kann über die Linienquellentheorie nach folgender Formel eine über die Gesamtsondenlänge gemittelte Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden (nach HELLSTRÖM 1991, GEHLIN 1998 und GEHLIN 2002):

$$T_{f} = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \left[ ln\left(\frac{4\alpha t}{r_{0}^{2}}\right) - \gamma \right] + \frac{\dot{Q}}{H}R_{b} + T_{s} = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} ln(t) + \left[ \frac{\dot{Q}}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda} \left[ ln\left(\frac{4\alpha}{r_{0}^{2}}\right) - \gamma \right] + R_{b} \right) + T_{s} \right]$$
(I-2.1)

 $T_{\mathrm{f}}$ mittlere Fluidtemperatur [°C] Ò Heizleistung [W] Wärmeleitfähigkeit Untergrund [W/(m K)] λ Η Tiefe der EWS, bzw. Länge des Messabschnitts bei eTRTs [m] Zeit [s] t Temperaturleitfähigkeit [m²/s]  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_n}$ mit α volumetrische Wärmekapazität Untergrund [J/(m<sup>3</sup> K)] ρcp Bohrlochradius [m]  $\mathbf{r}_0$ Euler-Mascheroni-Konstante (0,5772...) γ thermischer Bohrlochwiderstand [(K m)/W]  $R_b$ Ts Temperatur ungestörter Untergrund [°C]

Die Gleichung beschreibt bei einer homogenen Umgebung eine Gerade mit der Steigung *m* und dem Achsenabschnitt *b*:

$$T_f = m \cdot \ln(t) + b \tag{I-2.2}$$

Hieraus folgt

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4\pi mH} \qquad (I-2.3) \qquad \text{und} \qquad R_b = \frac{(b-T_s)H}{\dot{Q}} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left( ln \left[ \frac{4\alpha}{r_0^2} \right] - \gamma \right) \qquad (I-2.4)$$

Da der Übergang von Sole zum Umgebungsgestein durch Bereiche mit teils unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten (Sondenrohr & Verfüllmaterial) erfolgt, ist Gleichung I-2.1 lediglich in bestimmten Zeitbereichen der Messung anwendbar. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes muss deshalb für die Auswertung der

erhaltenen Temperaturdaten ein Zeitbereich gewählt werden, in dem die eingebrachte Wärme bereits tief in das Umgebungsgestein eingedrungen ist. Deshalb werden für die Berechnung der Steigung *m* Temperaturabschnitte gewählt, die ein gewisses Zeitkriterium (Gleichung I-2.5) erfüllen und die durch eine möglichst geringe Schwankung der eingebrachten Heizleistung gekennzeichnet sind (GEHLIN 2002, HELLSTRÖM 1991).

$$t > \frac{5r_0^2}{\alpha} \tag{I-2.5}$$

## I-2.3.2 Ermittlung der ungestörten Bodentemperatur im Zuge eines TRT

Die ungestörte Bodentemperatur wird zu Beginn eines TRT durch eine Zirkulation der Sole ohne gleichzeitige Erhitzung bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass die gemessenen Temperaturen am Anfang der Zirkulation durch die noch nicht ausreichende Durchmischung der zirkulierenden Flüssigkeit beeinflusst sind. Deshalb sollten die Werte der ersten Minuten nicht als Richtwert für die ungestörte Bodentemperatur verwendet werden. Gleichzeitig gilt zu beachten, dass bei längerem Zirkulationspumpenbetrieb die Wärmeentwicklung der Pumpen das Ergebnis ebenfalls verfälscht. Je nach Länge der Sonde und der Pumpleistung liegt das Zeitfenster zur Bestimmung der ungestörten Bodentemperatur zwischen ca. 15 und 30 Minuten nach Einschalten der Zirkulationspumpe.

#### I-2.3.3 Ablauf der Messungen

Zwei solcher Thermal Response Tests wurden von der Firma Lohr Consult zwischen dem 08.05. und 11.05.2007 und dem 14.05. und 20.05.2007 durchgeführt. Der erste Test wurde an Sonde S9, der zweite an Sonde S38 durchgeführt.

Der erste Messdurchlauf hatte an zwei Tagen Einbrüche in der Temperaturkurve (09.05. und 10.05.2007), was auf einen starken Abfall der eingebrachten Heizleistung hindeutet. Es ist davon auszugehen, dass die Messergebnisse durch diese Zwischenfälle zu stark verfälscht sind, als dass sie zu einem Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten herangezogen werden könnten.

Der zweite Messdurchlauf (Bericht Lohr Consult) verlief, der Temperaturkurve nach zu urteilen, ohne Störungen und kann zu einer Bewertung herangezogen werden. Der Bericht sagt nichts über die Details der Berechnung wie die Wahl des Zeitabschnitts zur Bestimmung der Regressionsgeraden, die Bestimmung des Zeitkriteriums oder die Wahl des mathematischen Ansatzes aus. Eine Angabe der eingebrachten Heizleistung fehlt ebenfalls.

Die genauen Temperaturmessdaten sind nur in einer Graphik festgehalten und liegen dem Bericht nicht als Wertetabelle bei. Die ermittelte Wärmeleitfähigkeit, der Bohrlochwiderstand und die ungestörte Bodentemperatur sind in Tabelle I-2.3 festgehalten.

Tabelle I-2.3 Ergebnisse des TRT (Bericht Lohr Consult).

Temperatur des ungestörten Untergrundes [°C]	~ 10,8
Wärmeleitfähigkeit aus Messung [W/(m K)]	~ 6
Thermischer Bohrlochwiderstand [(m K)/W]	~ 0,08

# I-2.4 Neue Methoden zur tiefenaufgelösten Bestimmung der Untergrundparameter

Um die für die oberflächennahe Geothermie wichtigen Untergrundparameter zu bestimmen, stehen mittlerweile neben dem herkömmlichen TRT mehrere erweiterte Methoden zur Verfügung, die die Wärmeleitfähigkeiten und ungestörten Untergrundtemperaturen bestimmen können. Einige dieser Methoden ermöglichen eine tiefenaufgelöste Bestimmung dieser Parameter und können somit ein genaueres Bild über die Eigenschaften des Untergrundes liefern. Hierbei gibt es mehrere Methoden, die jeweils ihre Vor- und Nachteile besitzen.

# A TRT mit Temperaturprofilaufzeichnung

Eine zusätzliche Temperaturprofilaufzeichnung vor und jeweils in bestimmten Abständen nach einem herkömmlichen TRT zeigt Bereiche, in denen eine höhere effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes vorherrscht. Diese Bereiche kühlen nach dem Wärmeeintrag des TRT schneller aus und lassen sich so qualitativ beschreiben. Vergleicht man diese Ergebnisse mit vorhandenen Bohrprofilen und Tabellenwerten für verschiedene Gesteinswärmeleitfähigkeiten, so kann man eine grobe tiefenaufgelöste Abschätzung der Untergrundwärmeleitfähigkeiten vornehmen. Die ungestörte Bodentemperatur kann man der vor dem TRT durchgeführten Temperaturprofilmessung direkt entnehmen.

Diese Methode ist recht einfach mittels einer Temperaturmesssonde durchzuführen und benötigt zusätzlich lediglich das Bohrprofil der Erdwärmesonde und Tabellenwerte für Wärmeleitfähigkeiten (z.B. VDI 4640). Allerdings ist sie auch recht ungenau, da sie direkt von der Interpretation der Daten durch den durchführenden Geologen abhängt und kann damit tiefenaufgelöste Wärmeleitfähigkeiten nur qualitativ abbilden.

# B TRT mit Temperaturprofilaufzeichnung mittels der NIMO-T-Methode

Der Thermal Response Test mittels der NIMO-T-Methode setzt sich zusammen aus einem herkömmlichen TRT, einer Temperaturprofilaufzeichnung mit der NIMO-T-Messsonde und

einer numerischen Nachbearbeitung der erhaltenen Temperaturdaten, die eine quantitative, tiefenaufgelöste Wärmeleitfähigkeitsbestimmung ermöglicht (FORRER et al. 2008).

Die NIMO-T-Messsonde besteht aus einem kabellosen Schwimmer, der über seine Dichte eine spezifische Absinkgeschwindigkeit innerhalb eines Sondenrohres besitzt. Während des Absinkens werden permanent Druck und Temperatur gemessen, um jedem Temperaturwert über den Druck eine Tiefe zuweisen zu können. Nachdem die Sonde am Fuß der Sonde angekommen ist, wird sie mit einer am anderen Rohrende angebrachten Pumpe aus dem Rohr ausgespült. Die Sonde hat den Vorteil, dass sie kabellos ist und somit besser aus dem dünnen Sondenrohr entfernt werden kann. Auch entsteht so keine Verdrängung von Wasser durch das Kabel, was sonst zu Fluidbewegungen innerhalb des Sondenrohres führt und die Messergebnisse leicht verfälscht.

Die so erhaltenen Temperaturwerte vor der TRT-Messung und zu bestimmten Zeitpunkten in der thermischen Regenerationsphase (z.B. 1, 24 und 72 Stunden nach dem TRT), werden anschließend mittels numerischer Simulationen rückgerechnet. Die Wärmeleitfähigkeiten der Umgebung werden hierbei solange angepasst, bis die so erhaltenen Temperaturen der modellierten Sole mit den gemessenen übereinstimmen. Auf diese Art und Weise sind sowohl tiefenaufgelöste Wärmeleitfähigkeiten als auch Hinweise auf Grundwasserfluss in einzelnen Tiefenlagen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ bestimmbar.

Ein gewisser Nachteil der Methode ist die über die Sonde ungleichmäßig in den Untergrund eingebrachte Wärme. Befinden sich im oberen Bereich der Sonde Abschnitte mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit, so geht über diese Schichten schon ein Großteil der Wärme in den Untergrund. Die mit dem TRT eingebrachte Gesamtwärmemenge kann somit für eine genaue Berechnung nicht gleichmäßig über die Tiefe der Sonde aufgeteilt werden. Dies führt zu einer Verfälschung der Wärmeleitfähigkeitswerte, wenn die für die Berechnung herangezogene Wärmeleistung nicht an den Tiefenbereich angepasst wird.

# C eTRT mittels der Glasfasermesstechnik

Der enhanced Thermal Response Test (eTRT oder auch eGRT genannt) beruht auf der direkten, tiefenaufgelösten Temperaturmessung an Glasfaserkabeln während gleichzeitiger und gleichmäßiger Erhitzung des Untergrundes (DORNSTÄDTER et al. 2008). Die so erhaltenen Messergebnisse können direkt zur tiefenaufgelösten Wärmeleitfähigkeitsberechnung herangezogen werden. Der Test wurde im Versuchsfeld durchgeführt und wird im Folgenden eingehend beschrieben.

#### I-2.4.1 Faseroptische Temperaturmessmethode

Zur Bestimmung der Untergrundparameter wurde an 8 der 40 Sonden ein Temperaturmesssystem angebracht, welches die Temperaturen des Untergrundes tiefenaufgelöst messen kann. Zu diesem Zweck werden Glasfaserkabel an der Wandung der betreffenden Sondenrohre angebracht und in einer Schleife zusammengeschaltet (Abb. I-2.4). Die in Reihe geschalteten Kabel bestehen aus jeweils vier Glasfasern und vier Kupferlitzen (Abb. I-2.5).



Abbildung I-2.4 Erdwärmesondenfeld der Firma Wipotec mit 40 eingebrachten Doppel-U-Sonden. Die schwarze Linie zeigt den Verlauf des eingebrachten Glasfaser-Hybridkabels in den Sonden. An den drei quadratisch markierten Sonden wurden in-situ Grundwasserfließbestimmungen durchgeführt. Die Farben geben den Schaltungsmodus der Sonden wieder (Tab. I-3.1, siehe S. 37).

Die faseroptische Temperaturmessmethode bedient sich der Raman-Rückstreuung, die entsteht, wenn die Photonen eines Lasers mit den Elektronen des amorphen Quarzes der Glasfaser interagieren. Das rückgestreute Licht teilt sich in drei spektrale Bänder auf, das Rayleigh-Band sowie das Stokes- und das Anti-Stokes-Band (Abb. I-2.5). Das Anti-Stokes-Band ist direkt von der temperaturbedingten Gitterschwingung der Glasmoleküle abhängig. Da das Stokes-Band nahezu keine Temperaturabhängigkeit aufweist, kann so aus dem Verhältnis zwischen Stokes- und Anti-Stokes-Band unter Berücksichtigung weiterer Materialparameter die absolute Temperatur der Glasfaser an jedem Punkt der Messstrecke berechnet werden (ERBAŞ et al. 1999). Der räumliche Abstand eines gemessenen Punktes von der Lichtquelle wird über die gemessene Laufzeit zwischen dem Impuls und der Rückstreuung berechnet. Der Fehler der Temperaturmessungen liegt je nach Einstellung des Messgerätes bei ca. 0,1 K, die maximale Ortsauflösung bei ca. 15 cm Länge.





**Abbildung I-2.5** Aufteilung der optischen Rückstreuung (ERBAŞ et al. 1999) und Abbildung eines Glasfaserhybridkabels. Die grüne Kabelhülse beinhaltet die vier Glasfasern, die unteren Kabelhülsen die vier Kupferlitzen.

#### I-2.4.1.1 Ermittlung der ungestörten Bodentemperatur im Zuge eines eTRT

Die ungestörte Bodentemperatur T<sub>0</sub> ist bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes nach der Linienquellentheorie, aber auch bei der Effizienz eines Erdwärmesondenfeldes im Betrieb eine der wichtigsten Einflussgrößen (SIGNORELLI 2004). Für einen eTRT ist es daher zwingend notwendig, die ungestörte Bodentemperatur jedes Tiefenabschnitts hinreichend genau zu bestimmen.

Die ungestörte Bodentemperatur T<sub>0</sub> wurde im Vorfeld des eTRT ortsaufgelöst bestimmt. Hierfür wurden am 29.08.2008 nach Installation des Temperaturmessgerätes die Temperaturen der Sonden S4, S8, S10 und S12 von 10:45 h bis 13:20 h aufgezeichnet (Abb. I-2.6). Von diesen insgesamt 94 Temperaturmesswerten dieses Zeitraums wurde für jeden Tiefenabschnitt der jeweiligen Sonde das arithmetische Temperaturmittel T<sub>0</sub> gebildet. Aus diesen ortsaufgelösten, ungestörten Bodentemperaturen ließ sich eine über die Sonde gemittelte, ungestörte Bodentemperatur T<sub>0mean</sub> bestimmen (Tab. I-2.4). Die Maximalwerte der in jedem Tiefenabschnitt der jeweiligen Sonde erhaltenen Standardabweichungen von T<sub>0</sub> sind ebenfalls in Tabelle I-2.4 eingetragen. Die durchschnittliche Lufttemperatur am 29.08.2008 betrug ca. 15,8°C, die Lufttemperatur zwischen 10:00 und 13:00h ca. 18,5°C (Daten nach Auskunft des Deutschen Wetterdienstes).

**Tabelle I-2.4** Standardabweichung der ungestörten Bodentemperaturen  $T_0$  der Sonden, sowie die über die gesamte Tiefe der Sonde gemittelte ungestörte Bodentemperatur  $T_{0mean}$ .

	S4	S8	S10	S12
Max. Standardabweichung von $T_0$ [°C]	0,07	0,07	0,09	0,07
Durchschnittliche, ungestörte Bodentemperatur T <sub>0mean</sub> [°C]	11,89	11,92	11,23	11,65



Abbildung I-2.6 Tiefenprofil der ungestörten Bodentemperatur der Sonden S4, S8, S10 & S12 aufgelöst in 10 Zeitschritten.

## I-2.4.1.2 Enhanced Thermal Response Test (eTRT)

Ein enhanced Thermal Response Test (eTRT) zur Ermittlung tiefenaufgelöster Untergrundwärmeleitfähigkeiten wird mittels eines an der Wandung der Sondenrohre befestigten Glasfaser-Hybridkabels durchgeführt (DORNSTÄDTER et al. 2008, MALM 2009, MALM & DECKERT 2013). Das Kabel besteht aus jeweils vier Glasfasern und vier Kupferlitzen (Abb. I-2.5). Die Glasfasern werden an ein faseroptisches Temperaturmessgerät angeschlossen, welches über Laserimpulse die Temperaturen entlang der Kabelstrecke bestimmen kann.

Der Testaufbau ist ähnlich zum herkömmlichen Thermal Response Test (GEHLIN 2002). Allerdings erfolgt die für einen TRT erforderliche Wärmezuführung nicht über die Zirkulation von erwärmter Sole in den Sonden, sondern über das Anlegen einer elektrischen Spannung

an die vier Kupferlitzen des Kabels (Abb. I-2.7) wodurch Wärme freigesetzt wird. Die eingebrachte Heizleistung ist so für jeden Punkt entlang des Kabels gleich hoch. Die Temperaturen werden mittels der faseroptischen Messmethode entlang der gesamten Bohrlänge während der Aufheizung kontinuierlich gemessen. Auf diese Weise erhält man je nach eingestellter Ortsauflösung des Temperaturmessgerätes eine bestimmte Anzahl einzelner Segmente, die anhand des gemessenen Temperaturanstiegs bei der Erhitzung in eine effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes in der entsprechenden Tiefe umgerechnet werden können (DORNSTÄDTER et al. 2008).



Abbildung I-2.7 Messaufbau des eTRT.

Wie bei der Auswertung eines herkömmlichen TRTs kann über den zeitlichen Verlauf des Temperaturanstiegs für jeden einzelnen Messabschnitt der Sonde mit Hilfe der Kelvin'schen Linienquellentheorie eine über den Messabschnitt gemittelte Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden (Gleichung I-2.1). Von den insgesamt acht mit Glasfaserkabeln versehenen EW-Sonden wurden in den Sonden S4, S8, S10 und S12 ein eTRT durchgeführt.

#### I-2.4.1.2.1 Ablauf der Messungen

Der eTRT wurde am 29.08.2008 um 15:27 h gestartet. Die Heizleistung wurde mit einem externen Datenlogger minütlich aufgezeichnet und über den Messzeitraum gemittelt (Tab. I-2.5). Die Ortsauflösung der Temperaturmessungen betrug ca. 1 m. Die Zeit pro

Messdurchlauf beträgt bei den gewählten Frequenzeinstellungen ca. 106 s. Das Ende des eTRT war am 01.09.2008 um 10:02 h, 66:35 h nach Start der Messungen.

 Tabelle I-2.5 Über den Messzeitraum gemittelte Heizleistung pro Meter Kabellänge.

	Alle Sonden
Gemittelte Heizleistung pro Meter [W/m]	9,1

# I-2.4.1.2.2 Ermittlung der tiefenabhängigen Wärmeleitfähigkeit mit dem eTRT

Die Temperaturen nach dem Start des Versuchs wurden mit dem Temperaturmessgerät aufgezeichnet und gespeichert. Der Temperaturverlauf über die Sondentiefe ist in Abbildung I-2.8 in verschiedenen Zeitschritten aufgetragen. Zonen mit geringer effektiver Wärmeleitfähigkeit haben einen relativ hohen Temperaturanstieg, Zonen mit hoher effektiver Wärmeleitfähigkeit einen relativ niedrigen Temperaturanstieg im Verlauf der Messung.

Auffällig ist in dieser Abbildung der hohe Temperaturanstieg in den obersten 30 m aller vier Sonden (Abb. I-2.8). Dies bedeutet, dass dieser Bereich eine sehr geringe effektive Wärmeleitfähigkeit besitzt. Der ebenfalls in der Graphik eingetragene Bereich der wasserungesättigten Zone (Messungen der Firma PHREALOG in MALM et al. 2010) deckt sich auffällig gut mit eben diesem Bereich des hohen Temperaturanstiegs. Die Sonden S4 und S8 zeigen zusätzlich einen starken Abfall des Temperaturanstiegs im Tiefenbereich zwischen ca. 30 und 60 m (Abb. I-2.8). Dies deutet auf hohe effektive Wärmeleitfähigkeiten hin.

Zur Berechnung tiefenaufgelöster Wärmeleitfähigkeiten wurde aus dem Temperaturanstieg der aufgezeichneten Temperaturdaten entsprechend Kapitel I-2.3.1 ein Auswertebereich festgelegt. Die Zeit zwischen dem 30.08.2008 11:04 h und dem 01.09.2008 05:59 h eignet sich aufgrund geringer Spannungsschwankungen in diesem Zeitraum für eine Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten nach Kapitel I-2.3.1, Gleichung I-2.1.



tärkter Grundv

sättigte Zo

-T=0

T=2min

T=5min T=7min

T=10min

T=15min

T=20min

**-**T=61h



Tiefenabhängige Temperatur der Sonde S8

Tiefenabhängige Temperatur der Sonde S10 Tiefenabhängige Temperatur der Sonde S12 Temperatur [°C] Temperatur [°C] 10 15 20 25 30 35 40 10 15 20 25 30 35 40 0 0 < 20 20 Ungesättigte Zon Unge ättigte Zon T=0 T=2min 40 -T=0 40 T=5min T=2min T=7min T=5min T=10min T=7min T=15min T=10mi T=20min T=15mir T=30min T=20min Diefe 09 Tiefe 60 -T=1h T=30mir T=2h T=1h -T=61h T=2h 80 80 100 100 120 120 



0

20

40

Tiefe

80

100

120

IMA

Zu erkennen ist der starke Anstieg der gemessenen Temperaturen in den obersten 30 m Tiefe auch in Abbildung I-2.9, welche die Temperatur jedes Messpunkts des Kabelverlaufs von Sonde S12 über die Zeit aufgetragen darstellt.

Zu erkennen sind außer dem starken Temperaturanstieg auch zum Teil starke Unregelmäßigkeiten im Temperaturverlauf (Abb. I-2.9, roter Pfeil) und ein teilweises Abfallen der Temperaturen im hinteren Bereich der Messkurve (Abb. I-2.9, rote Gerade). Der schnelle Temperaturanstieg in den oberen Sondenabschnitten deutet auf sehr niedrige Wärmeleitfähigkeiten in diesen Bereichen hin. Bei sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeiten machen sich Schwankungen in der Heizleistung stärker bemerkbar. Daher wurden aus diesen Bereichen keine Wärmeleitfähigkeiten abgeleitet.

Die Ursache für die niedrigen Wärmeleitfähigkeiten im oberen Horizont könnte in einer mangelhaften Verpressung dieser Tiefenbereiche liegen. Die nachweislich durch die Bohrfirma ordnungsgemäß verpresste Verfüllsuspension könnte nach dem Erreichen der Erdoberfläche langsam durch Klüftungen des Gesteins im Untergrund abgesackt sein. Der Druck in dieser offenen "Suspensionssäule" könnte ausgereicht haben, um die Verfüllung bis auf Niveau des stehenden Grundwassers abgesenkt zu haben.



Abbildung I-2.9 Temperaturverlauf [°C] der einzelnen Tiefenabschnitte über die logarithmische Zeit (Abbildung GTC Kappelmeyer). Die Farbcodierung beschreibt die unterschiedlichen Messpunkte des Kabels. Der Farbverlauf ist von blau (entspricht dem Kabelanfang) über gelb und rot zu grün (entspricht dem Kabelende). Man sieht, dass die Farben der ersten 30 m am Anfang und am Ende des Kabels einen anormal starken Temperaturanstieg besitzen. Die Pfeile und die rote Linie zeigen Bereiche mit Unregelmäßigkeiten (roter Pfeil) bzw. negativer Steigung (rote Linie) der Kurve. Der Auswertebereich der Berechnung ist mit dem schwarzen Kasten angegeben.



Abbildung I-2.10 Tiefenabhängige Wärmeleitfähigkeiten der Sonden S4, S8, S10 & S12. Die obersten 30 m sind aufgrund einer mangelhaften Verpressung nicht auswertbar. Der sichtbare Achsenausschnitt von 20 W/(m K) wurde gewählt, da bei den Sonden S4 und S8 die Werte durch den Einfluss des Grundwassers den realistischen Rahmen für Gesteinswärmeleitfähigkeiten teils weit überschreiten (Spitze der berechneten Wärmeleitfähigkeit von S8 bei ca. 270 W/(m K), S4 bei ca. 38 W/(m K)). Die Wärmeleitfähigkeiten im Tiefenverlauf der einzelnen Sonden liegen in der Regel zwischen 2 und 3 W/(m K) (Abb. I-2.10). Bei den Sonden S4 und S8 zeigt sich jedoch ein starker Anstieg in den effektiven Wärmeleitfähigkeiten zwischen 30 und 65 m Tiefe (Abb. I-2.10). Dieser starke Anstieg der Wärmeleitfähigkeitskurve kann nicht durch eine lithologische Änderung des geologischen Tiefenprofils sondern nur über einen verstärkten Einfluss advektiven Grundwassertransports erklärt werden.

## I-2.4.2 in-situ Grundwasserströmungsmessungen

Die Bestimmung von Grundwasserfließgeschwindigkeiten und ihren Fließrichtungen wird in herkömmlicher Art und Weise durch Pegelstandsmessungen und Pumpversuche durchgeführt. Bei diesen Verfahren werden unterschiedliche Pegelstandshöhen im Gelände eingemessen und über Triangulation Grundwasserisolinien gezeichnet. Die Differenz der unterschiedlichen Pegelhöhen bezeichnet den hydraulischen Gradient, der zwischen diesen beiden Höhen herrscht. Durch Pumpversuche kann der Durchlässigkeitsbeiwert (k<sub>f</sub>-Wert) des Gesteins ermittelt werden. Sind beide Werte bekannt (k<sub>f</sub>-Wert und hydraulischer Gradient), so kann die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers zwischen zwei Punkten errechnet werden. Diese Methode ist bei einer kleinräumigen Betrachtung recht ungenau und kann auch nur bedingt für alle Tiefenbereiche einer Erdwärmesonde gelten.

Im Vorfeld der Fließgeschwindigkeitsmessungen wurden Kamerabefahrungen der Bohrlöcher durchgeführt, mittels derer man stark geklüftete von ungeklüfteten Zonen unterscheiden konnte (Abb. I-2.11). Aufgrund der Ergebnisse der Befahrung können anschließend die Positionen für eine Grundwasserfließbestimmung mittels der PHREALOG-Methode festgelegt werden. Ohne eine Kamerabefahrung kann es passieren, dass man die für eine Fließgeschwindigkeit interessanten Messtiefen übersieht und in den falschen Tiefen misst.

Um den direkten Einfluss des Grundwassers auf die Wärmeleitungseigenschaften des Untergrundes zu überprüfen, wurden an drei der Bohrungen vor dem Einbringen der Erdwärmesonden in-situ Grundwasserströmungsmessungen mit dem PHREALOG-System durchgeführt (SCHÖTTLER 2004). Dieses Messsystem basiert auf der optischen Erfassung von im Grundwasser mitgeführten Schwebstoffen im offenen Bohrloch. Die Transport-geschwindigkeit und -richtung der Schwebstoffe gibt hierbei Hinweise auf die Fließeigenschaften des Grundwassers (nach KLOTZ 1977). Eine statistische Auswertung der so über einen längeren Zeitraum gewonnenen Daten (in der Regel zwischen einer und drei Stunden) liefert genaue Werte über die Fließgeschwindigkeit und die Fließrichtung des

Grundwassers in der beobachteten Tiefe des Bohrlochs (Messungen der Firma PHREALOG in MALM et al. 2010).



Abbildung I-2.11 Geklüfteter (links) und ungeklüfteter (rechts) Bereich im Bohrloch der Sonde S12. Die Aufnahmen wurden jeweils in einer Tiefe von 50,52 m (links) und 47,40 m (rechts) gemacht.

Eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse der in-situ-Grundwasserfließbestimmungen aus dem Bericht der Firma PHREALOG (in MALM et al. 2010) ist im Folgenden noch einmal zusammengetragen.

# -S12 GW-Spiegel: 30,90 m uPOK

Fließrichtung:	34 m-36 m	WNW-SSE
	47 m-66 m	W-NNW
	70 m-90 m	N-NE
	-unterhalb 47	m generell Richtung N
Fließgeschwindigkeit	Formation:	~2,4·10 <sup>-6</sup> m/s
Fließgeschwindigkeit	Klüfte:	~2,7·10 <sup>-5</sup> m/s – 1,4·10 <sup>-4</sup> m/s

# -S23 GW-Spiegel: 30,66 m uPOK

Fließrichtung:	34 m-36 m	WNW-SSE
	47 m-66 m	W-NNW
	70 m-90 m	N-NE
	-unterhalb 47	7 m generell Richtung N
Fließgeschwindigke	it Formation:	~2,8·10 <sup>-6</sup> m/s
Fließgeschwindigke	it Klüfte:	~1,5·10 <sup>-4</sup> m/s

# -S29 GW-Spiegel: ca. 31 m uPOK (starker Wasserzutritt bei 10,20 m uPOK)

Fließrichtung:	70 m-90 m	N-NE
	-unterhalb 47	m generell Richtung N
Fließgeschwindigkeit F	ormation:	~2,4·10 <sup>-6</sup> m/s
Fließgeschwindigkeit k	Klüfte:	~4,7·10 <sup>-5</sup> m/s

## I-2.5 Vergleich der Ergebnisse von TRT und eTRT

Ein direkter Vergleich der beiden Messmethoden ist schwierig, da die Messungen an unterschiedlichen Erdwärmesonden durchgeführt wurden. Dies macht eine direkte Korrelation der Messergebnisse schwierig. Störend sind auch die großen Schwankungen in den berechneten Wärmeleitfähigkeiten der obersten 30 m. Da in diesen Bereichen für die Sonden S4, S8 und S12 keine genauen Werte bestimmt werden konnten (außer, dass die Wärmeleitfähigkeiten aufgrund des hohen Temperaturanstiegs als relativ niedrig anzunehmen sind), müssen diese Werte bei einer Bestimmung der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes im Bereich der Sonden ausgelassen werden (Tab. I-2.6).

**Tabelle I-2.6** Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes im Bereich der Sonden(bei den Sonden S4, S8 & S12 wurden für die Bestimmung des Mittelwertes die obersten30 m ausgelassen).

	TRT	S4	S8	S10	S12
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	~ 6	6,3	6,2	3,1	2,6

Dennoch korrelieren die Werte der TRT-Messungen sehr gut mit den eTRT-Messungen an den Sonden S4 und S8. Die hohen Gesamtwärmeleitfähigkeiten der Sonden S4 und S8 sind auf den hohen advektiven Wärmeabtransport im Tiefenbereich zwischen 30 und 65 m Tiefe zurückzuführen. Man kann somit davon ausgehen, dass die mittels des herkömmlichen TRTs ermittelten hohen Wärmeleitfähigkeitswerte ebenfalls von einem verstärkten Grundwassereinfluss im Verlauf der Bohrung herrühren. Der eTRT liefert im Gegensatz zum TRT wertvolle Erkenntnisse über die tiefenabhängigen Unterschiede in den effektiven Wärmeleitfähigkeiten.

#### I-2.6 Vergleich der eTRT-Ergebnisse mit den Grundwasserströmungsmessungen

Es zeigte sich, dass die Hydrogeologie des Gebietes weitgehend mit den Angaben von KONRAD et al (1985) übereinstimmt. Die in-situ-Grundwassermessungen zeigen, dass die Fließrichtungen im Tiefenverlauf einer Bohrung teilweise recht stark variieren können. Auffallend ist hierbei vor allem, dass nicht in allen Tiefenbereichen eine generelle Fließrichtung in Richtung des nördlich liegenden und wahrscheinlich als Vorfluter dienenden Eselsbachs vorliegt. Gerade die oberen Bereiche der Bohrungen weisen eine auffallende Varianz in ihren Fließrichtungen auf. Mögliche Gründe hierfür wäre ein zu den unteren Bohrungsteilen unterschiedliches Druckgefälle in Richtung der südlich gelegenen Lauter. Hinzu kommt der durch die starke Klüftung des Gesteins sehr komplexe Aquifer.

Die Fließgeschwindigkeiten für die Sandsteinformation liegen hierbei in einem recht ähnlichen Bereich (2,4 bis 2,8·10<sup>-6</sup> m/s), während die Fließgeschwindigkeiten der geklüfteten Bereiche je nach Kluftöffnungsweite und generellem Fließverhalten stärker variieren (meist 2,7·10<sup>-5</sup> bis 1,4·10<sup>-4</sup> m/s, in einem Fall bis 6·10<sup>-3</sup> m/s). Generell lässt sich sagen, dass in geklüfteten Bereichen das ca. 10 bis 100-fache der Fließgeschwindigkeit des porösen Bereichs der Bohrungen erreicht werden kann.

Vergleicht man die Tiefenbereiche mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten mit den aus dem eTRT ermittelten Wärmeleitfähigkeiten, so fällt auf, dass sich Bereiche mit erhöhter Fließgeschwindigkeit auch erwartungsgemäß in einer höheren Wärmeleitfähigkeit widerspiegeln (Abb. I-2.12). Hierbei kann vor allem der Bereich bei ca. 50 m Tiefe der Bohrung S12 herangezogen werden (Abb. I-2.12): Die hohe gemessene Fließgeschwindigkeit von ca. 6·10<sup>-3</sup> m/s spiegelt sich ebenfalls in einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in diesem Bereich auf 3,7 W/(m K) im Vergleich zum umgebenden Gestein (ca. 2,8 W/(m K)) wider.

Die Sonden S4 und S8, die bereits in ihrem Wärmeleitfähigkeitsprofil den Schluss auf höhere Grundwasserfließgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 30 und 65 m Tiefe zulassen, konnten leider nicht untersucht werden, da die PHREALOG-Messmethode nur an offenen Bohrlöchern durchgeführt werden kann.

# I-2.7 Beeinflussung der Untergrundwärmeleitfähigkeit durch Grundwasserfluss

Fließendes Grundwasser hat einen direkten Einfluss auf die durch TRT und eTRT ermittelten Wärmeleitfähigkeiten. Da die für Response Tests verwendeten mathematischen Grundlagen nur für konduktiven Wärmetransport gelten, ergeben sich bei starkem Grundwasserfluss lediglich Schein-Wärmeleitfähigkeiten. Da die höchsten Wärmeleitfähigkeiten für herkömmliche Gesteine zwischen 6 und 7 W/(m K) liegen, sind höhere Werte in der Regel ausschließlich auf fließendes Grundwasser zurückzuführen und können nicht für eine spätere Dimensionierung der Erdwärmesondenanlage herangezogen werden.

Momentan existieren noch keinerlei Regelungen oder Empfehlungen aus Fachkreisen, wie man bei der Dimensionierung eines Erdwärmesondenfeldes bei starkem Grundwasserfluss (effektive Wärmeleitfähigkeit  $\geq$  7 W/(M K)) vorgehen sollte. Eine Möglichkeit wäre, auf die lithologische Aufnahme der Bohrungen zurückzugreifen, die Wärmeleitfähigkeitswerte unter Berücksichtigung des Grundwasserflusses auf einen plausiblen Wert für dieses Gestein festzulegen (fließendes Grundwasser hat meist einen positiven Effekt auf den Wärmeentzug) und das Feld mit diesem Wert zu dimensionieren.

Eine unabhängige Forschungsarbeit über diese Problematik könnte Richtlinien festlegen, aufgrund derer eine Handhabung der Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern bei starkem Grundwasserfluss möglich wäre.



und GFV-Messergebnissen siehe Anhang

Bohrung S12

## I-3. Temperaturüberwachung

Zur Langzeitüberwachung der Temperaturen im Untergrund des Erdwärmesondenfeldes in Kaiserlautern wurde das faseroptische Temperaturmessgerät nach der Durchführung der enhanced Thermal Response Tests (Kapitel I-2.4.1.2) fest in einem Schaltkasten des Produktionshallenneubaus der Firma Wipotec installiert. Das Messgerät wurde in das lokale Netzwerk der Firma eingegliedert und dem igem ein Remote-Access-Zugang auf eine lokale Serverpartition gewährt. Auf diese Weise waren eine Fernüberwachung der Datenaufzeichnung und eine Datenübertragung über das Internet möglich.

Die Langzeitüberwachung diente vor allem den Fragestellungen, ob das im Untergrund fließende Grundwasser einen Temperatureinfluss auf benachbarte Sonden während des Betriebes hat. Gleichzeitig sollte es zusammen mit dem Wärmemengenzählerkonzept (Kapitel 8.1 in MALM et al. 2010) dazu dienen, die Genauigkeit von Aussagen über die vorhergesagten Leistungen des Feldes zu überprüfen.

# I-3.1 Messaufbau der Langzeitüberwachung

Die Temperaturüberwachung des Feldes wurde zu Beginn der Heizperiode (Inbetriebnahme der Wärmepumpen am 10.10.2008) gestartet. Eine durchgängige einjährige Aufzeichnung der Temperaturen im Untergrund des Sondenfeldes erfolgte vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009. Die Schaltungsmodi einzelner Sonden im Feld sind in Abbildung I-2.4 und Tabelle I-3.1 dargestellt. Drei Sonden waren während der gesamten Überwachungsperiode aus dem laufenden Betrieb ausgenommen und drei andere Sonden permanent dem laufenden Betrieb der Anlage zugeschaltet. Die restlichen beiden Sonden wurden am 06.07.2009 innerhalb der Kühlperiode eingeschaltet, um den Temperaturanstieg des Untergrundes bei bereits voll laufender Kühlung zu dokumentieren.

**Tabelle I-3.1** Schaltungsmodus der überprüften Sonden während der Temperaturüberwachungsperiode(01.12.2008 bis 30.11.2009).

	S4	S8	S12	S15	S10	S23	S19	S14
Permanent ausgeschaltet		X			X			X
Ausgeschaltet vom 01.12.2008 – 06.07.2009	Х		х					
Eingeschaltet am 06.07.2009 08:00h	X		X					
Permanent eingeschaltet				Х		Х	Х	

#### I-3.2 Ergebnisse der Temperaturüberwachung

Die Ergebnisse der Untergrundtemperaturaufzeichnungen in der Umgebung aller acht Sonden sind in Abb. I-3.1 abgebildet. Die unterschiedliche Betriebsweise der aufgezeichneten Sonden schlägt sich sehr gut in der Abbildung nieder. Während das Umfeld der drei permanent ausgeschalteten Sonden (S8, S10 und S14) in ihrem Jahrestemperaturverlauf relativ gleich bleibt, bewirken die drei permanent eingeschalteten Sonden (S15, S23, S19) einen ausgeprägten Jahresgang (Abb. I-3.1).

Beim Spleißen des Glasfaserkabels der Sonde S14 kam es zu einem fehlerhaften Spleiß, der nicht mehr korrigiert werden konnte. Aus diesem Grund wurde die Sonde S14 aus den nachfolgenden Betrachtungen ausgeschlossen.



**Abbildung I-3.1** Jahresuntergrundtemperaturverlauf aller Sonden vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

Trägt man nur die Umgebungstemperaturen der permanent eingeschalteten Sonden auf, so kann man den Jahresgang sehr gut erkennen (Abb. I-3.2). Eine Mittelwertbildung der Werte über jeweils eine Woche zeigt, dass die Untergrundtemperaturen am Ende der Überwachungsperiode (ca. 11,5°C) noch nicht wieder die Werte des Vorjahres (ca. 10,5°C) erreicht haben.



**Abbildung I-3.2** Jahresuntergrundtemperaturverlauf der Sonden in Gebrauch vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

## I-3.3 Vergleich der Untergrundtemperaturen mit den Soletemperaturen

Der Temperaturverlauf der Sole (gemessen an Vor- und Rücklauf des Feldes; Zählerkonzept in Kapitel 8.1 von MALM et al. 2010) über den Messzeitraum ist in Abbildung I-3.3 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Temperaturen am Ende der Überwachung (ca. 10°C) noch nicht wieder die Werte des Vorjahres (ca. 8,5°C) erreicht haben.



**Abbildung I-3.3** Jahressoletemperaturverlauf gemessen am Vor- und Rücklauf des Sondenfeldes vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

Ein direkter Vergleich zwischen den Temperaturen der Sole und den Temperaturen des Untergrundes (Glasfaserkabel in Verpressmaterial) kann wertvolle Hinweise auf die

Wechselwirkungen zwischen Betriebsmedium und dem Gestein des Untergrundes liefern. Es zeigt sich, dass der Untergrund die Temperaturen des Solestroms abgeschwächt wiedergibt (Abb. I-3.4).



**Abbildung I-3.4** Vergleich der Wochenmittel von Jahresuntergrund- und Jahressoletemperatur vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

Die Abschwächung der Temperaturen zwischen Sole und Glasfaserkabel kann mit dem Fourierschen Gesetz erklärt werden (HÄFNER et al. 1992):

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot A \cdot \Delta T \tag{I-3.1}$$

*Q* Wärmeleistung [W]

λ Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]

 $\Delta x \qquad \text{Abstand zwischen } x_1 \text{ und } x_2 \text{ [m]}$ 

- A wärmedurchströmte Fläche [m<sup>2</sup>]
- $\Delta T \qquad \mbox{Temperaturdifferenz am Punkt } x_1 \mbox{ und } x_2 \label{eq:stars}$

Bei einer konstanten Wärmeleistung  $\dot{Q}$  und einer konstanten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des durchflossenen Gesteins ist die Temperatur T<sub>2</sub> direkt abhängig von der Entfernung  $\Delta x$  zwischen der Rohrwand x<sub>1</sub> der Erdwärmesonde und dem Glasfaserkabel x<sub>2</sub> (Abb. I-3.5). Vergrößert sich die Entfernung  $\Delta x$  zwischen Rohrwand und Glasfaserkabel, so erhöht sich in gleichem Maße die Temperaturdifferenz  $\Delta T$ . Dies führt zu einer im Vergleich zu T<sub>1</sub> (Sondenrohrwand) geringeren Temperatur T<sub>2</sub> (Glasfaserkabel) bei vergrößertem Abstand zwischen x<sub>1</sub> (Sondenrohr) und x<sub>2</sub> (Glasfaserkabel).

Außerdem ist in der Realität die Ausrichtung des Wärmestroms radial, da sowohl das Bohrloch als auch die Sondenrohre eine zylinderförmige Geometrie besitzen. Außerhalb eines heißen Rohres (vergleichbar mit dem Sondenrohr) nimmt die Temperatur mit dem

Faktor r<sup>-1</sup> ab, da sich die Wärmeenergie über eine immer größer werdende Oberfläche mit zunehmendem Radius r [m] verteilt. Dies führt zu einer zusätzlichen Abschwächung der Temperaturen mit zunehmender Entfernung vom Sondenrohr. Aus diesen beiden Gründen wirken sich die Temperaturschwankungen der Sole mit geringerer Amplitude auf die Temperaturen der mit dem Glasfaserkabel gemessenen Sondenumgebung aus (Abb. I-3.4).



Abbildung I-3.5 Skizze eines wärmedurchströmten Körpers.

Der thermische Widerstand zwischen der Wärmequelle (bei TRTs die zirkulierte Sole; bei eTRTs der Heizdraht) und dem das Bohrloch umgebenden Gestein wird als Bohrlochwiderstand bezeichnet. Da sich die Position des Glasfaserkabels zwischen Sondenrohr und Bohrlochwand nicht genau festlegen lässt, ist eine genaue Berechnung des Bohrlochwiderstandes aus den erhaltenen Temperaturdaten nicht möglich. Bei der Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials und einer Festlegung der Positionen der Sondenrohre im Bohrloch, ist es möglich, den Bohrlochwiderstand analytisch zu berechnen (HELLSTRÖM 1991), um somit eine Abschätzung des tatsächlichen Bohrlochwiderstandes zu erhalten. Im vorliegenden Fall kann man den Bohrlochwiderstand der vier untersuchten Sonden (Kapitel I-2.3) mit ca. 0,06 bis 0,09 (K m)/W angeben, was gut mit dem gemessenen Bohrlochwiderstand der herkömmlichen TRT-Messung übereinstimmt (Tab. I-2.3).

## I-3.4 Beeinflussung benachbarter Sonden

Um eine etwaige Beeinflussung benachbarter Sonden während des Betriebes festzustellen und auch einen möglichen Einfluss von Grundwasserfluss nachzuweisen, wurden drei der Sonden während der Überwachungsphase permanent ausgeschaltet und somit lediglich als Temperaturfühler verwendet.

Abbildung I-3.6 und Abbildung I-3.7 zeigen den Verlauf der gemittelten Umgebungstemperaturen der Sonden in der Heiz- und Kühlperiode. Bei den für den Betrieb verwendeten Sonden S15, S23 und S19 sind die Arbeits- und Ruhephasen der Anlage im Temperaturprofil sehr deutlich zu erkennen. Die Temperaturkurven der benachbarten, ausgeschalteten Sonden (S4, S8, S10 und S12) hingegen zeigen in beiden Arbeitsmodi der Anlage (Abb. I-3.6 und Abb. I-3.7) keine auffälligen, mit den eingeschalteten Sonden korrelierbaren Verläufe. Eine starke gegenseitige Beeinflussung der ausgewählten Sonden im ersten Betriebsjahr kann somit ausgeschlossen werden.



Abbildung I-3.6 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden während der Heizphase vom 19.01.2009 bis zum 09.02.2009.



**Abbildung I-3.7** Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden während der Kühlphase vom 27.07.2009 bis zum 17.08.2009.
Den allgemeinen Fließrichtungsmessungen zufolge sollten die Sonden S8 und S10 im Bereich der natürlichen Fließrichtungsschwankungen des Grundwasserabstroms der Sonden S12 und S15 liegen. Bei einer Betrachtung einzelner Sondentemperaturen in ausgewählten Tiefenbereichen, ist hier ebenfalls keine größere, durch fließendes Grundwasser bedingte Beeinflussung benachbarter Sonden zu beobachten (Abb. I-3.8 bis Abb. I-3.11). Sowohl im Heizbetrieb (Abb. I-3.8 & Abb. I-3.9), als auch im Kühlbetrieb (Abb. I-3.10 & Abb. I-3.11) sind keine auffälligen Temperaturschwankungen der unbenutzten Sonden (S8 & S10) innerhalb des ersten Betriebsjahres zu erkennen.



**Abbildung I-3.8** Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S10 und S15 in einer Tiefe von 50 Metern während der Heizphase vom 19.01.2009 bis zum 09.02.2009.



**Abbildung I-3.9** Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S10 und S15 in einer Tiefe von 100 Metern während der Heizphase vom 19.01.2009 bis zum 09.02.2009.



**Abbildung I-3.10** Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S8 und S12 in einer Tiefe von 50 Metern während der Kühlphase vom 27.07.2009 bis zum 17.08.2009.



Abbildung I-3.11 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S8 und S12 in einer Tiefe von 100 Metern während der Kühlphase vom 27.07.2009 bis zum 17.08.2009.

#### I-4. Modellierungen des EWS-Feldes

Ein Ziel des Projektes ist es, mittels computergestützter Modellierung den Einfluss von Grundwasserbewegungen auf die Temperaturen im Untergrund des EWS-Feldes zu bestimmen. Um Grundwasserbewegungen im Untergrund zu simulieren, werden in der Regel numerische Lösungsverfahren verwendet (KINZELBACH & RAUSCH 1995), die auch hier gewählt wurden. Weiterhin sollen verschiedene Methoden der EWS-Feld-Dimensionierung im Hinblick auf eine unterschiedliche Soletemperatur in Abhängigkeit von der Laufzeit verglichen werden. Deshalb wurde das EWS-Feld mittels verschiedener Methoden simuliert, um mögliche Unterschiede in den Modellierungsverfahren aufzudecken und einen Vergleich mit den aus der Temperaturüberwachung erhaltenen Daten zu erstellen. Hierbei wurden zwei numerische Modellierungsprogramme zur Grundwassersimulation und zwei analytische Programme zur EWS-Feld-Dimensionierung miteinander verglichen.

#### I-4.1 Numerische Verfahren

Bei advektivem Grundwasserfluss bilden sich im Gegensatz zu einem rein konduktiven Wärmetransport (konzentrische Auskühlung) asymmetrische Kältefahnen an Erdwärmesonden aus (Abb. I-4.1). Diese Kältefahnen können mittels numerischer Simulation modelliert werden.



Kältefahnen einer Erdwärmesonde bei unterschiedlichen Grundwasser-Fließgeschwindigkeiten (Grundwasserfließrichtung entlang des blauen Pfeils).

Zur numerischen Modellierung des Untergrundes am Standort des Erdwärmesondenfeldes der Firma Wipotec in Kaiserslautern, wurden die beiden kommerziell erhältlichen Programme Feflow und Shemat verwendet.

#### I-4.1.1 FEFLOW

Das Finite Elemente Modellierungsprogramm Feflow ist ein Standardtool zur Modellierung gekoppelter, thermohydraulischen Fragestellungen (DIERSCH 1993). Die neue Version 5.4 (seit 2009 erhältlich) bietet zusätzlich zu den bekannten Funktionen eine neue Möglichkeit zur Dimensionierung von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern. Feflow ist damit die erste kommerziell erhältliche Software, die ein einfaches Dimensionieren von Erdwärmesonden mittels numerischer Methoden ermöglicht. Aus diesem Grund wurde die Anwendbarkeit der Software auf die Fragestellungen des Projektes im weiteren Verlauf geprüft und dargestellt.

Erdwärmesonden können mit der neuen Programmversion als eindimensionales Linienelement in ein dreidimensionales Gitter eingebracht werden. Diesem Linienelement können anschließend Eigenschaften einer Erdwärmesonde zugewiesen werden (z.B. Bohrlochdurchmesser, Verfüllmaterial, Sondentyp und -größe, Sole, Wärmeentzug, etc.). Diese einfache Zuordnung der sondenspezifischen Parameter ohne eine detaillierte dreidimensionale Darstellung der einzelnen Sonde ermöglicht eine schnelle Modellierung von Erdwärmesonden in komplexen dreidimensionalen Untergrundmodellen.

Es wurden verschiedene Modelle mit variablen Untergrund- und Sondeneigenschaften analog zu den angegebenen Eingangsdaten in Kapitel I-4.2.1 berechnet. Ein exemplarisches Temperaturmodell ist in Abbildung I-4.2, I-4.3 & I-4.4 dargestellt. In diesem Modell wurde ein konstanter basaler Wärmefluss als Temperaturrandbedingung und ein konstanter hydraulischer Gradient zwischen der vorderen und hinteren Modellseite (Abb. I-4.2, rechts oben und links unten) als Fließrandbedingung gewählt. Abbildung I-4.2 zeigt die modellierte Umgebung von drei modellierten Erdwärmesonden (in der Mitte der Abbildung). Eine einjährige Modellierung mit einem festgelegten Wärme- und Kälteentzug der Erdwärmesonden des Feldes zeigt, dass sich sehr deutliche Kältetrichter im Untergrund ausbilden (Abb. I-4.3). Bei einer statischen horizontalen Grundwasserbewegung mit einer Abstandsgeschwindigkeit von ca. 4·10<sup>-4</sup> m/s bildeten sich deutliche Kältefahnen in Fließrichtung des Grundwassers (Abb. I-4.4).



Abbildung I-4.2 Numerisches, dreidimensionales Temperaturmodell mit drei Erdwärmesonden und Grundwasserfluss (Legende: 9,8°C bis 12,2°C.



Abbildung I-4.3 Temperaturisolinie bei 10,3°C. Kältetrichter der drei modellierten Erdwärmesonden. Schrägansicht.



Abbildung I-4.4 Temperaturisolinie bei 10,3°C. Kältetrichter der drei modellierten Erdwärmesonden. Seitenansicht.

Das Programm eignet sich dennoch grundsätzlich sehr gut für eine genaue Darstellung von thermohydraulischen Prozessen im Untergrund von EWS-Feldern. Durch die neue Möglichkeit der numerischen Kopplung des umgebenden Temperaturfelds an Erdwärmesonden, erlaubt Feflow eine detailliertere Abbildung thermohydraulischer Wechselwirkungen zwischen Untergrund und Sonde. Dadurch bietet es sehr gute

Möglichkeiten, um Erdwärmesondenprojekte mit komplexen geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen zu simulieren. Im Vergleich zu den in Kapitel I-4.2 vorgestellten analytischen Methoden sind die Berechnungen jedoch deutlich rechenintensiver.

## I-4.1.2 SHEMAT

Das Programm Shemat (CLAUSER 2003) ist ein numerischer, auf Finiten Differenzen basierender thermohydraulischer 3D-Modellierungscode. Das Programm wurde bereits für die Modellierung von Kältefahnen im Grundwasserabstrom von Erdwärmesonden benutzt (PANNIKE 2005).

Shemat wurde im Verlauf des Projektes für eine Überprüfung einer möglichen gegenseitigen Beeinflussung von Erdwärmesonden durch Grundwasserbewegungen verwendet. Eine in-situ Temperaturaufzeichnung zeigte keinerlei sichtbare gegenseitige Beeinflussung der Erdwärmesonden nach einer zwölfmonatigen Beobachtungsphase (Kapitel I-3.4).

Es wurden insgesamt zwölf Modellierungen mit jeweils unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Wärmeentzugsleistungen (Tab. I-4.1 & I-4.2) durchgeführt. Die Parameter des umgebenden Gesteins wurden analog zu den beschriebenen Parametern in Kapitel I-4.2 gewählt. Die Auswirkungen des Wärmeentzugs auf die Soletemperaturen einer einzelnen Sonde kann mit dem Programm Shemat nicht berücksichtigt werden.

**Tabelle I-4.1** Zur Modellierung angesetzte Wärmeentnahmeleistungen der Erdwärmesonden bei zwei Betriebsmodi ("Planung" bezeichnet die dem Dimensionierungszustand entsprechende Wärmeentnahme leistung und "Realität" die Wärmeentnahmeleistung die den aufgezeichneten Entnahmemengen nach dem ersten Betriebsjahr entspricht. Die Entnahmeleistung bezeichnet den modellierten Wärmeentzug pro Tiefenmeter der Sonde.

	Planung	Realität (nach 1 Jahr)
Entnahmeleistung [W/m]	8,9	6,1
Modelle	1, 2, 3, 4, 5, 6	7, 8, 9

Die in Tabelle I-4.1 angegebenen Wärmeentnahmeleistungen entsprechen der durchschnittlichen geplanten bzw. realen Wärmeentzugsleistung nach dem ersten Betriebsjahr. Die dem Untergrund entnommene Wärme wird auf diese Art und Weise gleichmäßig über das Jahr verteilt. Da dies nicht dem realen Betrieb einer Erdwärmesondenanlage entspricht (im Winter viel Entzug, im Sommer wenig Entzug bis hin zu aktiver Wärmeeinspeisung in den Untergrund), wurden ebenfalls Modellierungen mit alternierenden Entzugsleistungen erstellt (Tab. I-4.2). Eine Wärmeeinspeisung in den Untergrund durch passive Kühlung wird in den vorliegenden Modellen nicht betrachtet.

	Wärmeentzugs-	Wärmeentzugs-
	leistung Planung	leistung Realität
	[W/m]	nach 1 Jahr [W/m]
Januar	26,3	17,5
Februar	21,6	13,0
März	13,8	8,6
April	2,6	3,1
Mai	0,4	0,5
Juni	0	0
Juli	0	0
August	0	0
September	0,2	0,9
Oktober	5,7	5,3
November	14,7	7,5
Dezember	22,1	16,7
Modelle	10, 11	12

Tabelle I-4.2 Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden im alternierenden Modellierungsmodus.

Die Länge der zu erwartenden Kältefahne kann im Vorfeld eingehenderer Betrachtungen abgeschätzt werden. Eine mögliche Methode zur Abschätzung der Kältefahnenausbreitung ist in HÄHNLEIN et al. (2010), Gleichung 4.1 & 4.2 aufgeführt:

 $l = \frac{v_a t}{R}$  mit  $v_a = \frac{v_f}{\phi}$ ,  $v_f = \frac{\dot{v}}{A}$  und  $R = 1 + \frac{\rho_s c_s}{\phi \rho_f c_f}$  (I-4.1) Abstandsgeschwindigkeit [m/s] Va Filter- oder Darcygeschwindigkeit [m/s] Vf Porosität [-] φ Ż Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s] А Grundwasserquerschnittsfläche [m<sup>2</sup>] R Retardationsfaktor [-] volumetrische Wärmekapazität Gestein [J/(m<sup>3</sup> K)] ρscs volumetrische Wärmekapazität Fluid [J/(m<sup>3</sup> K)] ρfCf Länge der Kältefahne [m] 1 t Zeit [s]

Wenn man die hieraus resultierenden Ergebnisse (Tab. I-4.3) mit den numerischen Modellen (Abb. I-4.5 & I-4.6) vergleicht, zeigt sich, dass die erkennbaren Abmessungen der Kältefahnen mit den analytisch erhaltenen Ergebnissen nur annähernd übereinstimmen.

ModelInr.	Filtergeschwindigkeit	Dauer der	Länge der
	v <sub>f</sub> [m/s - m/d]	Erhitzung t [d]	Kältefahne I [m]
1	1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12	365	59,29
2	1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12	608	98,76
3	1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12	1825	296,44
4	1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12	18250	2964,38
5	1,41·10 <sup>-5</sup> - 1,21	365	592,88
6	1,41·10 <sup>-4</sup> - 12,10	365	5928,77

**Tabelle I-4.3** Abschätzung der Kältefahnenlänge von Modell 1 bis 6. Porosität des Gesteins  $\phi = 0,25$ ; vol.Wärmekapazität Gestein  $\rho_s c_s = 2,1 \text{ MJ/(m³ K)}$ ; volumetrische Wärmekapazität Gestein Fluid  $\rho_f c_f = 4,2 \text{ MJ/(m³ K)}$ .

Dieser Unterschied ist daher zu begründen, dass Gleichung I-4.1 die Länge der gesamten von der Temperaturanomalie beeinflussten Fläche angibt. Das bedeutet, dass der Temperaturunterschied in den Außenbereichen so gering ist, dass er in den Abbildungen (Abb. I-4.5 & I-4.6) nicht mehr zu erkennen ist.

Um eine Abschätzung der maximalen thermischen Abkühlungslänge für eine bestimmte Temperaturdifferenz zu erhalten, kann man bei stationären Fließverhältnissen für den zweidimensionalen Fall folgende Gleichung (HÄHNLEIN et al. 2010) annehmen:

$$x = \frac{F_L^2}{v_a \phi^2 (\rho_f c_f)^2 4\pi D_t \Delta T_x^2} \qquad \text{mit} \qquad D_t = \frac{\lambda_{total}}{\phi \rho_f c_f} + \alpha_t v_a \qquad (I-4.2)$$

FL	Wärmeentnahmeleistung pro Länge [W/m]
Va	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
φ	Porosität [-]
$\rho_{f}c_{f}$	volumetrische Wärmekapazität Fluid [J/(m <sup>3</sup> K)]
$D_t$	transversaler Wärmedispersionskoeffizient [m²/s]
$\Delta T_{x}$	Differenz zur Hintergrundtemperatur [K]
$\lambda_{total}$	Wärmeleitfähigkeit Gestein & Fluid [W/(m K)]
$\alpha_t$	transversale Dispersivität [m]

Hieraus ergeben sich für den Fall eines gegen unendlich gehenden Betrachtungszeitraums bei verschiedenen Temperaturdifferenzen und Filtergeschwindigkeiten unterschiedliche Ausbreitungslängen (Tab. I-4.4). Man erkennt hier deutlich, dass die gewählte Temperaturdifferenz einen erheblichen Einfluss auf die erhaltenen Werte besitzt. **Tabelle I-4.4** Kältefahnenlängen von Modell 1 bis 6. Wärmeentnahmeleistung FL = 15 W/m; Porosität des Gesteins  $\phi$  = 0,25; volumetrische Wärmekapazität Gestein  $\rho_s c_s$  = 2,1 MJ/(m<sup>3</sup> K); volumetrische Wärmekapazität Gestein Fluid  $\rho_f c_f$  = 4,2 MJ/(m<sup>3</sup> K); Wärmeleitfähigkeit Gestein & Fluid  $\lambda_{total}$  = 2,17 W/(m K); abgeschätzte transversale Dispersivität  $\alpha_t$  = 0,1 [m].

Filtergeschwindigkeit	Temperatur-	Länge der	
v <sub>f</sub> [m/s - m/d]	differenz ∆T <sub>x</sub> [K]	Kältefahne x [m]	
1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12	1	1,09	
1,41·10 <sup>-5</sup> - 1,21	1	3,7·10 <sup>-2</sup>	
1,41·10 <sup>-4</sup> - 12,10	1	4,9·10 <sup>-4</sup>	
1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12	0,1	109,36	
1,41·10 <sup>-5</sup> - 1,21	0,1	3,74	
1,41·10 <sup>-4</sup> - 12,10	0,1	4,9·10 <sup>-2</sup>	
1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12	0,01	10935,94	
1,41·10 <sup>-5</sup> - 1,21	0,01	373,52	
1,41·10 <sup>-4</sup> - 12,10	0,01	4,92	

Auch hier sind die erhaltenen Werte nur bedingt mit den Abbildungen vergleichbar. Anhand der Abbildung I-4.5 kann man erkennen, dass sich auch nach 5 Jahren noch kein stationärer Zustand der Kälteausbreitung gebildet hat. Darüber hinaus kann der Abstand der Temperaturfront von der Entnahmestelle eine Maximallänge nicht überschreiten, die aus dem Produkt von verstrichener Zeit und Abstandsgeschwindigkeit ( $l_{max} = v_a t$ ) gebildet wird.

Vergleicht man die Ergebnisse von Modell 1 miteinander (Tab. I-4.5), so kann man erkennen, dass die Temperaturisolinie bei eine Temperaturabsenkung von 1 K bereits nach einem Meter ihren stationären Zustand erreicht hat, die Linie bei einer Absenkung von 0,1 K aber erst nach über 100 m stationär wird. Wenn man die Länge der Kältefahne mit Retardation zum Vergleich heranzieht, kann man erkennen, dass nach einem Zeitraum von einem Jahr der stationäre Zustand für die 0,1 K-Isolinie noch nicht erreicht sein kann. Dies kann man auch in Abbildung I-4.5 erkennen. Während sich der blaue Bereich der stärksten Abkühlung um die oberste Sonde (ohne Beeinflussung der Nachbarsonden) auch nach 50 Jahren kaum noch verändert, zeigen die Bereiche mit weniger Abkühlung (gelb) noch kein stationäres Verhalten.

Dies zeigt, dass die Methode der Kältefahnenlängenabschätzung für den vorliegenden Fall durchaus brauchbare Ergebnisse liefert, sie jedoch numerische Modellierungen nicht ersetzen sollte.

Filtergeschwindigkeit v <sub>f</sub> [m/s - m/d]	1,41·10 <sup>-6</sup> - 0,12
Abstandsgeschwindigkeit va [m/s - m/d]	5,64·10 <sup>-6</sup> - 0,49
Länge der Kältefahne maximal I <sub>max</sub> nach 365 d [m]	177,86
Länge der Kältefahne mit Retardation I nach 365 d [m]	59,29
stationäre Kältefahnenlänge x bei ∆T <sub>x</sub> = 1 K [m]	1,09
stationäre Kältefahnenlänge x bei $\Delta T_x = 0,1 \text{ K }[m]$	109,36
stationäre Kältefahnenlänge x bei ∆T <sub>x</sub> = 0,01 K [m]	10935,94

Tabelle I-4.5 Kältefahnenlängen im Vergleich.

Abbildung I-4.5 zeigt die unterschiedliche gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden bei gleichbleibendem Wärmeentzug und konstanter Grundwasserfließgeschwindigkeit, aber unterschiedlicher Benutzungsdauer. Die Wärmeentzugsleistung richtet sich hier nach dem durchschnittlichen Wärmebedarf des geplanten Erdwärmesondenfeldes. Innerhalb des ersten Jahres beeinflussen die Erdwärmesonden sich nur minimal (Abb. I-4.5, Modell 1), Kältefahnen sind jedoch bereits nach 20 Monaten erkennbar (Abb. I-4.5, Modell 2). Nach fünf Jahren ist die Beeinflussung einzelner, im Abstrom gelegener Erdwärmesonden durch die überlagernden Kältefahnen anderer Sonden bereits deutlich zu sehen (Abb. I-4.5, Modell 3) und verstärkt sich im weiteren Verlauf zunehmend (Abb. I-4.5, Modell 4).



Abbildung I-4.5 Ausschnitte aus vier verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei von in der Abbildung oben nach unten gerichteter Fließbewegung (Fließgeschwindigkeit ca. 1,4 · 10<sup>-6</sup> m/s; Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 8,9 W pro Meter Sondentiefe; Simulationsdauer 12 bis 600 Monate).

Die in Kapitel I-2.4.2 aus Messdaten ermittelten Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers liegen in der Größenordnung von 2 bis 3 10<sup>-6</sup> m/s für die Gesteinsmatrix und von 0,5 bis 1,5.10<sup>-4</sup> m/s für den geklüfteten Bereich des Gesteins. Die simulierten Fließgeschwindigkeiten der folgenden Modellierungen mit Shemat wurden an die gemessenen Geschwindigkeiten angelehnt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Beeinflussung von Erdwärmesonden im ersten Betriebsjahr nur innerhalb eines gewissen Fließgeschwindigkeitsfensters gegeben ist. Sind die Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers zu niedrig (Abb. I-4.6, Modell 1, 1,4·10<sup>-6</sup> m/s), so dominiert der konduktive Wärmetransport und die Kältefahne reicht nicht bis zur benachbarten Sonde. Sind die Fließgeschwindigkeiten zu hoch (Abb. I-4.6, Modell 6, 1,4·10<sup>-4</sup> m/s), so wird die Erdwärmesonde vom Grundwasser stark umspült und die entstehende Kältefahne ist lang und relativ schmal. Die Temperaturunterschiede zur Hintergrundtemperatur sind dabei ebenfalls nur minimal. Lediglich im mittleren Bereich der Fließgeschwindigkeiten (Abb. I-4.6, Modell 5, 1,4·10<sup>-5</sup> m/s) bilden sich ausgeprägte Kältefahnen, welche die benachbarten Sonden beeinflussen.

Es ist somit wahrscheinlich, dass die realen Fließraten der Gesteinsmatrix zu niedrig und die der geklüfteten Bereiche zu hoch sind für eine große Beeinflussung der Nachbarsonden. Da die Bestimmung der Fließrichtung des Grundwassers mit relativ großen Fehlern behaftet ist und sich die Fließrichtung zudem in Abhängigkeit von der Grundwasserneubildung des Gebietes im Verlauf eines Jahres durchaus um mehrere Grad ändern kann, ist es ebenfalls möglich, dass eine Kälte- oder Wärmefahne an den Nachbarsonden vorbei fließt und diese somit nicht oder nur wenig beeinflusst.

Eine einjährige Modellierung der Kältefahnen mit einer durchschnittlichen, dem realen Wärmeentzug entsprechenden Entzugsleistung (Tab. I-4.1) bei drei unterschiedlichen Grundwasserfließgeschwindigkeiten (Abb. I-4.7) ergab ein ähnliches Bild wie die Modellierungen der Planung (Abb.I-4.6). Aufgrund der allgemein niedrigeren Entzugsleistungen ist die Abkühlung der Temperaturen der Kältefahnen nicht so ausgeprägt wie im Planungsfall. Damit nimmt auch der Grad der gegenseitigen Beeinflussung ab.

Die Ergebnisse der mit über ein Jahr wechselnden Wärmeentzugsleistungen erstellten Modellierungen sind in Abbildung I-4.8 und Abbildung I-4.9 abgebildet. Abbildung I-4.8 zeigt den Planungsfall analog zu Abbildung I-4.5 und Abbildung I-4.9 die Realität analog zu Abbildung I-4.7. Durch den höheren Wärmeentzug in den Wintermonaten (Tab. I-4.2) sind die Kältefahnen bei den Modellierungen mit wechselnden Entzugsleistungen größer ausgebildet, als bei den Modellierungen mit kontinuierlichem Wärmeentzug.



Abbildung I-4.6 Ausschnitte aus drei verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei drei Fließgeschwindigkeiten (Fließrichtung in der Abbildung von oben nach unten; Fließgeschwindigkeit ca. 1,4 · 10<sup>-4</sup> (Modell 6), 1,4 · 10<sup>-5</sup> (Modell 5) und 1,4 · 10<sup>-6</sup> m/s (Modell 1); Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 8,9 W pro Meter Sondentiefe; Simulationsdauer 12 Monate).



Abbildung I-4.7 Ausschnitte aus drei verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei drei Fließgeschwindigkeiten (Fließrichtung in der Abbildung von oben nach unten; Fließgeschwindigkeit ca. 1,4 · 10<sup>-4</sup> (Modell 9), 1,4 · 10<sup>-5</sup> (Modell 8) und 1,4 · 10<sup>-6</sup> m/s (Modell 7);
 Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 6,1 W pro Meter Sondentiefe; Simulationsdauer 12 Monate).



Abbildung I-4.8 Ausschnitte aus vier verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei von in der Abbildung oben nach unten gerichteter Fließbewegung (Fließgeschwindigkeit ca. 1,4 · 10<sup>-6</sup> m/s; Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 8,9 W pro Meter Sondentiefe bzw. nach Tab. I-4-2; Simulationsdauer 12 bis 20 Monate).



Abbildung I-4.9 Ausschnitte aus zwei verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei von in der Abbildung oben nach unten gerichteter Fließbewegung (Fließgeschwindigkeit ca. 1,4 · 10<sup>-6</sup> m/s; Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 6,1 W pro Meter Sondentiefe bzw. nach Tab. I-4-2; Simulationsdauer 12 Monate).

Die Ergebnisse dieser Modellierungen liefern plausible Erklärungen für die in Kapitel I-3.4 festgestellte gegenseitige Nicht-Beeinflussung der Erdwärmesonden des Untersuchungsgebietes während des einjährigen Beobachtungszeitraums. Basierend auf den Modellierungen ist mit dem Beginn einer messbaren, leichten gegenseitigen Beeinflussung der Sonden nach spätestens 5 Jahren zu rechnen.

# I-4.2 Analytische Verfahren zur Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern

Die im Folgenden vorgestellten analytischen Programme bieten eine schnelle Möglichkeit die benötigte Anzahl und Länge der Sonden eines Erdwärmesondenfeldes zu berechnen. Basis der Berechnungen sind verschiedene Parameter des Untergrundes sowie der verwendeten Materialien und der geplanten Nutzung. Der Einfluss von Grundwasserbewegungen kann nicht in die Berechnungen mit einfließen.

# I-4.2.1 EED-Modell

Als Vergleichs- und Referenzmodell wurde ein an das Planungsmodell der Firma Peschla & Rochmes angelehntes Modell erstellt. Verwendet wurde das analytische Programm Earth Energy Designer (EED, HELLSTRÖM & SANNER 1995), welches auch Grundlage für das Modell der Planer war. EED arbeitet im Wesentlichen mit den auf der Linienquellentheorie basierenden g-Funktionen nach ESKILSON (1987), die die Berechnung der gegenseitigen Beeinflussung benachbarter Erdwärmesonden ermöglichen.

Die Eingangsparameter der Firma Peschla & Rochmes wurden soweit vorhanden übernommen und an die Parameter der im Rahmen des Projektes durchgeführten Messungen angepasst.

## Eingangsdaten

## Geologie:

Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:	2,7
Wärmekapazität [MJ/(m³ K)]:	2,0
Bodentemperatur [°C]:	10
Geothermischer Wärmefluss [W/m <sup>2</sup> ]:	0,07

Erdwärmesonde:	
Тур:	Doppel-U
Sondenanzahl:	40
Feldgeometrie:	4x10 (rechteckig, Abb. 4-10)
Sondentiefe [m]:	130
Sondenabstand [m]:	10
Bohrlochdurchmesser [m]:	0,137
Durchflussrate [m <sup>3</sup> /s]:	0,00061
Wärmeleitfähigkeit Füllmaterial [W/(m K)]:	2,0



Abbildung I-4.10 Rechteckanordnung des EWS-Feldes.

# Wärmeträgerfluid:

Fluid:	Monoethylenglykol (25%) & Wasser
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:	0,48
Wärmekapazität [MJ/(m <sup>3</sup> K)]:	3,795
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]:	1052,0
Viskosität [kg/(m s)]:	0,0052
Gefrierpunkt [°C]:	-14
Grundlast	
Grunulasi.	
Vorgegebene Jahresarbeitszahl Heizen:	4
Vorgegebene Jahresarbeitszahl Kühlen:	Freies Kühlen (10000)
Simulationsdauer [a]:	50

Der Wärme- und Kältebedarf der Grundlast ist in Tabelle I-4.6 wiedergegeben.

# Keine Spitzenlastbetrachtung

Temperaturrandbedingungen:	
Maximum [°C]:	21
Minimum [°C]:	0

Die Ergebnisse der Dimensionierung mit EED sind in Kapitel I-4.3 eingehend erläutert.

	Heizen		Kühlen		Heizen & Kühlen
	%	Bedarf [kWh]	%	Bedarf [kWh]	Entzug [kWh]
Gesamt	100	540.000	100	369.400	-
Januar	25,1	135.540	0,1	369	101.286
Februar	18,6	100.440	0,3	1.108	74.222
März	13,2	71.280	0,9	3.324	50.136
April	2,4	12.960	6,3	23.270	-13.550
Mai	0,4	2.160	12,3	45.432	-43.812
Juni	0,0	0	19,4	71.656	-71.656
Juli	0,0	0	25,0	92.341	-92.341
August	0,0	0	21,6	79.782	-79.782
September	0,2	1.080	10,8	39.891	-39.081
Oktober	5,4	29.160	2,4	8.865	13.005
November	13,6	73.440	0,6	2.216	52.864
Dezember	21,1	113.940	0,3	1.108	84.347

**Tabelle I-4.6** Heiz- und Kühlbedarf sowie der daraus berechnete Wärme- bzw. Kälteentzug (Jahresarbeitszahl (JAZ) Heizen: 4, direkte Kühlung).

# I-4.2.2 EWS-Modell

Das Programm EWS ist ein von Huber Energietechnik, Zürich entwickeltes Programm zur Dimensionierung von Erdwärmesonden und wurde im Auftrag des schweizerischen Bundesamtes für Energie (BFE) in Bern entwickelt (HUBER & PAHUD 1999a, HUBER 2005 & HUBER et al. 2001). Es basiert ebenfalls auf den mathematischen Grundlagen der g-Funktionen (ESKILSON 1987). Im Gegensatz zu EED ist in EWS die Geometrie des Erdwärmesondenfeldes frei wählbar, da die zugehörige g-Funktion direkt aus einer graphischen Eingabe der Feldgeometrie berechnet werden kann. Zusätzlich lassen sich in EWS bis zu zehn in ihren Materialeigenschaften unterschiedliche Gesteinshorizonte wählen.

Die für das EED-Modell verwendeten Eingabeparameter wurden weitestgehend übernommen. Alle Änderungen sind auf unterschiedliche Eingabemethoden zurückzuführen und wurden äquivalent zu den EED-Daten bestimmt.

## Eingangsdaten

Geologie:	
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:	2,7
Wärmekapazität [J/(kg K)]:	770 (entspricht ca. 2,0 MJ/(m <sup>3</sup> K))
Bodentemperatur [°C]:	10
Geothermischer Gradient [K/m]:	0,026 (entspricht ca. 0,07 W/m²)

Erdwärmesonde:	
Тур:	Doppel-U
Sondenanzahl:	40
Feldgeometrie:	4x10 (versetzte Sondenanordnung, siehe Abb. I-4-11)
Sondentiefe [m]:	130
Sondenabstand [m]:	10
Bohrlochdurchmesser [m]:	0,12
Wärmeleitfähigkeit Füllmaterial [W/(m K)]:	2,0



Abbildung I-4.11 Versetzte Sondenanordnung des EWS-Feldes.

# Wärmeträgerfluid:

Fluid:	Monoethylenglykol (25%) & Wasser
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:	0,49
Wärmekapazität [J/(kg K)]:	3,800
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]:	1053,0
Viskosität [kg/(m s)]:	0,0052
Gefrierpunkt [°C]:	-14
Grundlast:	
Vorgegebene Jahresarbeitszahl Heizen:	4
Vorgegebene Jahresarbeitszahl Kühlen:	1000 (freies Kühlen: Zirkulation Sole ohne Wärmepumpe)
Simulationsdauer [a]:	50

Der Wärme- und Kältebedarf der Grundlast ist in Tabelle I-4.6 wiedergegeben.

## Keine Spitzenlastbetrachtung

Temperaturrandbedingungen:	
Maximum [°C]:	21
Minimum [°C]:	0

Die Ergebnisse der Dimensionierung mit EWS sind in Kapitel I-4.3 eingehend erläutert.

### I-4.3 Vergleich der analytischen Simulationsprogramme

Es wurden insgesamt drei verschiedene Modelle aufgesetzt. Ein Modell wurde mittels des Programms EED (Feld-EED) erstellt. Die Sondenanordnung ist hierbei ein rechteckiges 4·10-Sonden-Feld (Abb. I-4.10), da in EED die Sondenanordnung nicht frei wählbar ist. Zusätzlich wurden zwei weitere Modelle mittels des Programms EWS (Feld-EWS und Feld-EWS-II) berechnet. Das erste Modell (Feld-EWS) wurde mit der gebohrten Sondenfeldgeometrie berechnet (Abb. I-4.11), während das zweite (Feld-EWS-II) mit einer rechtwinkligen Sondenanordnung analog zum Modell Feld-EED berechnet wurde (Abb. I-4.10). Die Ergebnisse der Berechnungen werden hinsichtlich ihrer mittleren Soletemperaturen miteinander verglichen.

Der direkte Vergleich zwischen den beiden unterschiedlichen Modellierungsprogrammen (Feld-EED und Feld-EWS) ergab nur geringfügige Unterschiede in den minimalen und maximalen monatlichen Soletemperaturen des jeweils ersten und letzten Simulationsjahres (Tab. I-4.7).

Auch der Vergleich zwischen unterschiedlicher Sondenanordnung (versetzte Sondenanordnung bei Feld-EWS, rechtwinklige Anordnung bei Feld EWS-II) mit dem Programm EWS ergab ebenfalls nur geringe Unterschiede (Tab. I-4.7).

Abbildung (Abb. I-4.12) gibt einen Überblick über die Temperaturentwicklung des EWS-Feldes, berechnet mit den beiden Modellierungsprogrammen. Sie zeigt, dass der Temperaturverlauf der Sole im letzten Simulationsjahr (Jahr 50) mit beiden Modellierungsprogrammen nahezu identisch ausfällt. Da beide Programme auf denselben mathematischen Grundlagen beruhen (ESKILSON 1987, HELLSTRÖM 1991), sind die Ergebnisse erwartungsgemäß ausgefallen.

	Vergleich EED und EWS			
	Durchschnittl. monatl.			
	Soletemperatur			
	1.Jahr	50.Jahr	1.Jahr	50.Jahr
	Tmax	Tmax	Tmin	Tmin
Feld-EED [°C]	18,81	18,18	3,89	2,41
Feld-EWS [°C]	18,71	18,17	4,53	2,91
Differenz [K]	0,10	0,01	0,64	0,50

 Tabelle I-4.7 Durchschnittliche monatliche Soletemperatur.

	Vergleich EWS und EWS-II			
	Durchschnittl. monatl.			
	Soletemperatur			
	1.Jahr	50.Jahr	1.Jahr	50.Jahr
	Tmax	Tmax	Tmin	Tmin
Feld-EWS [°C]	18,71	18,17	4,53	2,91
Feld-EWS-II [°C]	18,66	18,40	4,61	3,38
Differenz [K]	0,05	0,23	0,08	0,47



Abbildung I-4.12 Monatliche durchschnittliche Temperaturentwicklung des Trägerfluids in den Sonden im Jahr 50 nach Inbetriebnahme der EWS-Felder bei kontinuierlichem Betrieb; Modell Feld-EED und Feld-EWS.

#### I-4.4 Vergleich VDI mit den analytischen Programmen

Zum Vergleich der Ergebnisse der analytischen Dimensionierungsprogramme mit der Berechnungsmethode nach VDI 4640, Blatt 2 wurde die für den Wärmebedarf benötigte Gesamtsondenlänge aus der angegebenen Wärmeentzugsleistung der Wärmepumpen (ca. 220 kW) mit zwei verschiedenen Wärmeentzugsleistungen des Untergrundes berechnet (Tab. I-4.8). Die Wärmeentzugsleistungen des Untergrundes stehen für den für Sandstein höchstmöglichen Wärmeentzug bei wenig Heizbedarf und den geringstmöglichen Wärmeentzug bei hohem Heizbedarf.

Bei einem Vergleich mit der tatsächlich benötigten Sondenlänge von 130 m zeigt sich, dass das Feld bei einer Dimensionierung nach VDI unterdimensioniert wäre. Dies kann man am besten erkennen, wenn man die Soletemperaturen mit dem Programm EED berechnet, die bei einem tatsächlichen Erdwärmesondenfeld mit der nach VDI benötigten Sondenlänge entstehen würden. Die aus diesen Berechnungen erhaltenen Soletemperaturen liegen für Variante 1 unterhalb der für die meisten Wärmepumpenanlagen notwendigen Mindest-temperaturen von -5°C (Tab. I-4.8). Variante 2 hingegen liegt in einem Temperaturbereich der Sole, der gerade noch für einen Betrieb der Anlage ausreichend ist. Aufgrund der großen Varianz und Unsicherheit der spezifischen Wärmeentzugsleistungen des Untergrundes wäre ein nach VDI 4640, Blatt 2 dimensioniertes Erdwärmesondenfeld für den Wärme- und Kältebedarf in Kaiserslautern nicht empfehlenswert.

	Variante 1	Variante 2
Wärmeentzugsleistung der Wärmepumpen [kW]	~220	~220
Spezifische Entzugsleistung Untergrund [W/m]	80	55
Vollbenutzungsstunden [h]	1800	2400
Anzahl Sonden [-]	40	40
Länge pro Sonde [m]	69	100
Min. Soletemp. (EED) [°C]	-5,18	-0,16
Max. Soletemp. (EED) [°C]	23,92	20,46

**Tabelle I-4.8** Bestimmung der jeweiligen Sondenlänge mit Hilfe spezifischer Entzugsleistungen nach VDI 4640, Blatt 2.

Dies zeigt, dass größere Anlagen nicht mit Hilfe der Tabellenmethode nach VDI 4640 dimensioniert werden sollten. Der Unterschied zwischen der tatsächlich benötigten Sondenlänge (130 m) und den Werten nach VDI 4640, wird zu einem großen Teil durch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Sonden im Sondenfeldverband verursacht. Dies kann mit der VDI-Methode nicht berücksichtigt werden. Auch ist es mit der VDI-Berechnung nicht möglich, die einzelnen Haustechnik- und Untergrundparameter getrennt zu berücksichtigen. Aus diesem Grund gibt diese VDI-Richtlinie vor, dass bei Erdwärme-

sondenanlagen ab einer Leistung von 30 kW rechnergestützte Dimensionierungsmethoden (wie z.B. EED oder EWS) verwendet werden müssen.

### I-4.5 Vergleich Wärmebedarf Planung und Wärmebedarf real

Zwischen dem in der Planung verwendeten Wärmebedarf und dem Wärmebedarf aus der im Zuge dieser Studie über einen Zeitraum von einem Jahr angefertigten Energiebilanz (Kapitel 8.3 in MALM et al. 2010) ergeben sich zum Teil erhebliche Unterschiede (Tab. I-4.9 & I-4.10). Sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb ist eine Abnahme der benötigten Gesamtwärmemenge zu beobachten. Der Wärmeentzug aus dem Erdreich beträgt lediglich 68% des geplanten Wärmebedarfs, wohingegen lediglich 65% der Kältemenge benötigt wird.

	Wärmeentzug	Wärmeentzug	Differenz
	Planung [kWh]	Realität [kWh]	[kWh]
Januar	101.655	67.800	33.855
Februar	75.330	45.600	29.730
März	53.460	33.400	20.060
April	9.720	13.400 verteilt	-
Mai	1.620	über April & Mai	-
Juni	0	0	0
Juli	0	0	0
August	0	0	0
September	810	3.300	-2.490
Oktober	21.870	20.400	1.470
November	55.080	28.200	26.880
Dezember	85.455	64.700	20.755
Gesamt	405.000	276.800	128.200

Tabelle I-4.9 Wärmeentzug der Planungsgrundlage und der real benötigte Wärmeentzug.

Tabelle I-4.10 Kälteentzug der Planungsgrundlage und der real benötigte Kälteentzug.

	Kälteentzug	Kälteentzug	Differenz
	Planung [kWh]	Realität [kWh]	[kWh]
Januar	369	7.200	-6.831
Februar	1.108	7.300	-6.192
März	3.324	11.300	-7.976
April	23.270	42.200 verteilt	-
Mai	45.432	über April & Mai	-
Juni	71.656	35.600	36.056
Juli	92.341	44.100	48.241
August	79.782	46.400	33.382
September	39.891	23.100	16.791
Oktober	8.865	11.400	-2.535
November	2.216	7.100	-4.884
Dezember	1.108	3.100	-1.992
Gesamt	369.363	238.800	130.563

#### I-4.6 Gegenüberstellung des geplanten und des realen Wärmebedarfs mit EED

Eine Berechnung der Soletemperaturen über einen Simulationszeitraum von 50 Jahren mit den Daten des realen Wärmebedarfs kann wertvolle Hinweise auf den zu erwartenden Temperaturverlauf der Wärmeträgerflüssigkeit und die Effizienz des Sondenfeldes liefern. Zu beachten gilt jedoch, dass sich diese neu gewonnenen Daten lediglich auf den Wärme- und Kälteverbrauch des ersten Betriebsjahres beziehen (Tab. I-4.9 & I-4.10). Die realen Verbräuche können über den angesetzten Betriebszeitraum von 50 Jahren durchaus variieren.

Der neue Berechnung mit EED (im laufenden Text "Feld- EED-II" genannt; basierend auf der Energiebilanz des ersten Betriebsjahres) wurden bis auf die Lastprofile der Grundlast (Tab. I-4.9 & I-4.10) dieselben Parameter wie bei der anfänglichen Modellierung (Feld-EED, Kapitel II-4.2.1) verwendet. Die Ergebnisse der Modellierungen zeigen, dass die Temperaturspanne zwischen Minimal- und Maximaltemperatur im Grundlastfall von Feld-EED-II im Vergleich zu Feld-EED (Abb. I-4.13) sinkt. Gleichzeitig kann man erkennen, dass die durchschnittlichen Grundlasttemperaturen von Feld-EED-II im Verlauf von 50 Jahren leicht steigen (von ca. 15,5°C auf ca. 16,5°C bei den maximalen Grundlasttemperaturen und von ca. 8°C auf ca. 9°C bei den minimalen Grundlasttemperaturen, Abb. I-4.13). Der leichte Anstieg der Temperaturen bei Feld-EED-II (Abb. I-4.13) wird durch die im Vergleich zum Planungsfall jährlich unterschiedliche Verteilung des Wärme- und Kälteentzugs hervorgerufen (vgl. Abb. I-4.14).

Die Ergebnisse des letzten simulierten Betriebsjahres ergab für Feld-EED-II eine weit geringere Temperaturspreizung als beim Modell Feld-EED (Abb. I-4.14). Dies ist eine direkte Auswirkung aus dem im Vergleich zur Planung niedrigeren realen Wärme- und Kältebedarf.

Bei einer weitergehenden Beobachtung des realen Wärme- und Kältebedarfs mittels der eingebauten Wärmemengenzähler (Kapitel 8.3 in MALM et al. 2010), kann, über das erste Betriebsjahr hinaus, die Berechnung Jahr für Jahr mit realen Zahlen neu angesetzt werden. Die so erhaltenen Ergebnisse können wertvolle Hinweise auf die Ausnutzung des im Untergrund zur Verfügung stehenden Wärme- und Kältepotentials liefern und helfen den Betrieb der geothermischen Anlage zu verbessern.



Abbildung I-4.13 Entwicklung der jährlichen minimalen und maximalen Monats-Durchschnitts-Temperaturen des Trägerfluids in den Sonden über 50 Jahre; Modell Feld-EED und Feld-EED-II.



Abbildung I-4.14 Monatliche durchschnittliche Temperaturentwicklung des Trägerfluids in den Sonden im Jahr 50 nach Inbetriebnahme der EWS-Felder bei kontinuierlichem Betrieb; Modell Feld-EED und Feld-EED-II.

#### I-5. Zusammenfassung der Ergebnisse von Abschnitt I

Im Zuge des Forschungsprojekts "Qualitätssicherung bei Erdwärmesondenfeldern für Heizund Kühlzwecke und Überprüfung ihrer Effizienz im Ziel 2 Gebiet" des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz, Rheinland-Pfalz wurde ein Erdwärmesondenfeld mit 40 Sonden in Kaiserslautern (Wipotec GmbH) überprüft.

Ziel des Projektes war die Erstellung einer Energiebilanz zur Optimierung eines Erdwärmesondenfeldes und eine Überprüfung verschiedener Methoden zur Erfassung der Untergrundparameter.

An drei der Erdwärmesonden wurde mittels eines in-situ Grundwasserströmungsmessverfahrens das hydraulische Verhalten des Untergrundes überprüft. Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit konnten in mehreren Tiefenbereichen ermittelt werden. Zusätzlich wurde eine Kamerabefahrung durchgeführt, die verschiedene Klüftungszonen erkennen ließ und einzelnen Tiefenbereichen zuordnen konnte.

Zusätzlich erfolgte an zwei Sonden ein herkömmlicher Thermal Response Test (TRT), während an vier Sonden ein enhanced Thermal Response Test (eTRT) durchgeführt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass fließendes Grundwasser im Untergrund des Erdwärmesondenfeldes die effektiven Wärmeleitfähigkeiten beeinflusst. Es zeigte sich außerdem, dass der tiefenaufgelöste eTRT hilft, sowohl Zonen mit verstärktem Grundwasserfluss zu detektieren als auch Mängel in der durchgängigen Verpressung der Erdwärmesonden aufzuzeigen. Selbst bei korrekter Durchführung der Sondenverpressung durch die beauftragte Bohrfirma kann es in stark geklüfteten Untergrundbereichen zu einer mangelhaften Verpressung der Sonde kommen.

Eine einjährige Temperaturüberwachung des laufenden Betriebs mittels an acht der Erdwärmesonden angebrachter Glasfaserkabel zeigte den Temperaturverlauf des Untergrundes in der Nähe der Sonden. Es konnte jedoch keine gegenseitige Beeinflussung von unterschiedlichen Erdwärmesonden festgestellt werden. Sämtliche Temperaturänderungen lagen innerhalb der messaufbaubedingten Fehlerbereiche. Ein Vergleich der Untergrundtemperaturen mit den mittleren Soletemperaturen ergab die erwartete direkte Abhängigkeit von Sole- und Untergrundtemperaturen im Nahbereich der Sonden.

Sowohl numerische als auch analytische Modellierungsprogramme wurden im Verlauf des Projekts verwendet. Numerische Programme eignen sich vor allem bei einer komplexen Geologie oder Hydrogeologie des Untergrundes. Es wurden zwei verschiedene numerische Programme verwendet.

Feflow ist ein Finite-Elemente-Code, der zur Modellierung von Fluid- und Stoffströmungsprozessen verwendet wird. Die neue Programmversion 5.4 beinhaltet erstmalig die Möglichkeit, Erdwärmesonden mit einfachen Linienelementen in ein dreidimensionales Modellierungsnetz einzufügen. Es zeigte sich, dass diese neuartige Methode gut funktioniert. Die benötigte Rechnerleistung und der benötigte Speicherplatz sind hoch. Insbesondere bei komplexen geologischen und hydrogeologischen Ausgangsvoraussetzungen scheint eine solche Simulation jedoch sehr sinnvoll.

Shemat ist ein Finite-Differenzen-Code, der für die Lösung thermohydraulischer Fragestellungen entwickelt wurde und vor allem im Bereich Fluid- und Reservoirmodellierung eingesetzt wird. Die Messungen der in-situ-Grundwasserfließgeschwindigkeit haben ergeben, dass sich die vor Ort befindlichen Fließgeschwindigkeiten im vorherrschenden Aquifer des Buntsandsteins in zwei hauptsächlichen Geschwindigkeitsbereichen bewegen. In geklüfteten Bereichen ist diese um zwei Größenordnungen höher, als in den ungeklüfteten. Diese Werte wurden für die numerischen Modellierungen in die Modelle übernommen.

Die Ergebnisse der Modellierungen liefern Gründe für die durch die einjährige Temperaturüberwachung festgestellte Nicht-Beeinflussung der beobachteten Erdwärmesonden. Ein Grund ist die Dauer der Temperaturüberwachung. Die Modelle zeigen, dass eine einjährige Überwachung in den meisten Fällen zu kurz ist, um eine Beeinflussung zu beobachten. Auch bei einer langsamen Grundwasserfließgeschwindigkeit wird der Einfluss größer, je länger die Simulationszeit angesetzt wird.

Ein zweiter Punkt ist die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers. Fließt das Grundwasser bei einer einjährigen Simulationszeit langsam, so bleibt der Hauptteil des Wärmetransports konduktiv und beeinflusst die benachbarten Sonden nur minimal. Ist der Grundwasserfluss jedoch schnell, so bildet sich lediglich eine schmale, nur wenig abgekühlte Kältefahne aus, da der Sonde stetig Grundwasser mit einer ungestörten Temperatur zugeführt wird. Nur in einem mittleren Fließgeschwindigkeitsbereich ist die Beeinflussung durch benachbarte Sonden maximal (vgl. Kapitel I-4.1.2).

Als dritter Grund kann die Unsicherheit der Fließrichtung des Grundwassers angegeben werden. Da sich die Grundwasserfließrichtung bei sich verändernder Grundwasserneubildung über das Jahr gesehen durchaus um mehrere Grad ändern kann, ist es auch möglich, dass die Kälte- oder Wärmefahne an den benachbarten Sonden vorbei fließt und diese somit nicht oder nur wenig beeinflusst. Um die Dimensionierungen des Erdwärmesondenfeldes miteinander zu vergleichen wurden zwei analytische Programme verwendet. Es zeigt sich, dass die beiden analytischen Modelle, die mittels der Software EED und EWS erstellt wurden, in ihren Ergebnissen sehr ähnlich sind, da sie auf der gleichen Berechnungsgrundlage arbeiten. Diese kommerziell erhältlichen Modellierungstools eignen sich vor allem für eine schnelle und effiziente Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern bei relativ unkomplizierten geologischen und hydro-geologischen Verhältnissen. Ein Vergleich der analytischen Dimensionierungsprogramme mit einer Dimensionierung nach VDI 4640, Blatt 2 ergab, dass diese Richtlinie nicht für größere Erdwärmesondenfelder geeignet ist (wie auch in VDI 4640 vermerkt).

Ein Vergleich zwischen dem der Planung zugrunde liegenden Wärme- und Kältebedarf und dem real gemessenen Wärme- und Kältebedarf im ersten Betriebsjahr ergab einen um ca. 35% niedrigeren tatsächlichen Energiebedarf. Daraus resultierend ergibt sich eine niedrigere jährliche Sole- und Untergrundtemperaturspreizung. Eine über das erste Betriebsjahr hinausgehende Überwachung des jährlichen Wärme- und Kältebedarfs mit anschließender Neuberechnung der Soletemperaturen, kann Hinweise auf die Ausnutzung des im Untergrund zur Verfügung stehenden Wärme- und Kältepotentials liefern. Dies hilft, den Betrieb der geothermischen Anlage langfristig zu verbessern. Abschnitt II der Dissertation

Thermohydraulische Szenariomodellierungen des enhanced Thermal Response Tests

# Einleitung und Überblick Abschnitt II

Abschnitt I der Dissertation hat gezeigt, dass die thermischen und hydraulischen Untergrundparameter neben der Auslegung und dem Betrieb der Haustechnik einen großen Einfluss auf den Ertrag und die Effizienz von Erdwärmesondenanlagen besitzen. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes sowie die Wechselwirkungen zwischen gemessener Wärmeleitfähigkeit und tatsächlicher Gesteinswärmeleitfähigkeit bei einem gleichzeitigen Vorhandensein von hydraulischem Wärmetransport durch fließendes Grundwasser, ist eine der zentralen Fragen vieler wissenschaftlicher Arbeiten im Bereich der oberflächennahen (MALM 2009, MALM & DECKERT 2013, GEHLIN 1998, Geothermie GEHLIN 2002, SANNER et al. 2008, FORRER et al. 2008, WITTE et al. 2002, WAGNER & CLAUSER 2005, HÄHNLEIN et al. 2010, CHIASSON et al. 2000, GEHLIN & HELLSTRÖM 2003, DIAO et al. 2004, BARCENILLA et al. 2005, AFEI et al. 2007, SUTTON et al. 2003, HUBER & ARSLAN 2012, WAGNER et al. 2013, LEE & LAM 2007, WITTE 2002 & ZSCHOCKE et al. 2005).

Der vorliegende Abschnitt soll die bereits in Abschnitt I vorgestellte Methode zur Bestimmung einer tiefenaufgelösten Wärmeleitfähigkeit, den enhanced Thermal Response Test (DORNSTÄDTER et al. 2008, HEIDINGER et al. 2004, MALM 2009, MALM & DECKERT 2013, HESKE et al. 2011, RIEGGER et al. 2012, Kapitel I-2.4.1.2) näher erläutern, sowie Stärken und Schwächen der Methode herausarbeiten. Vergleiche zwischen herkömmlichen TRTs und dem eTRT, sowie die numerische Modellierung der Testdurchführung soll die Reproduzierbarkeit der mit dieser Methode erzielten Messergebnisse stützen.

#### II-1. Methodik

Faseroptische Temperaturmessmethoden wurden bereits 1982 erstmals von HARTOG & PAYNE vorgestellt. Die als Distributed Temperature Sensing (DTS) bekannte Messmethode wurde später u. A. von HURTIG et al (1994) zur Erstellung von Temperaturlogs in Bohrlöchern für die Geowissenschaften nutzbar gemacht. Seit 2004 wird die DTS-Methode für die tiefenaufgelöste Messung von Untergrundwärmeleitfähigkeiten (eTRT) verwendet (HEIDINGER et al. 2004, DORNSTÄDTER et al. 2008, MALM 2009, HESKE et al. 2011 & RIEGGER et al. 2012).

#### II-1.1 DTS-Messverfahren

Mittels des DTS-Messverfahrens können Temperaturen entlang eines Lichtwellenleiterkabels (LWL-Kabel) gemessen werden. Die erreichbaren Messgenauigkeiten liegen bei ca.  $\pm 0,3$  K der absoluten Temperaturwerte und bei ca.  $\pm 0,1$  K der Werte relativ zueinander (HURTIG et al. 1994). Die maximale Ortsauflösung liegt je nach Gerät bei ca. 0,15 m.

### II-1.1.1 Physikalische Grundlagen

Das DTS-Messverfahren basiert auf der Auswertung der Intensität und spektralen Zusammensetzung des rückgestreuten Lichts, das entsteht, wenn die Photonen eines Laser-Impulses mit den Elektronen des amorphen Quarzes der verwendeten Glasfaser interagieren (HURTIG et al. 1994). Das auf diese Art rückgestreute Licht teilt sich in drei spektrale Bänder auf: Das Rayleigh-Band, sowie das Stokes- und das Anti-Stokes-Band (Abb. II-1.1). Das Rayleigh-Band kann durch seine Eigenschaften verwendet werden, um Brüche oder Inhomogenitäten im Faserverlauf zu ermitteln (HURTIG et al. 1994). Die Raman-Rückstreuung wird von der thermisch beeinflussten molekularen Gitterschwingung der Glasfasermoleküle erzeugt. Die beiden Spektralbänder (Stokes- und Anti-Stokes-Band) unterscheiden sich in Ihren Intensitäten, da das Stokes-Band nur gering, das Anti-Stokes-Band jedoch stark von der Temperatur der Faser beeinflusst wird (HURTIG et al. 1994). Aus dem Verhältnis zwischen Stokes- und Anti-Stokes-Band unter Berücksichtigung weiterer Materialparameter kann somit die absolute Temperatur der Glasfaser an jedem Punkt der Messstrecke berechnet werden (ERBAS et al. 1999). Da die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung in einer optischen Faser sehr gut bekannt ist, kann der räumliche Abstand des gemessenen Punktes von der Lichtquelle sehr genau über die Abnahme der Intensität des rückgestreuten Lichtes bestimmt werden (HURTIG et al. 1994).





Wavelength

**Abbildung II-1.1** Aufteilung der optischen Rückstreuung (ERBAŞ et al. 1999) und Abbildung eines Glasfaserhybridkabels. Die grüne Kabelhülse beinhaltet die vier Glasfasern, die unteren Kabelhülsen die vier Kupferlitzen.

Die so ermittelten Temperaturwerte lassen sich jedem räumlichen Punkt entlang der LWL-Kabelstrecke zuordnen und man erhält mit jedem Messdurchgang eine Kette von Temperaturmesswerten. Das Rauschen der Messwerte bzw. die Ungenauigkeit der Messwerte erhöht sich mit der Entfernung des gemessenen Punktes von der Strahlungsquelle.

## II-1.1.2 Messdurchführung

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde ein OTS40P-Messgerät der Firma LIOS Technologies für die faseroptischen Temperaturmessungen verwendet. Das Messgerät kann bis zu 4000 m LWL-Kabel messen und mittels einer Software (CHARON\_02) widergeben. Zur Durchführung einer Messung muss das für die Messung vorgesehene Glasfaserkabel an das Messgerät angeschlossen werden. Hierfür muss ein E2000-Stecker (Pig-Tail mit Schrägschliff) an das Kabel angespleißt werden. Über ein Remote-Desktop-Verfahren kann eine Fernkalibrierung des Gerätes von dem Gerätehersteller vorgenommen werden. Nach der Einstellung des Gerätes für den Messdurchgang kann die Messung der Temperaturen beginnen. Die beschriebene Messdurchführung wurde auch bei den Messungen in Abschnitt I, Kapitel I-2.4.1 angewandt.

#### II-1.2 Der enhanced Thermal Response Test (eTRT)

Der enhanced Thermal Response Test (eTRT) wird seit mehreren Jahren erfolgreich zur Ermittlung tiefenaufgelöster Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes bei Erdwärmesondenanlagen verwendet (HEIDINGER et al. 2004, DORNSTÄDTER et al. 2008, HESKE et al. 2011, RIEGGER et al. 2012, MALM 2009, MALM & DECKERT 2013 & HUBER 2013). Herkömmliche Messmethoden (z.B. TRTs, TRTs mit Temperatur-Logging, etc.) lassen bislang lediglich qualitätive Aussagen über die Wärmeleitfähigkeitsverteilung der Untergrundgesteine entlang der Bohrstrecke zu. Gerade bei einem komplexen geologischen Aufbau des Untergrundes oder erhöhtem Einfluss durch fließendes Grundwasser in durchteuften Aquiferen, bietet der eTRT gegenüber herkömmlichen Verfahren einen Mehrgewinn an geologischer Information (Kapitel I-2.4), der für die Dimensionierung einer größeren Erdwärmesondenanlage von großer Bedeutung ist.

## II-1.2.1 Messaufbau und -durchführung

Der eTRT wird mittels eines an der Wandung der Erdwärmesondenrohre befestigten Glasfaser-Hybridkabels durchgeführt (DORNSTÄDTER et al. 2008, HESKE et al. 2011, MALM 2009 & MALM & DECKERT 2013). Das Kabel setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen (Abb. II-1.2). Für einen eTRT relevant sind vor allem die je nach Kabelausführung 2-4 Kupferadern (Querschnittsfläche 0,5 bis 1,5 mm<sup>2</sup>), sowie die in einem Schutzröhrchen gebündelten Glasfasern (Multimode G50/125 µm). Eine der Fasern wird an ein Pig-Tail mit E2000-Stecker angespleißt (50 µm Faserkern, sowie 8° Schrägschliff am Faserkontakt). Zur Messung der Temperaturen wird das LWL-Kabel über den Pig-Tail-Anschluss an das DTS-Messgerät angeschlossen.



**Abbildung II-1.2** Schematischer Aufbau eines handelsüblichen LWL-Hybridkabels mit 4 Kupferadern im Querschnitt (links). Spezial-Pig-Tail für DTS-Messungen (rechts, LIOS Technology 2011).

Die Berechnung der tiefenaufgelösten Wärmeleitfähigkeiten entlang des LWL-Kabels erfolgt analog zum Thermal Response Test (Kapitel I-2.3) über die Auswertung von Temperaturanstiegskurven während des gleichmäßigen Erhitzens des Untergrundes (GEHLIN 2002, GEHLIN 1998, SATTEL 1979, KÖNIG 1988).

Die Erhitzung des Untergrundes beim eTRT erfolgt über das Anlegen einer elektrischen Spannung an die Kupferadern des Kabels. Die Heizleistung ist hierbei für jeden Punkt der Kabelstrecke identisch (HUBER 2013). Zeitgleich werden die Temperaturkurven der Glasfaser im Kabel über das DTS-Messgerät bestimmt und aufgezeichnet (Abb. II-1.3). Man erhält somit entsprechend der örtlichen Auflösung DTSder Messeinstellungen eine feste Anzahl von Temperaturanstiegskurven entlang des LWL-Kabels.

Bei der Erwärmung des Untergrundes ist darauf zu achten, dass die elektrische Spannung über den Messzeitraum von ca. 72 Stunden möglichst gleichmäßig bleibt und keine größeren Schwankungen die Messungen stören.



Abbildung II-1.3 Messaufbau des eTRT.

#### II-1.2.2 Auswertung der Ergebnisse

Die mathematischen Grundlagen zur Ermittlung von Untergrund-Wärmeleitfähigkeiten mittels Thermal Response Tests gehen zurück auf das Zylinder- und Linienquellenmodell von CARSLAW & JAEGER (1959), sowie BLACKWELL (1953, 1954 & 1956) und wurden von MOGENSEN (1983) zur Nutzung bei Erdwärmesonden vorgeschlagen. GEHLIN (1998) entwickelte auf Grundlage der Arbeiten von ESKILSON (1987) und HELLSTRÖM (1991) den ersten Versuchsapparat zur Wärmeleitfähigkeitsmessung bei Erdwärmesonden. Der TRT ist mittlerweile zur Standardmethode bei der Ermittlung von Untergrundwärmeleitfähigkeiten geworden (SANNER et al. 2008, FORRER et al. 2008, WITTE et al. 2002 & WAGNER & CLAUSER 2005, WAGNER et al. 2013). Der eTRT bedient sich einer Abwandlung der Nadelsondenmethode (SATTEL 1979 & KÖNIG 1988), die auf den gleichen mathematischen Grundlagen (CARSLAW & JAEGER 1959) beruht.
Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten aus den gemessenen Temperaturanstiegskurven des eTRT erfolgt über Gleichung II-1.1 (nach GEHLIN 2002 & HELLSTRÖM 1991):

$$\lambda = \frac{\dot{q}_L}{4\pi m} = \frac{\dot{q}_L}{4\pi} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(t_i) - \overline{\ln(t)})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(t_i) - \overline{\ln(t)})(t_i - \overline{T})} \quad \text{für } t_1 > \frac{5r_0^2}{\alpha}$$
(II-1.1)

λ Wärmeleitfähigkeit des Messabschnitts [W/(m K)]  $\dot{Q_L}$ Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m] Steigung der Regressionsgeraden durch die Werte im Auswertebereich [-] m Anzahl Temperaturdaten im Auswertebereich [-] n Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s] ti arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte im Auswertebereich [-] ln(t)  $T_i$ Temperatur i der Glasfaser [°C] Ŧ arithmetisches Mittel der Glasfaser-Temperaturwerte [°C] Bohrlochradius [m]  $r_0$ volumetrische Wärmekapazität Untergrund [J/(m<sup>3</sup> K)]  $\rho c_p$  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_m}$ Temperaturleitfähigkeit [m²/s] α mit

Man bezeichnet diese Methode auch als die Langzeitlösung der Wärmeleitungsgleichung für eine ideale Linienquelle in einem homogenen, isotropen Medium (HESKE et al. 2011). Diese Gleichung II-1.1 ist eine Näherung der exakten Lösung (HELLSTRÖM 1991) und gilt nur bei einer konstanten Wärmezufuhr  $\dot{Q}_L$  und wenn der Auswertebereich ( $t_1$  bis  $t_n$ ) der Temperaturen über die logarithmisch aufgetragene Zeit eine quasi-konstante Steigung *m* angenommen hat (Abb. II-2.1). Nach GEHLIN (2002) und HELLSTRÖM (1991) ist dies erfüllt, wenn folgendes Zeitkriterium gilt:  $t_1 > \frac{5r_0^2}{\alpha}$ . Der mathematische Fehler liegt in diesem Fall bei unter 10% (HELLSTRÖM 1991). Beachtet man diese Vorgabe nicht, so kann bei sehr kleinen *t* der Einfluss der Materialwärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials auf die berechnete Gesamtwärmeleitfähigkeit Überhand nehmen und die Werte verfälschen.

Die Eindringtiefe der Temperaturfront in das umliegende Gestein nach einer Zeit *t* kann bei angenommenen isotropen Verhältnissen des Untergrundes mit der thermischen Diffusionslänge abgeschätzt werden (FOWLER 2000, TURCOTTE & SCHUBERT 2002, SPOHN 1997 & HELLSTRÖM 1991):

$$r = \sqrt{\alpha t}$$
 mit  $\alpha = \frac{\lambda_{fluid}\phi + \lambda_{rock}(1-\phi)}{(\rho c_p)_{fluid}\phi + (\rho c_p)_{rock}(1-\phi)}$  bei porösen Medien. (II-1.2)

r	Radius der Temperaturfront [m]
α	Temperaturleitfähigkeit ( $\alpha = \lambda/(\rho c_p)$ ) [m <sup>2</sup> /s]
t	Dauer der konstanten Erhitzung [s]
λ	Wärmeleitfähigkeit Fluid/Gestein [W/(m K)]
$ ho c_p$	volumetrische Wärmekapazität Fluid/Gestein [J/(m³ K)]
φ	Porosität [-]

## II-1.2.3 Auswertung des Relaxationsverhaltens

Zusätzlich zur Auswertung der Temperaturanstiegskurve bei Aufheizung des Untergrundes, ist es möglich, die Abkühlungskurve nach dem Ende der Erhitzung für eine Berechnung der Wärmeleitfähigkeit heranzuziehen (DORNSTÄDTER et al. 2008 & HESKE 2011). Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten aus dem Relaxationsvorgang bedeutet dies nach Gleichung II-1.1:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}_L}{4\pi m_{relax}} = \frac{\dot{Q}_L}{4\pi} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \left( ln\left(\frac{t_i}{t_i - t_h}\right) - \overline{ln}\left(\frac{t}{t_i - t_h}\right) \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left( ln\left(\frac{t_i}{t_i - t_h}\right) - \overline{ln}\left(\frac{t}{t_i - t_h}\right) \right) (T_i - \overline{T})} f \ddot{u}r \ t > t_h \tag{II-1.3}$$

- λ Wärmeleitfähigkeit des Messabschnitts [W/(m K)]
- *Q*<sub>L</sub> Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]
- n Anzahl Temperaturdaten im Auswertebereich [-]
- ti Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]
- th Dauer des Aufheizvorgangs [s]
- m<sub>relax</sub> Steigung der Relaxationsgeraden [K]

 $\ln(\frac{t}{t-t_{*}})$  arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte im Auswertebereich [-]

- T<sub>i</sub> Temperatur i der Glasfaser [°C]
- $\overline{T}$  arithmetisches Mittel der Glasfaser-Temperaturwerte [°C]

### II-1.2.4 Peclét-Zahl-Analyse

Wenn im Untergrund Grundwasserfluss stattfindet, ist die mittels eines TRT bestimmte Wärmeleitfähigkeit die Summe aus der konduktiven Wärmeleitfähigkeit des Gesteins und einem advektiven Anteil, der durch den aktiven Abtransport von Wärme durch das die Erdwärmesonde umströmende Wasser hervorgerufen wird. Die mittels eines TRT oder eTRT berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte liefern somit nur Bestandsaufnahmen der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes zu den während des Tests gegebenen Grundwasserbedingungen. Um mit einem durch advektiven Wärmetransport beeinflussten Wärmeleitfähigkeitswert die Grundwasserfließgeschwindigkeit zu berechnen, bedient man sich der Peclét-Zahl-Analyse. Die Peclét-Zahl ist das Produkt aus der Reynolds- und der Prandtl-Zahl. Mit der Péclet-Zahl kann das Verhältnis zwischen advektivem Wärmeabtransport und konduktiver Wärmeleitung in erster Näherung beschrieben werden (ZSCHOCKE 2005, DORNSTÄDTER et al. 2008, BARCENILLA et al. 2005, SUTTON et al. 2003, CHIASSON et al. 2000). Bei einer Péclet-Zahl größer eins überwiegt der advektive den konduktiven Wärmetransport.

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{\lambda_{total} - \lambda_{kond}}{\lambda_{kond}} = \frac{\lambda_{total}}{\lambda_{kond}} - 1 = \frac{lv\rho c_{p}}{\lambda_{kond}}$$
(II-1.4)

Ре	Péclet-Zahl [-]
Re	Reynolds-Zahl [-]
Pr	Prandtl-Zahl [-]
$\lambda_{kond}$	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein [W/(m K)]
$\lambda_{total}$	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein + advektiver Anteil durch Grundwasserfluss [W/(m K)]
1	charakteristische Länge [m]
v	Fließgeschwindigkeit Grundwasser [m/s]
ρ	Dichte Grundwasser [kg/m <sup>3</sup> ]
Cp	spezifische Wärmekapazität Grundwasser [J/(kg K)]

Hieraus folgt

$$v = \frac{\lambda_{total} - \lambda_{kond}}{l\rho c_{p}}$$
(II-1.5)

Um auf diesem Weg die Fließgeschwindigkeit mit einer ausreichenden Genauigkeit bestimmen zu können, muss die konduktive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bekannt sein (Labormessungen, etc.), oder relativ gut abgeschätzt werden können. Bei bekanntem Grundwasserfluss und unbekannter konduktiver Wärmeleitfähigkeit ist es mit einer Umstellung auf Gleichung II-1.6 ebenfalls möglich hierfür einen Wert zu erhalten.

$$\lambda_{kond} = \lambda_{total} - lv\rho c_{\rm p} \tag{II-1.6}$$

Die Peclét-Zahl-Analyse eignet sich vor allem für eTRTs, da es damit möglich ist, tiefenbezogene Unterschiede in den Gesteinswärmeleitfähigkeiten zu detektieren und man auf diesem Weg Fließhorizonte ausmachen und in erster Näherung charakterisieren kann. Die Berechnung der beschriebenen Parameter mit Hilfe der Peclét-Zahl-Analyse ist abhängig von der Festlegung der charakteristischen Länge. Sie ist Bestandteil der Reynolds-Zahl, beschreibt in der Regel die Abmessungen des um- oder durchströmten Körpers (MESCHEDE 2006), ist prinzipiell jedoch frei wählbar. Sie hängt von der Art des zu lösenden Problemstellung ab (CHIASSON et al. 2000) und wird im Falle von Erdwärmesonden in der

Literatur unterschiedlich festgelegt. CHIASSON et al. 2000 legt die charakteristische Länge in seiner Problemstellung auf den Abstand zwischen zwei Bohrungen fest, BARCENILLA et al. 2005, SUTTON et al. 2003, ZSCHOKE 2005, sowie DORNSTÄDTER et al. 2008 legen sie mit dem Bohrlochdurchmesser der Erdwärmesonde fest.

## II-2. Vergleich zwischen LWL-Messungen und TRTs

Die Vergleichbarkeit von glasfaserbasierten Untergrund-Wärmeleitfähigkeitsmessungen (eTRTs) mit herkömmlichen Thermal Response Tests ist eine zentrale Frage bei der Bewertung der Reproduzierbarkeit von eTRT-basierten Messergebnissen. Aus diesem Grund wurde eine Sonde eines Erdwärmesondenfeldes in Speyer mit einem Glasfaserkabel versehen und an ein faseroptisches Temperaturmesssystem angeschlossen. Die Temperaturen wurden vor, während und nach der Durchführung eines TRT aufgezeichnet.

Das untersuchte Erdwärmesondenfeld dient zur Heizung und Kühlung der Salierschule in Speyer. Die Grundschule wurde 2010 eröffnet und ist mit ihrer Kopplung von Solarthermie, Photovoltaik und Geothermie die erste Energiegewinnschule in Rheinland-Pfalz. Mit der Durchführung des TRT wurde das hydrogeologische Fachbüro André Voutta Grundwasserhydraulik (www.avoutta.de) beauftragt. Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse (die Daten des TRT betreffend) wurden vom Autor der Dissertationsschrift auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Rohdaten bearbeitet und ausgewertet.

## II-2.1 Messdurchführung

Nach dem Start der Erhitzung durch die TRT-Messapparatur wurden zeitgleich die Temperaturen an Vor- und Rücklauf der Sonde durch in das TRT-Messgerät eingebracht Temperaturfühler gemessen, als auch die direkten Temperaturen des Untergrundes im verpressten Bohrloch durch die DTS-Methode. Der Untergrund wurde mit konstanter Leistung über einen Zeitraum von ca. 65 Stunden erhitzt. Die aufgezeichneten Temperaturen beider Messgeräte (TRT-Messung und DTS/LWL-Messung, Anhang 1) wurden analog ausgewertet.

## II-2.2 Ergebnisse der Messungen

Die Ergebnisse der beiden Temperaturmessungen wurden auf eine einheitliche Zeitskala gebracht und gegeneinander geplottet (Abb. II-2.1). Die Kurve der DTS-Messungen mittels des LWL-Kabels beschreibt den Temperaturverlauf des arithmetischen Mittels der Messtrecke (Erdwärmesonde) entlang des Messkabels zum Zeitpunkt x.

Bereits in dieser Abbildung erkennt man, dass der Verlauf der beiden Temperaturkurven sich nicht gravierend voneinander unterscheidet. Die Kurve der DTS-Messungen verläuft leicht niedriger (ca. -0,2 bis 0,3 K), als die Kurve der TRT-Messungen. Dies lässt sich durch den

bereits in Kapitel I-3.3 festgestellten Unterschied zwischen gemessenen Sole- und Glasfaser-Temperaturen erklären.

## II-2.3 Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten

Die Auswertung der Ergebnisse beider Temperaturanstiegskurven erfolgte gemäß Gleichung II-1.1. Der Auswertebereich wurde inversiv durch Einhaltung des Zeitkriteriums bestimmt. Die in den Untergrund eingebachte Heizleistung betrug im Mittel 8253 W bei einer Sondenlänge von 160 m. Aus diesen Werten folgt eine Heizleistung pro Längeneinheit  $\mathbf{Q}_{L}$  von rund **51,6 W/m**.

Die Steigung der Temperaturkurven im Auswertebereich wurde nach der allgemeinen Steigungsformel für Regressionsgeraden bestimmt (Gleichung II-2.1), wobei In(t<sub>i</sub>) die logarithmischen Zeitwerte (natürlicher Logarithmus der kumulierten Sekunden nach Beginn der Aufheizung des Untergrundes) und T die den Zeitwerten zugeordneten Temperaturwerte beschreibt.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\ln(t_i) - \overline{\ln(t_i)})(T_i - \overline{T})}{\sum_{i=1}^{n} (\ln(t_i) - \overline{\ln(t_i)})^2}$$
(II-2.1)

т	Steigung der Regressionsgeraden durch die Werte im Auswertebereich [K]
ti	Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]
$\overline{\ln(t)}$	arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte [-]
Ti	Temperatur i der Glasfaser [°C]
T	arithmetisches Mittel der Glasfaser-Temperaturwerte [°C]

Die beiden Steigungswerte für die TRT-Messung  $m_{TRT}$  und die DTS-Messung  $m_{DTS}$  haben folgende Werte (gerundet auf 2 Stellen hinter dem Komma):

$$m_{TRT} = 1,35 \text{ K}$$
  $m_{DTS} = 1,37 \text{ K}$ 



Abb. II-2.1 Temperaturanstiegskurven der LWL-Messungen und der TRT-Messungen.

Hieraus folgt für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten nach Gleichung II-1.1 (gerundet auf 2 Stellen hinter dem Komma):

$$\lambda_{\text{TRT}} = 3,03 \text{ W/(m K)}$$
  $\lambda_{\text{DTS}} = 3,00 \text{ W/(m K)}$ 

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass die Werte beider Messmethoden nur gering voneinander abweichen (ca. 1,3%). Da der maximale Fehler für Wärmeleitfähigkeitsberechnungen nach dem TRT-Prinzip bei ca. 10% liegt (GEHLIN 2002, HELLSTRÖM 1991), kann man von einer guten Übereinstimmung beider Werte sprechen.

## II-3. Modellierung des eTRT mit Feflow

Der glasfaserbasierte enhanced Thermal Response Test (eTRT) ist mittlerweile eine anerkannte und vielfach validierte Methode zur tiefenaufgelösten Wärmeleitfähigkeitsmessung an Erdwärmesonden (DORNSTÄDTER et al. 2008, HEIDINGER et al. 2004, MALM 2009, MALM & DECKERT 2013, HESKE et al. 2011, RIEGGER et al. 2012). Es bestehen dennoch Detailfragen zur Genauigkeit des Tests, sowie zu seinem Verhalten bei geschichteten, bzw. grundwasserdurchflossenen Gesteinsschichten und seiner Anwendbarkeit bei größeren Spannungsschwankungen der zur Wärmeeinbringung notwendigen Energieversorgung. Diese Fragen lassen sich mittels numerischer Modellierung des Tests bei verschiedenen Bedingungen beantworten. Die Arbeitsweise herkömmlicher TRTs wurde bereits mehrfach numerisch modelliert (SIGNORELLI 2004, SIGNORELLI et al. 2007). Numerische Modellierungen an faseroptischen enhanced Thermal Response Tests hingegen sind bislang noch neu. Aus diesem Grund wurden im Lauf der vorliegenden Arbeit vier verschiedenen Modellreihen entwickelt, die die angesprochenen Problemfelder numerisch simulieren. Zur Modellierung wurde das Programm Feflow<sup>®</sup> 6.0 (DHI-WASY GmbH) verwendet.

Die kommerzielle Software Feflow basiert auf der numerischen Methode der Finiten Elemente. Feflow ist im Bereich der Hydrogeologie und der oberflächennahen Geothermie eins der Standardprogramme zur Modellierung gekoppelter, thermohydraulischer Fragestellungen (DIERSCH 1993). Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine praktische Überprüfung einer bei der Realisierung von Erdwärmesondenprojekten häufig verwendeten Messmethode (eTRT) handelt, wurde das Programm aus Gründen der Nachvollziehbarkeit der Modelle ausgewählt. Zur Erstellung der Modelle wurde die Programmversion 6.0 verwendet.

## II-3.1 Feflow

Die numerischen Berechnungen von Feflow basieren auf den Grundlagen der Boussinesq Approximation. Vollständig gesättigte Grundwasserströmung mit Massen- und insbesondere Wärmetransport in porösen Medien kann über die folgenden Grundgleichungen dargestellt werden (DIERSCH 2005):

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i^f}{\partial x_i} = Q_\rho + Q_{EB}(C, T)$$
(II-3.1a)

mit

$$Q_T = \left[\phi \rho^f c^f + (1 - \phi) \rho^s c^s\right] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho^f c^f q_i^f \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + \rho^f c^f Q_\rho (T - T_0) \quad \text{(II-3.1b)}$$

$$q_i^f = -K_{ij}f_\mu \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_0^f}{\rho_0^f}e_j\right)$$
(II-3.1c)

$$K_{ij} = \frac{k_{ij}\rho_0^f g}{\mu_0^f}$$
(II-3.1d)

$$f_{\mu} = \frac{\mu_0^f}{\mu^f(C,T)}$$
(II-3.1e)

- S<sub>0</sub> spezifischer Speicherkoeffizient (Kompressibilität) [m<sup>-1</sup>]
- h Hydraulic Head [m]
- t Zeit [s]
- qif Vektor der Darcy Geschwindigkeit des Fluids [m/s]
- xi Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
- $Q_{\rho}$  Quellen-/Senkenfunktion des Fluids für Massen ( $Q_{C}$ ), und Wärmetransport ( $Q_{T}$ ) (DIERSCH 2005)
- Q<sub>EB</sub> Term der erweiterten Boussinesq-Approximation (DIERSCH 2005)
- Porosität [-]
- ρ<sup>f</sup> Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>]
- ρ<sup>s</sup> Dichte der Festphase [kg/m<sup>3</sup>]
- cf spezifische Wärmekapazität des Fluids [J/(kg K)]
- c<sup>s</sup> spezifische Wärmekapazität der Festphase [J/(kg K)]
- T Temperatur [°C]
- T<sub>0</sub> Referenztemperatur [°C]
- $\lambda_{ij}$  Tensor hydrodynamischer Thermodispersion [W/(m K)]
- K<sub>ij</sub> Tensor hydraulischer Konduktivität [m/s]
- k<sub>ij</sub> Tensor hydraulischer Permeabilität [m<sup>2</sup>]
- e<sub>j</sub> Gravitations-Einheitsvektor (e<sub>j</sub>=-g<sub>j</sub>/g) [-]
- g Gravitationsbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]
- f<sub>µ</sub> konstitutive Viskositäts-Verhältnisfunktion [-]
- μ<sup>f</sup> dynamische Viskosität des Fluids [Ns/m<sup>2</sup>]

Die Modellreihen wurden stets im vollständig wassergesättigten Raum durchgeführt, weshalb eine Beschreibung der Gleichungen für einen unvollständig wassergesättigten Modellraum (DIERSCH 2005) entfällt.

## Randbedingungen

In Feflow sind die Randbedingungen in Flow-, Mass Transport- und Heat-Randbedingungen unterteilt. Da die vorliegenden Modelle ohne Massentransport gerechnet wurden, sind im Folgenden lediglich die Flow- und die Heat-Randbedingungen von Feflow erläutert (aus DIERSCH 2005).

• Randbedingung erster Art (Dirichlet):

Die Dirichlet-Randbedingung (Hydraulic Head Boundary Condition) weist dem ausgewählten Modellknoten einen konstanten Druckspiegel zu und erzeugt somit einen konstanten Zufluss von hohem zu niedrigem Druckniveau.

$$h(x_i, t) = h_1^R(t)$$
 (II-3.2)

- hHydraulic Head [m]xiRaumkoordinate in einem kartesischen System [m]
- t Zeit [d]
- $h_{i^R} \qquad \mbox{ fester Randbedingungswert für den Hydraulic Head [m]}$
- Randbedingung zweiter Art (Neumann):

Die Neumann-Randbedingung (Flux Boundary Condition) wird für die Festlegung eines bestimmten Zu- oder Abstroms in oder aus dem Modell heraus verwendet.

$$q_{n_h}(x_i, t) = q_h^R(t)$$
 (II-3.3)

- $q_{n_h}$  normaler Darcy Fluss des Fluids [m/d]
- xi Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
- t Zeit [d]
- $q_{h^R}$  fester Randbedingungswert für den Darcy Fluss in oder aus dem Modell [m/d]

# • Randbedingung dritter Art (Cauchy):

Die Cauchy-Randbedingung (Transfer Boundary Condition) ist eine Kombination aus den Randbedingungen erster und zweiter Art und wird verwendet für die Festlegung des Wasseraustauschs mit einem Fließgewässer am Modellrand.

$$q_{n_h}(x_i, t) = -\Phi_h(h_2^R - h)$$
(II-3.4)

- $q_{n_h}$  normaler Darcy Fluss des Fluids [m/d]
- xi Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
- t Zeit [d]
- $\Phi_h$  Fluid-Transfer-Koeffizient [d<sup>-1</sup>]
- h<sub>2<sup>R</sup> fester Randbedingungswert für den Hydraulic Head [m]</sub>

• Randbedingung vierter Art (single well type):

Die Randbedingung vierter Art (Single Well Type Boundary Condition) wird verwendet um eine Punktquelle oder -senke in das Modell einzufügen.

$$Q_{\rho}^{w}(x_{i},t) = Q_{1}^{w}(x_{i},t) \tag{II-3.5}$$

 $Q_{\rho^{W}}$  Quellenfunktion [m<sup>3</sup>/d]

x<sub>i</sub> Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]

t Zeit [d]

Q1<sup>w</sup> fester Randbedingungswert für den Wasserzu- oder -abstrom [m<sup>3</sup>/d]

# Heat-Randbedingungen

 Randbedingung erster Art (Dirichlet):
 Die Dirichlet-Randbedingung (Temperature Boundary Condition) weist dem ausgewählten Modellknoten einen konstanten Temperaturwert zu und erzeugt somit einen konstanten Wärmezufluss von hohem zu niedrigem Temperaturniveau.

$$T(x_i, t) = T_1^R(t)$$
 (II-3.6)

T Temperatur [°C]

xi Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]

t Zeit [d]

Ti<sup>R</sup> fester Randbedingungswert für die Temperatur [°C]

# • Randbedingung zweiter Art (Neumann):

Die Neumann-Randbedingung (Heat Flux Boundary Condition) wird für die Festlegung eines bestimmten Wärmezu- oder -abstroms in oder aus dem Modell heraus verwendet.

$$q_{n_T}(x_i, t) = q_T^R(t)$$
 (II-3.7)

 $q_{n_T}$  normaler Wärmefluss [J/m<sup>2</sup>/d]

- xi Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
- t Zeit [d]
- $q_T^R$  fester Randbedingungswert für den Wärmefluss in oder aus dem Modell [J/m<sup>2</sup>/d]

• Randbedingung dritter Art (Cauchy):

Die Cauchy-Randbedingung (Transfer Boundary Condition) ist eine Kombination aus den Randbedingungen erster und zweiter Art und wird verwendet für die Festlegung des Wasseraustauschs mit einem Fließgewässer am Modellrand.

$$q_{n_T}(x_i, t) = -\Phi_T(T_3^R - T)$$
(II-3.8)

$q_{n_T}$	normaler Wärmefluss [J/m²/d]
Xi	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
$\Phi_{\text{T}}$	Wärme-Transfer-Koeffizient [J/m²/K/d]
$T_3^R$	fester Randbedingungswert für die Temperatur [°C]

 Randbedingung vierter Art (heat sink/source type):
 Die Randbedingung vierter Art (Heat Sink/Source Type Boundary Condition) wird verwendet um eine Wärmepunktquelle oder -senke in das Modell einzufügen.

$$Q_T^w(x_i, t) = Q_1^W(x_i, t)$$
(II-3.9)

$Q_{T^{W}}$	Wärmequellenfunktion [J/d]
Xi	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
$Q_{1^{W}} \\$	fester Randbedingungswert für den Wärmezu- oder -abstrom [J/d]

# Effektive Gesteinsparameter

Feflow betrachtet den Modellraum als Zwei-Phasen-System bestehend aus einem soliden und einem fluiden Teil. Der jeweilige Anteil des entsprechenden Parameters (Wärmeleitfähigkeit oder volumetrische Wärmekapazität) wird über die Porosität, also den Anteil von flüssiger zu fester Phase bestimmt (DIERSCH 2005):

$$P_{total} = P_{fluid}\phi + P_{solid}(1-\phi) \tag{II-3.10}$$

 $\begin{array}{ll} P_{total} & \mbox{Gesamtparameter} (\lambda \mbox{ oder } \rho c_p) \left[ W/(m \ K) \ \mbox{oder } J/(m^3 \ K) \right] \\ P_{fluid} & \mbox{Fluidparameter} (\lambda \ \mbox{oder } \rho c_p) \left[ W/(m \ K) \ \mbox{oder } J/(m^3 \ K) \right] \\ P_{solid} & \mbox{Gesteinsparameter} (\lambda \ \mbox{oder } \rho c_p) \left[ W/(m \ K) \ \mbox{oder } J/(m^3 \ K) \right] \\ \varphi & \mbox{Porosität [-]} \end{array}$ 

Die in Feflow verwendeten mathematischen Grundlagen und Gleichungen können im Detail in der Programmdokumentation "FEFLOW Reference Manual (DIERSCH 2005)", sowie den "FEFLOW White Papers I bis V" (DHI-WASY 2005a, 2005b & 2005c, DHI-WASY 2006 & DHI-WASY 2010) nachgelesen werden.

## II-3.2 Modellaufbau

Die im Folgenden aufgeführten und beschriebenen Modelle sollen einen dreitägigen eTRT mit unterschiedlichen Parametern (z.B. verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes und der Verpressung der Sonde, unterschiedliche Sondengeometrie, Änderungen der Heizleistung, Grundwasserfluss, etc.) simulieren.

## II-3.2.1 Geometrie

Die im Rahmen der Dissertation erstellten dreidimensionalen Modelle besitzen eine quadratische Grundfläche von 10 m x 10 m und eine je nach Modellreihe unterschiedliche Tiefe. Der Mittelpunkt der Modellgrundfläche beschreibt ebenfalls den Mittelpunkt der diskretisierten Erdwärmesonde (Abb. II-3.1). Die Entfernung der Modellgrenzen vom Sondenmittelpunkt (5 m) wurde so gewählt, dass die Temperaturfront die Modellgrenze erst nach einer dreiwöchigen, konstanten Einheizphase (bei  $\alpha \approx 6 \cdot 10^{-6}$  W/m<sup>2</sup>) erreichen würde (Gleichung II-1.2). Der Abstand der Temperaturfront von der Heizquelle nach einer dreitägigen Heizperiode liegt selbst bei einer sehr hohen Temperaturleitfähigkeit bei ca. 1,9 m. Aus diesem Grund kann man davon ausgehen, dass die Modellgrenzen die Temperaturentwicklung im zentralen Bereich des Modells nicht beeinflussen.

Außerhalb des eigentlichen Bohrdurchmessers wurde eine Zone des Sondennahfeldes (Radius 1 m) eingerichtet (Abb II-3.1) innerhalb derer das Meshing verfeinert werden konnte. Der Bohrlochdurchmesser ist mit 20 cm sehr groß gewählt (Abb. II-3.1). Gängige Erdwärmesondenbohrungen besitzen meist einen Maximaldurchmesser von ca. 15-16 cm oder kleiner. Dieser im Modell vergrößerte Bohrlochdurchmesser wurde gewählt, um eine maximal mögliche Beeinflussung der ermittelten Ergebnisse durch die Verpressungszone zu erreichen. Wäre der Bohrlochdurchmesser kleiner, so würden eventuell in der Realität bei Bohrungen auftretende Auskolkungen des Bohrlochs während des Bohrvorgangs nicht berücksichtigt werden. Der vergrößerte Durchmesser simuliert somit eine Art worst-case-Szenario.



**Abbildung II-3.1** Modellgeometrie des Gesamtmodells, des Sondennahfeldes und der Sondenquerschnitts für Modellposition 1 (v.l.n.r., Abmessungen in Tab. II-3.1, Modellpositionen in Abb. II-3.3). Die Superelemente des Modells sind grau und schwarz umrandet, die Punkte sind rot und begrenzen die Superelemente.

Die Erdwärmesondenrohre sind in den folgenden Modellierungen statisch mit einem konstanten Abstand von 3,5 cm vom Bohrlochmittelpunkt und einem Winkel von jeweils 45° zueinander angeordnet. Dieser Rohrabstand von 7 cm (Abb. II-3.2) wird u. a. vom Standard-Programm zur Dimensionierung von Erdwärmesonden EED als empfohlener Abstandswert gehandelt. Dieser Rohrabstand kann in der Realität mit an den Sondenrohren angebrachten Abstandshaltern erreicht werden. Die Abstandshalter werden eingebaut, um eine gegenseitige Beeinflussung der Rohre zu minimieren und einen thermischen Kurzschluss zwischen auf- und abfließendem Solefluid bei aneinander liegenden Rohrbündeln zu verhindern. Es wurden die Daten und Abmessungen handelsüblicher PE-DN32er-Erdwärmesondenrohre verwendet, d.h. der Außendurchmesser der Erdwärmesondenrohre beträgt 32 mm und die Wandstärke 3 mm (Tab. II-3.1).

Das modellierte LWL-Kabel besitzt einen Durchmesser von 15 mm (Tab. II-3.1) und ist je nach Modell unterschiedlich im Bohrloch positioniert (Abb. II-3.2). Die Temperaturzuführung als auch die Temperaturaufzeichnung über die Messzeit erfolgte jeweils immer im Mittelpunkt der LWL-Kabel. Tabelle II-3.1 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten, geometrischen Modelleinheiten.

Bezeichnung	Wert
Modellbreite & -höhe x, y [m]	10
Radius Sondennahfeld r <sub>SNF</sub> [m]	1
Bohrradius r <sub>0</sub> [m]	0,1
Rohrabstand z <sub>A</sub> [m]	0,07
Außenrohrdurchmesser d <sub>AR</sub> [m]	0,032
Stärke Rohrwand s <sub>RW</sub> [m]	0,003
Durchmesser LWL-Kabel dLWL [m]	0,015

Tabelle II-3.1 Geometrie des Sondenquerschnitts (siehe Abb. II-3.2).

Die Modell-Geometrie wurde durch das Hinzufügen von Punktdaten, die mittels eines eigens entwickelten, externen Skripts erstellt wurden, erzeugt. Die Punktdaten wurden in Feflow mit Superelement-Polygonen verbunden. Jeder der in Abbildung II-3.1 grau hinterlegten Bereiche zwischen den Verbindungslinien der roten Punkte bezeichnet ein Superelement des Modells. Die einzelnen Modelle besitzen jeweils 127 Punkte und 104 Superelemente (Abb. II-3.1). Jedem Superelement wird beim Meshing des Modells eine je nach Einstellung unterschiedliche Anzahl von Knoten zugeordnet.

Insgesamt wurden 6 verschiedene Modellgeometrien erstellt (Abb. II-3.3), um eine unterschiedliche Position der LWL-Kabel innerhalb des Bohrlochs simulieren zu können.



**Abbildung II-3.2** Schema des Sondenquerschnitts (die roten Kreise entsprechen den verbauten LWL-Kabeln; Abmessungen in Tab. II-3.1).



Abbildung II-3.3 Modellpositionen des LWL-Kabels innerhalb des Bohrlochs der eTRT-Modelle.

#### II-3.2.2 Meshing

Zur Erstellung des Meshs wurde der in Feflow integrierte "Triangle Mesh Generator (© J. R. Shewchuk, v. 1.6 (2005))" verwendet. Der minimale Winkel an Knotenpunkten wurde mit 20° definiert und ein Refinement entlang ausgewählter Ränder der Polygone eingestellt. Zum Refinement ausgewählt wurden alle Polygonränder innerhalb des Bohrlochs. Dem Mesh-Generator wurde eine Anzahl von ca. 40.000 Knoten vorgegeben, die gradiert über die Modellfläche verteilt wurden (fein im Sondennahfeld, feiner im Bohrloch). Jede Schicht (Layer) der Modelle besteht aus ca. 80.000 Elementen (Tab. II-3.19). Das Meshing wurde für alle 6 Varianten der LWL-Kabelposition durchgeführt. In Abbildung II-3.4 ist das Mesh für Modellposition 1 (Abb. II-3.3) beispielhaft dargestellt.



Abbildung II-3.4 Meshing für Modellposition 1 (Abmessungen in Tab. II-3.1, Modellpositionen in Abb. II-3.3).

## II-3.2.3 3D-Einstellungen

In Feflow sind die Modelle sind aus Layern und Slices aufgebaut, wobei ein Layer eine weitgehend horizontale, dreidimensionale Zwischenschicht zwischen zwei zweidimensionalen Slices (Zwischenflächen) darstellt (Abb. II-3.5). Die Einstellungen zum dreidimensionalen Aufbau der Modelle sind je nach Modellreihe unterschiedlich. Während Modellreihe "FEFLOW eTRT\_04" und "FEFLOW eTRT\_06" jeweils lediglich aus 2 Layern (3 Slices) bestehen, besitzen die Modellreihen "FEFLOW eTRT\_05" und "FEFLOW eTRT\_07" jeweils 15 Layer (16 Slices) (Abb. II-3.5). Jede der Schichten (Layer) besitzt eine Dicke von 1 m. Bei allen wurden die Parameter des Modells von der obersten Schicht auf alle unteren projiziert. Lediglich bei Modellreihe "FEFLOW eTRT\_05" und "FEFLOW eTRT\_07" wurden den mittleren Schichten unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen (siehe Kapitel II-3.3.2 & II-3.3.4).



## II-3.2.4 globale Randbedingungen und Parameter

Die jeweiligen Modellreihen mit ihren je 6 Modellgeometrien (Kapitel II-3.2.1) besitzen einige gemeinsame Randbedingungen und Modellparameter. Die gemeinsamen Randbedingungen und Parameter sind im Folgenden aufgeführt, die restlichen sind im jeweiligen Kapitel "Modellreihen" (Kapitel II-3.3) aufgeführt.

## Randbedingungen

Die Randbedingungen sind in Feflow in "Flow" und "Heat"-Randbedingungen unterteilt. Da die Temperaturen innerhalb des Modells die Zielgröße der Modellierungen ist, wurde weder im Inneren der Modelle, noch an den Rändern "Heat"-Randbedingungen angelegt. Bei einer Nichtangabe von Randbedingungen an den Modellrändern besitzen die Randzellen bei Feflow automatisch "no flow"-Eigenschaften.

Die "Flow"-Randbedingungen sind von Modellreihe zu Modellreihe variabel und in den entsprechenden Kapiteln gesondert aufgeführt. Grundsätzlich wurde bei den vorliegenden Modellen mit der "Hydraulic Head"-Randbedingung gearbeitet (erster Art / Dirichlet-Randbedingung, Gleichung II-3.2), die dem ausgewählten Knoten einen konstanten Druckspiegel zuweisen und einen in der Menge variablen Fluss von hohem zu niedrigem Druckniveau erzeugen.

## Modellparameter

Den Modelleinheiten wurde eine Vielzahl einzelner Parameter zugeordnet (Tab. II-3.2). Die als variabel angegeben Einheiten werden in den entsprechenden Kapiteln aufgeführt. Die den Modellen zugewiesenen Werte wurden an Literaturwerten (CLAUSER & HUENGES 1995, ČERMÁK & RYBACH 1982, VDI 4640 Blatt 1 2010) angelehnt.

	In the Lem	La Marta	Description	Devestit	Male was a taile also	14/2
	Initialer	Initiale	Durchlassig-	Porositat	volumetrische	vvarme-
	Hydraulic	Temperatur	keitsbeiwert		Wärmekapazität	leitfähigkeit
	Head				Feststoff	Feststoff
		To	k <sub>f</sub>	φ	ρc <sub>p</sub>	λ
	[m]	[°C]	[m/s]	[-]	[MJ/(m³ K)]	[W/(m K)]
Gestein	1	10	1·10 <sup>-4</sup>	variabel	2	variabel
Bohrlochverfüllung	1	10	1⋅10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	2	variabel
Rohrwand	1	10	1·10 <sup>-14</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	2,016	0,42
Rohrfüllung	1	10	0,1	0,5	4,2	0,59
LWL-Kabel	1	10	1·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	2	2

 Tabelle II-3.2 Globale Modellparameter.

Wärmeleitfähigkeit Fluid:

0,59 W/(m K) 4,2 MJ/(m<sup>3</sup> K)

Volumetrische Wärmekapazität Fluid:

## Wärmeeintrag

Zur Simulation eines eTRT wurde dem jeweiligen Mittelpunktsknoten der beiden im Bohrloch befindlichen LWL-Kabel (Abb. II-3-2) eine Wärmeleistung pro Zeit aufgeprägt. Als Methode des Wärmeeintrags wurde die Heat Sink/Source-Randbedingung (Randbedingung vierter Art) ausgewählt, da diese einem Wärmeeintrag entlang einer Linie (Verbindung der Knoten über die Tiefe) entspricht (DIERSCH 2005). Ein durchschnittlicher Richtwert für die eingebrachte Wärmeleistung bei eTRTs entspricht ca. 15 W/m Kabelstrecke. Entsprechend diesem Wert wurden an den Modellknoten die folgenden Wärmeleistungen aufgebracht:

Mittlere Slices LWL-Kabel-Mittelpunkt:	1,296.10 <sup>6</sup> J/d entspricht 15 W/m
Oberster und unterster Slice LWL-Kabel-Mittelpunkt:	0,648.10 <sup>6</sup> J/d entspricht 15 W/m

#### Zeitparameter

Als Grundeinstellung der Modellreihen wurde die Einstellung "Steady Flow / Transient Transport" gewählt. Die Gesamtdauer der simulierten Versuchsdurchführung beträgt analog zu den Empfehlungen für einen herkömmlichen TRT/eTRT 3 Tage (72 Stunden). Zur Festlegung der Zeitschritte wurde eine automatische Zeitschritt-Einstellung (Forward Adams-Bashforth / Backward Trapezoid, AB/TR) gewählt. Für den ersten Zeitschritt der Iteration wurde eine Länge von 0,0001 d angesetzt. Eine obere Grenze der Zeitschrittgröße wurde mit 0,01 d festgelegt.

## Messung der Temperatur

Der Temperaturanstieg nach dem Start des simulierten Wärmeeintrags wird in den Mittelpunktsknoten der beiden LWL-Kabel kontinuierlich bis zum Ende der Testperiode gemessen und aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgt über auf die Knoten gesetzte "Observation Points".

## Auswertebereich

Der Bereich für die eTRT-Auswertung wird aus Gründen der Vergleichbarkeit ohne Rücksicht auf das Zeitkriterium bei allen Modelle wie folgt festgelegt:  $2 d \le Auswertebereich \le 3 d$  $(t_1 = 2 d, t_n = 3 d)$ . Aufgrund des vergrößerten Bohrradius (Kapitel II-3.2.1) und des festgelegten Auswertebereichs, kann das Zeitkriterium (Kapitel II-1.2.2, Gleichung II-1.1) in einigen der Modelle nicht eingehalten werden. Da das Zeitkriterium eine Art Kontrollgröße für die praktische Durchführung des TRT darstellt und das Ziel der vorliegenden Modellierungen ein Vergleich der durch unterschiedliche Parameter entstandenen Fehler ist, kann jedoch auf die Einhaltung des Zeitkriteriums verzichtet werden.

## II-3.3 Modellreihen

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wurden vier verschiedene Modellierungsreihen gerechnet, um die Messmethode des eTRT numerisch zu überprüfen. Die Modellreihen teilen sich auf in eine Betrachtung des reinen konduktiven Wärmetransports mit einem konstanten Wärmeeintrag (Kapitel II-3.3.1), eine Modellierungsreihe mit einer drei-Schicht-Modellgeometrie (Kapitel II-3.3.2), eine Betrachtung des reinen konduktiven Wärmetransports mit einem variablen Wärmeeintrag (Kapitel II-3.3.3), sowie in die Modellierung einer durch advektiven Wärmeabtransport mittels fließendem Grundwassers beeinflussten Erdwärmesonde (Kapitel II-3.3.4).

## II-3.3.1 Modellreihe mit reiner Konduktion

Die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_04" wurde erstellt, um die Auswirkungen verschiedener Kabelpositionen im Bohrloch, sowie unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten des Umgebungsgesteins und der Bohrlochverpressung zu testen. Es wurden insgesamt 30 Modellszenarien gerechnet (Tab. II-3.4) und die Temperaturen im Inneren der LWL-Kabel aufgezeichnet.

## Randbedingungen

Die Heat-Randbedingungen sind gemäß Kapitel 3.2.4 gewählt. Jedem Knoten des gesamten Modellbereichs wurde eine Hydraulic Head Boundary Condition (erster Art, Dirichlet Boundary Condition) mit einem gemeinsamen, festen Druckspiegel von 1 m zugewiesen. Da es so im gesamten Modell keinen Druckgradienten zwischen den einzelnen Knoten gibt, kommt es zu keiner Wasserbewegung im Modellgebiet und somit zu einem reinen konduktiven Wärmetransport.

## Modellparameter

Die Parameter der Modelleinheiten wurden gemäß Kapitel 3.2.4 gewählt. Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Modelleinheiten werden in Feflow mit der Porosität und der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Fluids (Kapitel 3.2.4) zu Gesamtwerten verrechnet (Gleichung II-3.10). Der Porosität des Gesteins wurde deshalb ein niedriger Wert von 1.10<sup>-5</sup> zugewiesen, um den Einfluss der Fluideigenschaften zu minimieren.

Die Modellreihe besteht aus insgesamt 5 verschiedenen Variationen von Gesteins- und Verpressungswärmeleitfähigkeit (Tab. II-3.3), die jeweils mit den 6 Modellgeometrien (Abb. II-3.3) kombiniert wurden. Tabelle II-3.4 zeigt die Modellnamen aller 30 Kombinationen inkl. der verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten und Positionen.

	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5
	λ [W/(m K)]				
Gestein	2	4	2	4	1
Verpressung	2	2	0,8	0,8	2

Tabelle II-3.3 Wärmeleitfähigkeitskombinationen des Gesteins und des Verpressmaterials.

Tabelle II-3.4 Modellnamen der Modellreihe eTRT\_04 (Einzelnamen

bestehend aus "Name der Modellreihe"-"Nr. Modell"."Modellposition").

ModelIname	Wärmeleitfähigke	Modellposition	
	Gestein	Verpressung	(Abb. II-3.3)
	[W/(m K)]	[W/(m K)]	
eTRT_04-1.1	2	2	1
eTRT_04-1.2	2	2	2
eTRT_04-1.3	2	2	3
eTRT_04-1.4	2	2	4
eTRT_04-1.5	2	2	5
eTRT_04-1.6	2	2	6
eTRT_04-2.1	4	2	1
eTRT_04-2.2	4	2	2
eTRT_04-2.3	4	2	3
eTRT_04-2.4	4	2	4
eTRT_04-2.5	4	2	5
eTRT_04-2.6	4	2	6
eTRT_04-3.1	2	0,8	1
eTRT_04-3.2	2	0,8	2
eTRT_04-3.3	2	0,8	3
eTRT_04-3.4	2	0,8	4
eTRT_04-3.5	2	0,8	5
eTRT_04-3.6	2	0,8	6
eTRT_04-4.1	4	0,8	1
eTRT_04-4.2	4	0,8	2
eTRT_04-4.3	4	0,8	3
eTRT_04-4.4	4	0,8	4
eTRT_04-4.5	4	0,8	5
eTRT_04-4.6	4	0,8	6
eTRT_04-5.1	1	2	1
eTRT_04-5.2	1	2	2
eTRT_04-5.3	1	2	3
eTRT_04-5.4	1	2	4
eTRT_04-5.5	1	2	5
eTRT_04-5.6	1	2	6

## II-3.3.2 Modellreihe Konduktion bei einem 3-Schicht-Modell

Die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_05" wurde erstellt um die Auswirkung von vertikalen Schichtwechseln mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde die Modellgeometrie von Modellposition 1 um 15 Layer à 1 m Dicke erweitert. Den mittleren Layern zwischen 6 m und 9 m Tiefe wurden hier, im Vergleich zu den Schichten ober- und unterhalb, unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen. Es wurden insgesamt 3 Modellszenarien gerechnet (Tab. II-3.5) und die Temperaturen im Inneren der LWL-Kabel aufgezeichnet.

## Randbedingungen

Die Heat-Randbedingungen sind gemäß Kapitel 3.2.4 gewählt. Jedem Knoten des gesamten Modellbereichs wurde eine Hydraulic Head Boundary Condition (erster Art, Dirichlet Boundary Condition) mit einem gemeinsamen, festen Druckspiegel von 1 m zugewiesen. Da es so im gesamten Modell keinen Druckgradienten zwischen den einzelnen Knoten gibt, kommt es zu keiner Wasserbewegung im Modellgebiet und somit zu einem reinen konduktiven Wärmetransport.

## Modellparameter

Die Parameter der Modelleinheiten wurden gemäß Kapitel 3.2.4 gewählt. Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Modelleinheiten werden in Feflow mit der Porosität und der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Fluids (Kapitel 3.2.4) zu Gesamtwerten verrechnet. Der Porosität des Gesteins wurde ein deshalb niedriger Wert von 1.10<sup>-5</sup> zugewiesen, um den Einfluss der Fluideigenschaften zu minimieren.

Die Modellreihe besteht aus insgesamt 3 verschiedenen Variationen von Gesteinswärmeleitfähigkeit der mittleren Gesteinsschicht (Tab. II-3.5).

Tabelle II-3.5 Modellnamen der Modellreihe eTRT\_05 (Einzelnamenbestehend aus "Name der Modellreihe"-"Nr. Modell).

ModelIname	Wärmeleitfähigkeit Gestein			
	Layer 1 bis 6	Layer 7 bis 9	Layer 10 bis 15	
	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[W/(m K)]	
eTRT_05-1	2	1	2	
eTRT_05-2	2	2	2	
eTRT_05-3	2	3	2	

## II-3.3.3 Modellreihe Konduktion mit Wärmeeintragsänderungen

Änderungen der elektrischen Spannung (und damit der in den Untergrund eingebrachten Wärmeleistung) während der Testdurchführung sind eine der großen Unsicherheiten während der Durchführung von TRTs oder eTRTs. Um die Auswirkungen von Spannungsabfällen, bzw. -anstiegen, sowie variable Spannungsänderungen zu simulieren, wurde die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_06" erstellt. Als Ausgangsmodell wurde das Modell "FEFLOW eTRT\_04-1.1" gewählt (Kapitel II-3.3.1). Alle Randbedingungen und Parameter der folgenden Modelle wurden analog zu diesem Startmodell gesetzt. Die einzige variable Randbedingung ist in der vorliegenden Modellreihe der Wärmeeintrag über die Mittelpunkte der Glasfaserkabel (Tab. II-3.6, Abb. II-3.6).

Der Bezugswärmeeintrag ist bei den folgenden Modellen der Eintrag gemäß Kapitel II-3.2.4:

Mittlere Slices LWL-Kabel-Mittelpunkt: Oberster und unterster Slice LWL-Kabel-Mittelpunkt:  $1,296 \cdot 10^6$  J/d entspricht 15 W/m  $0,648 \cdot 10^6$  J/d entspricht 15 W/m

**Tabelle II-3.6** Änderung des Wärmeeintrags mit Bezug zumAusgangsmodell "FEFLOW eTRT\_04-1.1".

ModelIname	Änderung des Wärmeeintrags
	über die Messzeit [%]
eTRT_06-1	+25%
eTRT_06-2	+15%
eTRT_06-3	+5%
eTRT_06-4	-5%
eTRT_06-5	-15%
eTRT_06-6	-25%
eTRT_06-7	±5% (sinusförmige Variation, Abb. II-3.6)
eTRT_06-8	0% (entspricht "eTRT_04-1.1")



**Abbildung II-3.6** Sinusförmige Variation (±5% in Bezug auf den Bezugswärmeeintrag) des Wärmeeintrags von Modells "eTRT\_06-7" (Q<sub>i</sub> bezeichnet den Wärmeeintrag an den Knoten der mittleren Slices, Q<sub>b</sub> den Wärmeeintrag an den Knoten der äußeren Slices).

## II-3.3.4 Modellreihe 3-Schicht-Modell mit Grundwasserfluss

Fließendes Grundwasser im Nahbereich einer Erdwärmesonde führt zu einer Erhöhung der berechneten effektiven Wärmeleitfähigkeit bei der Durchführung von TRTs. Die mittels des TRT in den Untergrund eingebrachte Wärme wird aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers aufgenommen und advektiv aus dem Nahbereich der Sonde gebracht (siehe auch Kapitel II-1.2.4). Dies führt zu einer im Testergebnis vermeintlich höheren Wärmeleitfähigkeit des die Sonde umgebenden Gesteins. Die Auswirkungen von Grundwasserfluss auf herkömmliche TRTs ist bereits vielfach beobachtet und untersucht (HÄHNLEIN et al. 2010, CHIASSON et al. 2000, GEHLIN & HELLSTRÖM 2003, WAGNER et al. 2013, DIAO et al. 2004, BARCENILLA et al. 2005, SUTTON et al. 2003, HUBER & ARSLAN 2012, LEE & LAM 2007, WITTE 2002, & ZSCHOCKE et al. 2005). Haupteinflussgröße ist die Grundwasserfließgeschwindigkeit. Nach dem Gesetz von Darcy (Gleichung II-3.11) steht die Durchflussrate V bei isotropen, porösen Medien in direkter Abhängigkeit zum hydraulischen Gradienten (Druckgefälle,

Gleichung II-3.12) der durchströmten Fläche, sowie dem Durchlässigkeitsbeiwert (LANGGUTH & VOIGT 2004):

$$V = k_f F i \tag{II-3.11}$$

mit

$$i = \frac{h}{l} \tag{II-3.12}$$

Hieraus ergibt sich für die Filter- oder Darcygeschwindigkeit v<sub>f</sub> (HÖLTING & COLDEWEY 2009):

$$v_f = \frac{v}{F} = k_f i \tag{II-3.13}$$

- V Durchflussrate [m<sup>3</sup>/s]
- k<sub>f</sub> Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
- F durchströmte Fläche [m<sup>2</sup>]
- i hydraulischer Gradient [-]
- h Druckhöhenunterschied [m]
- l Länge der Fließstrecke [m]
- v<sub>f</sub> Filtergeschwindigkeit [m/s]

Die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_07" simuliert einen aus drei Schichten aufgebauten Untergrund. Auf der obersten und der untersten Schicht findet hierbei kein Grundwasserfluss statt. Die mittlere Schicht ist permeabel und je nach Modell durch eine unterschiedliche Filtergeschwindigkeit des fließenden Grundwassers gekennzeichnet. Das Modell besteht aus 15 Layern mit einer jeweiligen Dicke von 1 m. Die mittlere Schicht befindet sich zwischen 6 und 9 m Tiefe (Layer 7 bis 9). Die Geometrie und das Meshing des Modells entspricht dem Modell "FEFLOW eTRT\_04-1.1".

## Randbedingungen

Die Heat-Randbedingungen sind gemäß Kapitel 3.2.4 gewählt. Dem gesamten Modell wurde ein initialer Hydraulic Head von 1 m zugewiesen. Dem gesamten Modell wurden keine Hydraulic Head Boundary Conditions (erster Art, Dirichlet Boundary Condition) zugewiesen, bis auf die mittlere Schicht. Dort sind die Randbedingungen entsprechend Tabelle II-3.7 zugewiesen.

ModelIname	Hydraulic Head Boundary Condition der mittleren Schicht (Slice 7 bis 10)		
	Linker Rand des Meshs [m]	Mitte des Meshs [m]	Rechter Rand des Meshs [m]
eTRT_07-1	2	-	1
eTRT_07-2	1,5	-	1
eTRT_07-3	1,1	-	1
eTRT_07-4	1,05	-	1
eTRT_07-5	1,01	-	1

 Tabelle II-3.7 Hydraulic Head Boundary Condition-Verteilung der Modellreihe eTRT\_07.

Modellparameter und Grundwasserfließgeschwindigkeit

Die Heat Parameter wurden entsprechend dem Modell "FEFLOW eTRT\_04-1.1" gewählt. Die Flow Parameter sind in Tabelle II-3.8 aufgeführt. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  wurde im gesamten Modell auf einen Wert von1·10<sup>-4</sup> m/s festgelegt. Entsprechend der gewählten Randbedingungen und Parameter, ergibt sich bei einer steady state-Modellierung der Fließbedingungen die folgende Filtergeschwindigkeitsverteilung für die simulierten Modelle (Tab. II-3.8):

**Tabelle II-3.8** Flow Parameter und Filtergeschwindigkeiten in den mittleren Schichten der Modellreihe eTRT\_07(berechnet gemäß Gleichung II-3.11, II-3.12 & II-3.13).

ModelIname	Druckhöhen- unterschied h	Länge der Fließstrecke I	Hydraulischer Gradient i	Durchlässigkeits -beiwert k <sub>f</sub>	resultierende Filtergeschwindig- keit v <sub>f</sub>
	[m]	[m]	[-]	[m/s]	[m/s (m/d)]
eTRT_07-1	1	10	0,1	1.10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-5</sup> (0,864)
eTRT_07-2	0,5	10	0,05	1·10 <sup>-4</sup>	5-10 <sup>-6</sup> (0,432)
eTRT_07-3	0,1	10	0,01	1·10 <sup>-4</sup>	1-10 <sup>-6</sup> (0,0864)
eTRT_07-4	0,05	10	0,005	1·10 <sup>-4</sup>	5-10 <sup>-7</sup> (0,0432)
eTRT_07-5	0,01	10	0,001	1.10 <sup>-4</sup>	1-10 <sup>-7</sup> (0,00864)

Da in dem vorliegenden Modell der advektive Wärmeabtransport durch fließendes Grundwasser untersucht werden soll, wurde für den durchströmten, mittleren Teil des Modells eine Porosität von 0,1 angesetzt. Da Feflow die Gesamtwärmeleitfähigkeit aus den jeweiligen Anteilen von Gesteins- und Fluidwärmeleitfähigkeit über die Porosität bestimmt (Gleichung II-3.10), wurde die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins  $\lambda_{solid}$  so erhöht, dass die Gesamtwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{total}$  einen Wert von 2 W/(m K) annimmt ( $\lambda_{solid} = 2,157$  W/(m K)). Die Wärmekapazität von Fluid und Gestein hingegen blieben unverändert zu den Angaben in Kapitel II-3.2.4.

## II-3.4 Ergebnisse der Modellreihen

In allen vier Modellierungsreihen wurden jeweils in den Mittelpunktsknoten der Glasfaserkabel (Abb. II-3.2) die Temperaturen pro Zeitschritt des Modells aufgezeichnet. Der Temperaturanstieg jedes einzelnen in den Modellen gesetzten Observation Points kann so gemäß Gleichung II-1.1 ausgewertet werden. Die so bestimmten Wärmeleitfähigkeiten können dann mit dem je nach Modell für das umgebende Gestein festgesetzten Wert verglichen werden.

## II-3.4.1 Modellreihe mit reiner Konduktion

Die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_04" besteht aus insgesamt 30 Einzelmodellen mit je zwei Observation Points (OP), an denen der Temperaturanstieg während des Modelldurchlaufs aufgezeichnet wird. Die beiden OPs befinden sich auf dem jeweils mittleren Slice des jeweiligen 2-Layer-Modells. Da beide OPs im Mittelpunktsknoten des Glasfaserkabels und beide Kabel radialsymmetrisch zum Bohrlochmittelpunkt innerhalb des Bohrlochs liegen, kann man davon ausgehen, dass die Temperaturen sich pro Zeitabschnitt zwischen den beiden OPs nicht oder nur minimal verändern (Vergleiche zwischen den Temperaturkurven der beiden OPs haben dies bestätigt; die Unterschiede beginnen in der 4. Nachkommastelle). Aus diesem Grund wurden lediglich die Temperaturwerte von OP 1 zur Auswertung (Tab. II-3.10, Abb. II-3.18) und zur Abbildung in den Temperaturplots (Abb. II-3.13 bis II-3.17) herangezogen.

Die Temperatur breitet sich radial von den Glasfaserkabeln aus. Je nachdem, ob die beiden Glasfaserkabel nah am Bohrlochrand oder eng zusammen in der Mitte sitzen, erfolgt die Ausbreitung der Temperatur vor allem im Bohrloch selbst entweder annähernd radial oder oval bis hantelförmig bei weiter auseinander stehenden Glasfaserkabeln innerhalb der Modellgeometrie (Abb. II-3.7).



Abbildung II-3.7 Ausbreitung der Temperatur von Modell "eTRT\_04-1.1" nach 3 Tagen Erhitzung.

Legt man zur groben Abschätzung der Reichweite der Temperaturausbreitung in einem isotropen Medium Gleichung II-1.2 zugrunde, so ergibt sich eine Ausbreitungsverteilung entsprechend Tabelle II-3.9:

Tabelle II-3.9 Reichweite der	Temperaturausbreitung	nach Gleichung II-1.2 (t = 3d).
-------------------------------	-----------------------	---------------------------------

Wärmeleitfähigkeit	Volumetrische	Reichweite der	
des umliegenden	Wärmekapazität	Temperatur-	
Materials		ausbreitung	
[W/(m K)]	[MJ/(m³ K)]	[m]	
1	2	0,36	
2	2	0,51	
4	2	0,72	

Vergleicht man die Ausbreitungswerte mit den Abbildungen II-3.8, II-3.9 und II-3.12, so erkennt man, dass die Werte mit der optischen Ausbreitung der Temperaturfront annähernd übereinstimmen.

Allgemein kann man in den Abbildungen II-3.8 bis II-3.12 erkennen, dass die Temperatur erwartungsgemäß dann am stärksten ansteigt, wenn sowohl die Kabel nah beieinander liegen (Modellpositionen 3 bis 5), sowie wenn die Wärmeleitfähigkeit der Verpressung, als auch in geringerem Maße die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins, niedrig sind (Abb. II-3.10, Abb. II-3.11 & Abb. II-3.12).

ModelIname	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$			Abweichung von	Maximale, nach 3
	Gestein	Verpressung	Berechnet	Gesteinswärme-	Tagen erreichte
				leitfähigkeit	Endtemperatur
	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[%]	[°C]
eTRT_04-1.1	2	2	2,02	1,2	20,47
eTRT_04-1.2	2	2	2,02	1,1	20,37
eTRT_04-1.3	2	2	1,98	0,9	23,14
eTRT_04-1.4	2	2	1,98	0,9	23,18
eTRT_04-1.5	2	2	1,99	0,5	21,77
eTRT_04-1.6	2	2	2,03	1,6	20,19
eTRT_04-2.1	4	2	4,01	0,2	18,16
eTRT_04-2.2	4	2	4,00	0,1	18,07
eTRT_04-2.3	4	2	3,92	1,9	21,13
eTRT_04-2.4	4	2	3,92	1,9	21,17
eTRT_04-2.5	4	2	3,94	1,5	19,75
eTRT_04-2.6	4	2	4,02	0,5	17,61
eTRT_04-3.1	2	0,8	2,00	0,0	23,12
eTRT_04-3.2	2	0,8	2,00	0,0	23,00
eTRT_04-3.3	2	0,8	1,91	4,7	29,91
eTRT_04-3.4	2	0,8	1,91	4,7	29,99
eTRT_04-3.5	2	0,8	1,92	3,9	26,74
eTRT_04-3.6	2	0,8	2,02	1,1	21,64
eTRT_04-4.1	4	0,8	3,96	1,0	20,63
eTRT_04-4.2	4	0,8	3,96	1,0	20,52
eTRT_04-4.3	4	0,8	3,77	5,7	27,92
eTRT_04-4.4	4	0,8	3,77	5,7	27,99
eTRT_04-4.5	4	0,8	3,80	4,9	24,73
eTRT_04-4.6	4	0,8	4,01	0,2	18,64
eTRT_04-5.1	1	2	1,03	3,5	24,02
eTRT_04-5.2	1	2	1,03	3,4	23,91
eTRT_04-5.3	1	2	1,01	1,4	26,36
eTRT_04-5.4	1	2	1,01	1,4	26,40
eTRT_04-5.5	1	2	1,02	1,8	25,01
eTRT_04-5.6	1	2	1,04	3,9	24,04

 Tabelle II-3.10 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung Modellreihe eTRT\_04 (nach Gleichung II-1.1).





## ModelIname: eTRT\_04-1.2

Modellnr.: Modellposition:	1 2
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m
Testdauer:	72 h



## ModelIname: eTRT\_04-1.5 ModelInr.: Modellposition: 5 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K) Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K) Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m<sup>3</sup> K) 2 MJ/(m<sup>3</sup> K) Wärmekapazität Verfüllung: konstant Wärmeeintrag: Wärmeleistung: 15 W/m Testdauer: 72 h



Temperature

- Continuous

11

N

FEFLOW (R)

0.1

#### ModelIname: eTRT 04-1.3

		<ul> <li>Contin</li> </ul>
Modellnr.: Modellposition:	1 3	
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	22
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	222
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	2
Testdauer:	72 h	1
		1
		N
0	0,05 0,1 [m]	FEFLO

0.05

0.1



#### Modellname: eTRT 04-1.6

ModelIname: eTRT 04-1.4

Wärmekapazität Gestein:

Wärmekapazität Verfüllung:

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)

Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

4

2 MJ/(m<sup>3</sup> K)

2 MJ/(m<sup>3</sup> K)

konstant

0.05

0.05

0.05

0,1

15 W/m

72 h

ModelInr.:

Modellposition:

Wärmeeintrag:

Wärmeleistung:

Testdauer:

ModelInr.: Modellposition: 6 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K) Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K) Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m<sup>3</sup> K) Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m<sup>3</sup> K) Wärmeeintrag: konstant Wärmeleistung: 15 W/m Testdauer: 72 h



11

N

0,1

Abbildung II-3.8 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT\_04-1.1 bis 1.6.









Modellnr.: Modellposition:	2 1	[°C] 30 29 28	
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	4 W/(m K) 2 W/(m K)	27 26 25 24	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	23 22 21 20	X
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	19 18 17 16	
Testdauer:	72 h	15 14 13 12	$\mathcal{A}$
		11	XX

0.05

[m]

0.1

0.1





Modellnr.:	2
Modellposition:	2
Wärmeleitfähigkeit Gestein:	4 W/(m K)
Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K)
Wärmekapazität Gestein:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmeeintrag:	konstant
Wärmeleistung:	15 W/m
Testdauer:	72 h





Abbildung II-3.9 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT\_04-2.1 bis 2.6.



ModelIname: eTRT_04-2.5		Temperature - Continuous -
Modellnr.: Modellposition:	2 5	[°C] 30 29 28
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	4 W/(m K) 2 W/(m K)	27 26 25 24
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	23 22 21 20
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	19 18 17
Testdauer:	72 h	15 14 13 12 11 10
0	0,05 0,1 [m]	FEFLOW (R)













#### ModelIname: eTRT\_04-3.2

Modellnr.: Modellposition:	3 2
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 0,8 W/(m K)
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m
Testdauer:	72 h



ModelIname: eTRT_04-3.5		Temperature
ModelInr.: ModelIposition:	3 5	[°C] 30 29 28
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 0,8 W/(m K)	27 26 25 24
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	23 22 21
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	19 18 17
Testdauer:	72 h	15 14 13 12
		N N

#### ModelIname: eTRT\_04-3.3

		- Contin
Modellnr.: Modellposition:	3 3	[°C
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 0,8 W/(m K)	2222
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	2 2 2 2 2
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	2 1 1
Testdauer:	72 h	1
		1
		N
0	0,05 0,1 [m]	FEFLOV

0.05





ModelIname: eTRT_04-3.4		Temperature - Continuous -
Modellnr.: Modellposition:	3 4	[°C] 30 29 28
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 0,8 W/(m K)	27 26 25 24
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	23 22 21 20
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	19 18 17
Testdauer:	72 h	15 15 14 13 12
		11 10 N
0	0,05 0,1	FEFLOW (R)

0,1

FEFLOW (R)

0.05

[m]

#### ModelInr.: 3 Modellposition: 6

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K) Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K) 2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K) konstant 15 W/m 72 h N 0.05 0,1



ModelIname: eTRT\_04-3.6

- Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:
- Wärmeeintrag: Wärmeleistung:
- Testdauer:













Modellname: eTRT 04-4 5		Temperature
Modellnr.: Modellposition:	4 5	- Continuous - [°C] 30 29 28
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	4 W/(m K) 0,8 W/(m K)	27 26 25 24
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	23 22 21 20
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	19 18 17 16
Testdauer:	72 h	15 14 13 12 11 10
<u>0</u>	0,05 0,1 [m]	FEFLOW (R)



ModelIname: eTRT\_04-4.2

Modellnr.:	4
Modellposition:	2
Wärmeleitfähigkeit Gestein:	4 W/(m K)
Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	0,8 W/(m K)
Wärmekapazität Gestein:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmeeintrag:	konstant
Wärmeleistung:	15 W/m
Testdauer:	72 h

0.05

0.1





Abbildung II-3.11 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT\_04-4.1 bis 4.6.









0.05

0.1

0.1



#### ModelIname: eTRT\_04-5.2

Modellnr.:	5
Modellposition:	2
Wärmeleitfähigkeit Gestein:	1 W/(m K)
Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K)
Wärmekapazität Gestein:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K)
Wärmeeintrag:	konstant
Wärmeleistung:	15 W/m
Testdauer:	72 h



0	0,05 0,1 [m]	FEFLOW (R)
ModelIname: eTRT_04-5.5		Temperature
Modellnr.: Modellposition:	5 5	[°C] 30 29 28
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung	1 W/(m K) g: 2 W/(m K)	27 26 25 24
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	23 22 21 20
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	19 18 17
Testdauer:	72 h	15 14 13 12 11
		10 N

0.05

0,05

0,1

0.1

5

4

2 MJ/(m<sup>3</sup> K) 2 MJ/(m<sup>3</sup> K)

konstant

15 W/m

72 h

ModelIname: eTRT 04-5.4

Wärmekapazität Gestein:

Wärmekapazität Verfüllung:

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)

Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

ModelInr.:

Modellposition:

Wärmeeintrag:

Wärmeleistung:

Testdauer:



Temperature

- Continuous

11 10

#### ModelIname: eTRT\_04-5.3

		- Cont
Modellnr.: Modellposition:	5 3	[*
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	1 W/(m K) 2 W/(m K)	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	
Testdauer:	72 h	
0	0,05 0,1	N
	[m]	FEFLC



ModelIname: eTRT\_04-5.6 ModelInr.: 5 Modellposition: 6 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K) Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K) Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m<sup>3</sup> K) Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m<sup>3</sup> K) Wärmeeintrag: konstant Wärmeleistung: 15 W/m 72 h Testdauer:



Abbildung II-3.12 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT\_04-5.1 bis 5.6.










Abbildung II-3.13 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_04-1.1 bis 1.6.



Abbildung II-3.14 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_04-2.1 bis 2.6.



Abbildung II-3.15 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_04-3.1 bis 3.6.



Abbildung II-3.16 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_04-4.1 bis 4.6.



Abbildung II-3.17 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_04-5.1 bis 5.6.



**Abbildung II-3.18** Verteilung der berechneten Wärmeleitfähigkeit (rot-graue Punkte) und der den Modellen vorgegebenen Gesteinswärmeleitfähigkeiten (blaue Balken) der Modelle eTRT\_04-1.1 bis 5.6.

Abbildung II-3.18 zeigt deutlich, dass die aus den Modellergebnissen berechneten Wärmeleitfähigkeiten nur in geringem Maße von den für das Umgebungsgestein festgesetzten Werten abweichen. Die Abweichungen sind dort am stärksten, wo der Einfluss eines schwach wärmeleitenden Verfüllmaterials am größten ist (Modell eTRT\_04-4.3 & 4.4). Insgesamt besitzen die vorliegenden Modelle eine mittlere Abweichung vom Wärmeleitfähigkeitswert des umgebenden Gesteins von ca. 2%. Bei einer Untersuchung der einzelnen Modellpositionen (Abb. II-3.3) zeigt sich, dass die Modelle mit den weit innen liegenden Glasfaserkabeln (Modellposition 3, 4 & 5), die höchsten mittleren Abweichungen vom festgelegten Wert für das Umgebungsgestein besitzen (Tab. II-3.11).

Modell-	Mittlere
position	Abweichung
	[%]
1	1,2
2	1,1
3	2,9
4	2,9
5	2,5
6	1,5

**Tabelle II-3.11** Mittlere Abweichungder Wärmeleitfähigkeiten beiverschiedenen Modellpositionen.

# II-3.4.2 Modellreihe Konduktion bei einem 3-Schicht-Modell

Die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_05" besteht aus insgesamt 3 Einzelmodellen mit je 32 Observation Points (OP), an denen der Temperaturanstieg während des Modelldurchlaufs aufgezeichnet wird. Die OPs befinden sich in den Mittelpunktsknoten der beiden Glasfaserkabel auf allen 16 Slices des jeweiligen 15-Layer-Modells. So kann ein Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofil erstellt werden (Abb. II-3.22).

Die Temperaturausbreitung in den Modelle erfolgt aufgrund der identischen Geometrie analog zu Modellen 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 und 5.1 der Modellreihe "FEFLOW eTRT\_04". In Modell 1 zeigt sich, dass die Temperaturen in der mittleren Schicht stärker ansteigen, als in den Schichten darüber oder darunter (Abb. II-3.19), was durch die in der mittleren Schicht geringeren Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins bedingt ist (Tab. II-3.5). In Modell 2 ist die Temperaturentwicklung um die Sonde in allen Layern erwartungsgemäß gleich (Abb. II-3.20) und analog zu Modell 1.1 der Modellreihe "FEFLOW eTRT\_04". Die größere, dreidimensionale Auflösung des Modells (15-Layer) hat erwartungsgemäß keinerlei Auswirkungen auf die Temperaturen. In Modell 3 ist der Temperaturanstieg in der mittleren Schicht geringer, als in den Schichten darüber und darunter (Abb. II-3.21), was durch die in der mittleren Schicht höhere Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins bedingt ist (Tab. II-3.5).

Die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Tiefenabschnitte liegen je nach Modell sehr nahe an den Werten der umgebenden Gesteinseinheiten (Tab. II-3.12). Größere Abweichungen von der zu erwartenden Wärmeleitfähigkeit gibt es nur an den Übergangsslices zwischen den unterschiedlichen, modellierten Gesteinseinheiten. Der berechnete Wärmeleitfähigkeitswert an dieser Stelle stellt somit eine Misch-Wärmeleitfähigkeit zwischen den Wärmeleitfähigkeit vom jeweiligen Mittelwert der oberen, bzw. unteren Schicht zur mittleren Schicht beträgt maximal 2% (Tab. II-3.13).

ModelIname: eTRT_05-1		Temperature - Continuous -	
Modellnr.: Slice: Modellposition:	1 2 1	[°C] 30 29 28 27	
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	26 25 24 23	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	22 21 20 19	
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	18 17 16 15	
Testdauer:	72 h	14 13 12 11 10	
<u>0</u>	0,05 0,1 [m]	FEFLOW (R)	



ModelIname: eTRT_05-1		Temperature - Continuous -
Modellnr.: Slice: Modellposition: Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmekapazität Gestein:	1 8 1 1 W/(m K) 2 W/(m K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	[°C] 29 28 27 26 25 24 22 22 21
Warmekapazitat Verfullung: Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) konstant 15 W/m	20 19 18 17 16 15
Testdauer:	72 h	14           12           11           N           FEFLOW (R)



Abbildung II-3.19 Ergebnisse der Modelle eTRT\_05-1 auf Slice 02, 08 und 14.

ModelIname: eTRT_05-2		Temperature - Continuous -	17
Modellnr.: Slice: Modellposition:	2 2 1	[°C] 30 29 28 27	X
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	26 25 24 23	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)		$\bigwedge$
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m		
Testdauer:	72 h		X
<u>•</u>	0,05 0,1 [m]		X
ModelIname: eTRT_05-2		Temperature	17
ModelInr.: Slice: ModelIposition:	1 8 1	Image: Second	X
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)		
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	22 21 20 19	$\bigwedge$
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	18 17 16 15	
Testdauer:	72 h	14 13 12 11	T
<u>0</u>	0,05 0,1	10 N FEFLOW (R)	X
ModelIname: eTRT_05-2		Temperature	$\langle \rangle$
ModelInr.: Slice: ModelIposition:	1 14 1	Image: Second	$\mathbf{x}$
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	26 25 24 23	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	22 21 20 19	
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	18 17 16 15	
Testdauer:	72 h	14 13 12 11	$\bigwedge$

Testdauer:

0,05 [m] 0 0,1 FEFLOW (R)

Abbildung II-3.20 Ergebnisse der Modelle eTRT\_05-2 auf Slice 02, 08 und 14.

ModelIname: eTRT_05-3		Temp - Con	oera tinu
ModelInr.: Slice: ModelIposition:	3 2 1		[°C] 30 29 28 27
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)		26 25 24 23
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)		22 21 20 19
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m		18 17 16 15
Testdauer:	72 h		14 13 12 11
			10

0,05 [m]

0,05

[m]

0,1

FEFLOW (R)

0,1



ModelIname: eTRT_05-3		Temperature - Continuous -
ModelInr.: Slice: ModelIposition:	3 8 1	[°C] 30 29 28 27
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	3 W/(m K) : 2 W/(m K)	26 25 24 23
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	22 21 20 19
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	18 17 16 15
Testdauer:	72 h	14 13 12 11 10
	0.05	



Abbildung II-3.21 Ergebnisse der Modelle eTRT\_05-3 auf Slice 02, 08 und 14.

Tabelle II-3 12	Wärmeleitfähigkeiten	der Modelle	≤TRT	05-1	his 3
	wanneleinanigkeiten		CIIVI_	_03-1	015 5.

		Modell e	[RT_05-1			Modell eTRT_05-2				Modell eTRT_05-3			
Slice	Tiefe	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung
#	m	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%
1	0	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1
2	1	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1
3	2	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1
4	3	2,02	2	0,02	1,0	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,2
5	4	2,02	2	0,02	1,2	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	0,8
6	5	2,06	2	0,06	3,0	2,02	2	0,02	1,1	2,01	2	0,01	0,7
7	6	1,53	1	0,53	53,0	2,02	2	0,02	1,1	2,52	3	0,48	16,0
8	7	1,00	1	0,00	0,0	2,02	2	0,02	1,1	3,01	3	0,01	0,5
9	8	1,00	1	0,00	0,0	2,02	2	0,02	1,1	3,01	3	0,01	0,5
10	9	1,53	1	0,53	53,0	2,02	2	0,02	1,1	2,52	3	0,48	16,0
11	10	2,06	2	0,06	3,0	2,02	2	0,02	1,1	2,01	2	0,01	0,7
12	11	2,02	2	0,02	1,2	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	0,8
13	12	2,02	2	0,02	1,0	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,2
14	13	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1
15	14	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1
16	15	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1	2,02	2	0,02	1,1

Tabelle II-3.13 Wärmeleitfähigkeiten der Slices 7 und 10 von Modell eTRT\_05-1 und 3

 $(\lambda_{rock} \ 1 \ bezeichnet \ die \ obere \ und \ untere \ Schicht, \ \lambda_{rock} \ 2 \ die \ mittlere \ Schicht \ des \ jeweiligen \ Modells).$ 

Modell	Slice	λ <sub>rock</sub> 1	λ <sub>rock</sub> 2	Mittel- $\lambda_{rock}$	$\lambda_{calc}$	Δλ	Abweichung
#	#	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%
1	7	2	1	1,50	1,53	0,03	2
1	10	2	1	1,50	1,53	0,03	2
3	7	2	3	2,50	2,52	0,02	0,8
3	10	2	3	2,50	2,52	0,02	0,8



Abbildung II-3.22 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT\_05-1, 2 und 3 aufgetragen über die Modelltiefe.

### II-3.4.3 Modellreihe Konduktion mit Wärmeeintragsänderungen

Die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_06" besteht aus insgesamt 8 Einzelmodellen mit je 2 Observation Points (OP), an denen der Temperaturanstieg während des Modelldurchlaufs aufgezeichnet wird. Die OPs befinden sich in den Mittelpunktsknoten der beiden Glasfaserkabel des jeweiligen Modells.

Der Temperaturanstieg in den unterschiedlichen Modellen wird durch die unterschiedliche Wärmeeinbringung im Vergleich zum Standardmodell eTRT\_06-8 zum Teil stark verändert (Abb. II-3.23 bis II-3.27). Steigt der Wärmeeintrag linear an, so ist auch der Temperaturanstieg größer (Abb. II-3.26). Bei einem linearen Abfall des Wärmeeintrags wird auch der Temperaturanstieg mit der Zeit kleiner, bei starkem Gefälle (eTRT\_06-5 & 6) wird der Anstieg gegen Ende der Messdauer sogar negativ und die Temperaturkurve flacht wieder ab (Abb. II-3.26). Bei einer sinusförmigen Variation des Wärmeeintrags (±5% des Wärmeeintragswertes von 15 W/m), folgt auch die Temperaturkurve mit einem wellenförmigen Anstieg (Abb. II-3.27).



Abbildung II-3.23 Ergebnisse der Modelle eTRT\_06-1, 2 und 3.





Abbildung II-3.24 Ergebnisse der Modelle eTRT\_06-4, 5 und 6.





Temperature - Continuous -

ModelIname: eTRT\_06-7

Wärmeleitfähigkeit Gestein:

Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:

Bezugs-Wärmeleistung:

Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

7

1

2 W/(m K)

2 MJ/(m<sup>3</sup> K) 2 MJ/(m<sup>3</sup> K)

sinusförmig

variabel

15 W/m

±5%

ModelInr.:

Modellposition:

Wärmeeintrag:

Wärmeänderung:

Variation:

Abbildung II-3.25 Ergebnisse der Modelle eTRT\_06-7 und 8.



Abbildung II-3.26 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_06-1 bis 6.



Abbildung II-3.27 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_06-7 und 8.

ModelIname	Wärmeleitfäh	igkeit λ		Abweichung von	Maximale, nach 3	
	Gestein	Verpressung	Berechnet	Gesteinswärme- leitfähigkeit	Tagen erreichte Endtemperatur	
	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[%]	[°C]	
eTRT_06-1	2	2	0.69	65.6	22.80	
eTRT_06-2	2	2	0.93	53.3	21.87	
eTRT_06-3	2	2	1.46	27.2	20.93	
eTRT_06-4	2	2	3.31	65.3	20.00	
eTRT_06-5	2	2	-12.37	718.3	19.11	
eTRT_06-6	2	2	-2.15	207.7	18.58	
eTRT_06-7	2	2	0.68	65.8	20.72	

Tabelle II-3.14 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung Modellreihe eTRT\_06 (nach Gleichung II-1.1).

Die berechneten Wärmeleitfähigkeiten fallen im Vergleich zu den Wärmeleitfähigkeiten des umgebenden Gesteins durch eine teils große Abweichung auf (Tab. II-3.14). Dort wo der Temperaturanstieg am Ende der Messdauer ins Negative übergeht (eTRT\_07-5 und 6; Abb. II-3.26), erhält man in der Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten ebenfalls negative Werte.

# II-3.4.4 Modellreihe 3-Schicht-Modell mit Grundwasserfluss

Die Modellreihe "FEFLOW eTRT\_07" besteht aus insgesamt 5 Einzelmodellen mit je 32 Observation Points (OP), an denen der Temperaturanstieg während des Modelldurchlaufs aufgezeichnet wird. Die OPs befinden sich in den Mittelpunktsknoten der beiden Glasfaserkabel auf allen 16 Slices des jeweiligen 15-Layer-Modells. So können Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofile erstellt werden (Abb. II-3.33). Da die angesetzte Grundwasserströmung (Kapitel II-3.3.4) die beiden Glasfaserkabel unterschiedlich umströmt (LWL-Kabel links unten wird fast frontal angeströmt, Kabel rechts oben liegt eher im Flussschatten der Erdwärmesonde), sind die Temperaturwerte und damit auch die Wärmeleitfähigkeitswerte der beiden OPs je Slice unterschiedlich. Aus diesem Grund wurden alle OPs zur Wärmeleitfähigkeitsberechnung herangezogen.

Während der Temperaturanstieg in den oberen und unteren Schichten der Modelle eTRT\_07-1 bis 5 analog zum Referenzmodell eTRT\_04-1.1 verläuft, ist der Anstieg der Temperatur in den jeweiligen mittleren, Grundwasser-durchströmten Schichten teils weit geringer.

Modellname: eTRT_07-1		Temperature - Continuous -
Modellnr.: Slice: Modellposition: Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung: Wärmeleistung: Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung: Testdauer:	1 2 1 2 W/(m K) 2 W/(m K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) konstant 15 W/m 0,864 m/d v.l.n.r. 72 h 0,05 0,1	Contributed 5 30 29 27 26 24 22 21 20 19 18 17 16 15 14 12 11 10 N CEFLOW (R)

Modellname: eTRT_07-1		Temp
Modellnr.: Slice: Modellposition:	1 8 1	
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	
Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung:	0,864 m/d v.l.n.r.	
Testdauer:	72 h	N
0	0,05 0,1 [m]	FEFL





Abbildung II-3.28 Ergebnisse der Modelle eTRT\_07-1 auf Slice 02, 08 und 14.

ModelIname: eTRT_07-2		Temperature - Continuous -
Modellnr.: Slice: Modellposition:	2 2 1	[°C] 30 29 28 27
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	22 20 19
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	18 17 16 15
Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung:	0,432 m/d v.l.n.r.	14 13 12 11 10
Testdauer:	72 h	1 N O OR DOI
	[m]	FEFLOW (R)
ModelIname: eTRT_07-2		Temperature

		- Cont
Modellnr.: Slice: Modellposition:	2 8 1	
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	
Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung:	0,432 m/d v.l.n.r.	
Testdauer:	72 h	N
0	0,05 0,1	

[m]





Abbildung II-3.29 Ergebnisse der Modelle eTRT\_07-2 auf Slice 02, 08 und 14.

ModelIname: eTRT_07-3		Temperature - Continuous -
Modellnr.: Slice: Modellposition: Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung: Wärmeeintrag: Wärmeleistung: Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung: Testdauer:	3 2 1 2 W/(m K) 2 W/(m K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) konstant 15 W/m 0,0864 m/d v.l.n.r. 72 h 0.05 0.1	FEFLOW (R)

ModelIname: eTRT_07-3		Temp - Cont
Modellnr.: Slice: Modellposition:	3 8 1	[
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	
Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung:	0,0864 m/d v.l.n.r.	
Testdauer:	72 h	N
0	0,05 0,1	

[m]





Abbildung II-3.30 Ergebnisse der Modelle eTRT\_07-3 auf Slice 02, 08 und 14.

Modellname: eTRT_07-4 Modellnr.: Slice: Modellposition: Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	4 2 1 2 W/(m K) 2 W/(m K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K)	Temperature - Continuous - [°C] 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 19
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung: Wärmeeintrag:	2 W/(m K) 2 W/(m K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) konstant	26 25 24 23 22 20 19 19 19
Wärmeleistung: Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung: Testdauer:	15 W/m 0,0432 m/d v.l.n.r. 72 h	16 15 14 13 12 11 10 N
0	0,05 0,1 [m]	FEFLOW (R)

		- Contin
Modellnr.: Slice: Modellposition:	4 8 1	[°(
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	
Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung:	0,0432 m/d v.l.n.r.	
Testdauer:	72 h	N
0	0,05 0,1	

[m]





Abbildung II-3.31 Ergebnisse der Modelle eTRT\_07-4 auf Slice 02, 08 und 14.

<i>ModelIname:</i> eTRT_07-5		Temperature - Continuous -
Modellnr.: Slice: Modellposition: Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung: Wärmeeintrag: Wärmeleistung: Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung:	5 2 1 2 W/(m K) 2 W/(m K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) 2 MJ/(m <sup>3</sup> K) konstant 15 W/m 0,00864 m/d v.l.n.r.	Image: Second
Modellaamo: oTRT_07.5	72 h 0.05 0,1 [m]	FEFLOW (R)
ModelInr.: Slice: ModelInosition:	5 8 1	- Continuous - [°C] 30 29 28

ModelInr.: Slice: ModelIposition:	5 8 1	[°C] 30 29 28 27
Wärmeleitfähigkeit Gestein: Wärmeleitfähigkeit Verfüllung:	2 W/(m K) 2 W/(m K)	26 25 24 23
Wärmekapazität Gestein: Wärmekapazität Verfüllung:	2 MJ/(m³ K) 2 MJ/(m³ K)	22 21 20 19
Wärmeeintrag: Wärmeleistung:	konstant 15 W/m	18 17 16 15
Grundwasser: Fließgeschwindigkeit: Fließrichtung:	0,00864 m/d v.l.n.r.	14 13 12 11 10
Testdauer:	72 h	N
0	0,05 0,1 [m] FI	EFLOW (R)





Abbildung II-3.32 Ergebnisse der Modelle eTRT\_07-5 auf Slice 02, 08 und 14.

		Modell e	[RT_07-1.1			Modell eTRT_07-2.1				Modell eTRT_07-3.1			
Slice	Tiefe	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung
#	m	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%
1	0	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	2.0
2	1	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9
3	2	2.05	2.00	0.05	2.5	2.05	2.00	0.05	2.4	2.04	2.00	0.04	2.1
4	3	1.99	2.00	0.01	0.5	2.00	2.00	0.00	0.1	2.03	2.00	0.03	1.4
5	4	2.12	2.00	0.12	5.9	2.07	2.00	0.07	3.6	2.02	2.00	0.02	1.0
6	5	11.17	2.00	9.17	458.6	6.72	2.00	4.72	236.2	3.11	2.00	1.11	55.3
7	6	31.67	2.00	29.67	1483.3	19.96	2.00	17.96	898.2	6.15	2.00	4.15	207.3
8	7	38.92	2.00	36.92	1846.2	27.52	2.00	25.52	1276.2	8.81	2.00	6.81	340.5
9	8	38.92	2.00	36.92	1846.2	27.52	2.00	25.52	1276.1	8.81	2.00	6.81	340.5
10	9	31.67	2.00	29.67	1483.3	19.96	2.00	17.96	898.2	6.15	2.00	4.15	207.3
11	10	11.17	2.00	9.17	458.6	6.72	2.00	4.72	236.2	3.11	2.00	1.11	55.3
12	11	2.12	2.00	0.12	5.9	2.07	2.00	0.07	3.6	2.02	2.00	0.02	1.0
13	12	1.99	2.00	0.01	0.5	2.00	2.00	0.00	0.1	2.03	2.00	0.03	1.4
14	13	2.05	2.00	0.05	2.5	2.05	2.00	0.05	2.4	2.04	2.00	0.04	2.1
15	14	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9
16	15	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	2.0

 Tabelle II-3.15
 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT\_07-1
 bis 5 am linken, unteren Glasfaserkabel.

		Modell eTRT_07-4.1				Modell eTRT_07-5.1			
Slice	Tiefe	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung
#	m	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%
1	0	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	2.0
2	1	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	2.0
3	2	2.04	2.00	0.04	2.1	2.04	2.00	0.04	2.0
4	3	2.03	2.00	0.03	1.7	2.04	2.00	0.04	1.9
5	4	2.02	2.00	0.02	1.0	2.03	2.00	0.03	1.6
6	5	2.60	2.00	0.60	30.0	2.16	2.00	0.16	7.8
7	6	4.22	2.00	2.22	110.9	2.53	2.00	0.53	26.6
8	7	5.70	2.00	3.70	184.8	2.90	2.00	0.90	44.8
9	8	5.70	2.00	3.70	184.8	2.90	2.00	0.90	44.8
10	9	4.22	2.00	2.22	110.9	2.53	2.00	0.53	26.6
11	10	2.60	2.00	0.60	30.0	2.16	2.00	0.16	7.8
12	11	2.02	2.00	0.02	1.0	2.03	2.00	0.03	1.6
13	12	2.03	2.00	0.03	1.7	2.04	2.00	0.04	1.9
14	13	2.04	2.00	0.04	2.1	2.04	2.00	0.04	2.0
15	14	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	2.0
16	15	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	2.0

		Modell e	rrt_07-1.2			Modell e	Modell eTRT_07-2.2			Modell eTRT_07-3.2			
Slice	Tiefe	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung
#	m	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%
1	0	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	2.0
2	1	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9
3	2	2.05	2.00	0.05	2.5	2.05	2.00	0.05	2.4	2.04	2.00	0.04	2.1
4	3	1.99	2.00	0.01	0.5	2.00	2.00	0.00	0.1	2.03	2.00	0.03	1.4
5	4	2.12	2.00	0.12	5.8	2.07	2.00	0.07	3.5	2.02	2.00	0.02	1.0
6	5	11.09	2.00	9.09	454.4	5.54	2.00	3.54	177.0	3.09	2.00	1.09	54.7
7	6	31.30	2.00	29.30	1465.2	19.65	2.00	17.65	882.6	6.07	2.00	4.07	203.4
8	7	38.62	2.00	36.62	1831.0	27.14	2.00	25.14	1256.9	8.68	2.00	6.68	333.9
9	8	38.62	2.00	36.62	1831.1	27.14	2.00	25.14	1257.0	8.68	2.00	6.68	333.9
10	9	31.30	2.00	29.30	1465.2	19.65	2.00	17.65	882.6	6.07	2.00	4.07	203.4
11	10	11.09	2.00	9.09	454.4	6.68	2.00	4.68	233.9	3.09	2.00	1.09	54.7
12	11	2.12	2.00	0.12	5.8	2.07	2.00	0.07	3.5	2.02	2.00	0.02	1.0
13	12	1.99	2.00	0.01	0.5	2.00	2.00	0.00	0.1	2.03	2.00	0.03	1.4
14	13	2.05	2.00	0.05	2.5	2.05	2.00	0.05	2.4	2.04	2.00	0.04	2.1
15	14	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9
16	15	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	2.0

 Tabelle II-3.16
 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT\_07-1 bis 5 am rechten, oberen Glasfaserkabel.

		Modell el	RT_07-4.2			Modell e			
Slice	Tiefe	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{\text{rock}}$	Δλ	Abweichung
#	m	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	%
1	0	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	1.9
2	1	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9
3	2	2.04	2.00	0.04	2.1	2.04	2.00	0.04	2.0
4	3	2.03	2.00	0.03	1.7	2.04	2.00	0.04	1.9
5	4	2.02	2.00	0.02	1.0	2.03	2.00	0.03	1.6
6	5	2.59	2.00	0.59	29.7	2.15	2.00	0.15	7.7
7	6	4.18	2.00	2.18	108.8	2.52	2.00	0.52	26.1
8	7	5.62	2.00	3.62	181.2	2.88	2.00	0.88	43.8
9	8	5.62	2.00	3.62	181.2	2.88	2.00	0.88	43.8
10	9	4.18	2.00	2.18	108.8	2.52	2.00	0.52	26.1
11	10	2.59	2.00	0.59	29.7	2.15	2.00	0.15	7.7
12	11	2.02	2.00	0.02	1.0	2.03	2.00	0.03	1.6
13	12	2.03	2.00	0.03	1.7	2.04	2.00	0.04	1.9
14	13	2.04	2.00	0.04	2.1	2.04	2.00	0.04	2.0
15	14	2.04	2.00	0.04	1.9	2.04	2.00	0.04	1.9
16	15	2.04	2.00	0.04	2.0	2.04	2.00	0.04	1.9



**Abbildung II-3.33** Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT\_07-1 bis 5 aufgetragen über die Modelltiefe (".1" bedeutet linker, unterer OP, ".2" rechter, oberer OP).

Die berechneten Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT\_07-1 bis 5 liegen jeweils über den vorgegebenen Gesteinswärmeleitfähigkeiten (Tab. II-3.15 & II-3.16, Abb. II-3.33). Je nach angesetzter Fließgeschwindigkeit ändert sich auch die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit im durchflossenen Bereich (Abb. II-3.33). Die beiden Kurven der unterschiedlichen OP-Positionen pro Modell unterscheiden sich dabei ebenfalls leicht. Die berechnete Wärmeleitfähigkeit der OPs des unteren, linken Glasfaserkabels im durchflossenen Bereich ist jeweils höher, als die berechnete Wärmeleitfähigkeit im entsprechenden oberen, rechten Glasfaserkabel (Abb. II-3.33).

Bei der vorliegenden Modellreihe wurde eine Peclét-Zahl-Analyse durchgeführt, um aus den Wärmeleitfähigkeiten die vorherrschende Fließgeschwindigkeit des umströmenden Grundwassers zu erhalten (Gleichung II-1.5). Die Analyse führte zu Ergebnissen, die teils sehr stark von den dem Modell vorgegebenen Fließbedingungen abweichen (Tab. II-3.17 & II-3.18). Es zeigt sich, dass die charakteristische Länge I der entscheidende Faktor ist, der das Ergebnis der Berechnung bestimmt. Wird die charakteristische Länge entsprechend BARCENILLA et al. (2005), SUTTON et al. (2003), ZSCHOKE (2005) und DORNSTÄDTER et al. (2008) mit dem Bohrlochdurchmesser festgelegt, weichen die Ergebnisse sehr stark von den zu erwartenden Werten ab (Tab II-3.17). Wählt man hingegen den nach

HELLSTRÖM (1991), FOWLER (2000), SPOHN (1997) und TURCOTTE & SCHUBERT (2002) von der Temperaturanomalie betroffenen Bereich mittels der thermischen Diffusionslänge (Gleichung II-1.2), so erhält man Werte, die näher an den zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten liegen (Tab. II-3.18).

**Tabelle II-3.17** Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse (LU = links unten; RO = rechts oben;  $\lambda_{calc} = \lambda_{total}$ ,  $\lambda_{rock} = \lambda_{kond}$ ). Die charakteristische Länge I wurde entsprechend BARCENILLA et al. (2005), SUTTON et al. (2003), ZSCHOKE (2005) und DORNSTÄDTER et al. (2008) mit dem Bohrlochdurchmesser festgelegt.

ModelIname	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{rock}$	I	ρc <sub>p</sub>	V <sub>calc</sub>	V <sub>Modell</sub>	Δν	Abweichung
	W/(m K)	W/(m K)	m	MJ/(m³ K)	m/s	m/s	m/s	%
Modell 1 LU	38,92	2,00	0,2	4,2	4,4·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-5</sup>	3,4·10 <sup>-5</sup>	339,6
Modell 1 RO	38,62	2,00	0,2	4,2	4,4·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-5</sup>	3,4·10 <sup>-5</sup>	336,0
Modell 2 LU	27,52	2,00	0,2	4,2	3,0·10 <sup>-5</sup>	5,0·10 <sup>-6</sup>	2,5·10 <sup>-5</sup>	507,7
Modell 2 RO	27,14	2,00	0,2	4,2	3,0·10 <sup>-5</sup>	5,0·10 <sup>-6</sup>	2,5·10 <sup>-5</sup>	498,5
Modell 3 LU	8,81	2,00	0,2	4,2	8,1·10 <sup>-6</sup>	1,0·10 <sup>-6</sup>	7,1·10 <sup>-6</sup>	710,7
Modell 3 RO	8,68	2,00	0,2	4,2	8,0∙10 <sup>-6</sup>	1,0·10 <sup>-6</sup>	7,0·10 <sup>-6</sup>	695,1
Modell 4 LU	5,70	2,00	0,2	4,2	4,4·10 <sup>-6</sup>	5,0·10 <sup>-7</sup>	3,9·10 <sup>-6</sup>	779,9
Modell 4 RO	5,62	2,00	0,2	4,2	4,3·10 <sup>-6</sup>	5,0·10 <sup>-7</sup>	3,8·10 <sup>-6</sup>	762,7
Modell 5 LU	2,90	2,00	0,2	4,2	1,1·10 <sup>-6</sup>	1,0·10 <sup>-7</sup>	9,7·10 <sup>-7</sup>	967,1
Modell 5 RO	2,88	2,00	0,2	4,2	1,0·10 <sup>-6</sup>	1,0·10 <sup>-7</sup>	9,4·10 <sup>-7</sup>	944,0

**Tabelle II-3.18** Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse (LU = links unten; RO = rechts oben;  $\lambda_{calc} = \lambda_{total}$ ,  $\lambda_{rock} = \lambda_{kond}$ ). Die charakteristische Länge I wurde entsprechend mit dem Radius des von der Temperaturänderung betroffenen Bereichs nach FOWLER (2000), SPOHN (1997), TURCOTTE & SCHUBERT (2002) und HELLSTRÖM (1991) festgelegt.

ModelIname	$\lambda_{calc}$	$\lambda_{rock}$	I	ρc <sub>p</sub>	Vcalc	V <sub>Modell</sub>	Δν	Abweichung
	W/(m K)	W/(m K)	m	MJ/(m³ K)	m/s	m/s	m/s	%
Modell 1 LU	38,92	2,00	0,51	4,2	1,7·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-5</sup>	7,3·10 <sup>-6</sup>	72,7
Modell 1 RO	38,62	2,00	0,51	4,2	1,7·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-5</sup>	7,1·10 <sup>-6</sup>	71,3
Modell 2 LU	27,52	2,00	0,51	4,2	1,2·10 <sup>-5</sup>	5,0·10 <sup>-6</sup>	6,9·10 <sup>-6</sup>	138,7
Modell 2 RO	27,14	2,00	0,51	4,2	1,2·10 <sup>-5</sup>	5,0·10 <sup>-6</sup>	6,8·10 <sup>-6</sup>	135,1
Modell 3 LU	8,81	2,00	0,51	4,2	3,2·10 <sup>-6</sup>	1,0·10 <sup>-6</sup>	2,2·10 <sup>-6</sup>	218,5
Modell 3 RO	8,68	2,00	0,51	4,2	3,1·10 <sup>-6</sup>	1,0·10 <sup>-6</sup>	2,1·10 <sup>-6</sup>	212,3
Modell 4 LU	5,70	2,00	0,51	4,2	1,7∙10 <sup>-6</sup>	5,0·10 <sup>-7</sup>	1,2·10 <sup>-6</sup>	245,7
Modell 4 RO	5,62	2,00	0,51	4,2	1,7∙10 <sup>-6</sup>	5,0·10 <sup>-7</sup>	1,2∙10 <sup>-6</sup>	238,9
Modell 5 LU	2,90	2,00	0,51	4,2	4,2.10-7	1,0.10-1	3,2.10-7	319,2
Modell 5 RO	2,88	2,00	0,51	4,2	4,1.10-'	1,0.10-1	3,1.10-7	310,1

# II-3.5 Kontrollmodellreihen mit verfeinertem Meshing

Um einen größeren Einfluss des Meshings auf die Modellergebnisse ausschließen zu können, wurden zwei Kalibrierungsmodellreihen (eTRT\_04-4.1c & eTRT\_04-3.1c, Tab. II-3.19) gerechnet, um eine Abweichung der berechneten Wärmeleitfähigkeiten zwischen den Modellen zu bestimmen. Als Vergleichsmodelle der Überprüfung wurden die Modelle eTRT\_04-4.1 und eTRT\_04-3.1 gewählt (Modell eTRT\_04-4.1c0 entspricht Modell eTRT\_04-3.1). Für beide

Kontrollmodellreihen wurden sämtliche Randbedingungen und Parameter analog zu den Vergleichsmodellen gewählt, lediglich das Meshing der Modelle und die Methode der Wärmeeinbringung sind hierbei unterschiedlich (Tab. II-3.19, Abb. II-3.34 bis Abb. II-3.37). Die neuen Meshes der Vergleichsmodelle wurden sowohl mit dem "Triangle Mesh Generator (© J. R. Shewchuk, v. 1.6 (2005))", als auch mit dem "GridBuilder Mesh Generator (© R. McLaren (2005))" erstellt. Die Meshs bestehen aus insgesamt zwischen ca. 40.000 und 340.000 Knoten und ca. 80.000 und 680.000 Elementen pro Slice bzw. Layer (Tab. II-3.19).

ModelIname	Mesh	Anzahl Knoten &	Methode des	eingebrachte
		Elemente pro	Wärmeeintrags	Wärmemenge
		Slice/Layer		(entspricht 15 W/m)
eTRT_04-4.1_c0	Triangle normal	39.892 / 79.081	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-4.1_c1	GridBuilder fein	194.996 / 373.598	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-4.1_c2	Triangle fein 2	198.347 / 395.432	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-4.1_c3	Triangle fein 4	338.606 / 675.655	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-4.1_c4	Triangle normal	39.892 / 79.081	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)
eTRT_04-4.1_c5	GridBuilder fein	194.996 / 373.598	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)
eTRT_04-4.1_c6	Triangle fein 2	198.347 / 395.432	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)
eTRT_04-4.1_c7	Triangle fein 4	338.606 / 675.655	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)
eTRT_04-3.1_c0	Triangle normal	39.892 / 79.081	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-3.1_c1	GridBuilder fein	194.996 / 373.598	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-3.1_c2	Triangle fein 2	198.347 / 395.432	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-3.1_c3	Triangle fein 4	338.606 / 675.655	Heat nodal source BC	-1296000 J/d
eTRT_04-3.1_c4	Triangle normal	39.892 / 79.081	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)
eTRT_04-3.1_c5	GridBuilder fein	194.996 / 373.598	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)
eTRT_04-3.1_c6	Triangle fein 2	198.347 / 395.432	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)
eTRT_04-3.1_c7	Triangle fein 4	338.606 / 675.655	Heat source solid	8145870119 J/(m <sup>3</sup> d)

Tabelle II-3.19 Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT\_04-4.1c und eTRT\_04-3.1c.

Die Art der Wärmeeinbringung wurde wie bereits erwähnt variabel angelegt (Tab. II-3.19). Während die Modelle c0 bis c3 eine Wärmeeinbringung in das Modell über eine Randbedingung vierter Art (Heat Nodal Source) an den Mittelpunktsknoten des diskretisierten LWL-Kabels besitzen (Eingabe in J/d), erfolgt bei den Modellen c4 bis c7 die Wärmeeinbringung über die Eingabe einer Heat Source bei den Materialparametern der festen Phase (Eingabe in J/(m<sup>3</sup> d)). Dieser Materialparameter wurde den Elementen innerhalb des diskretisierten LWL-Kabels zugewiesen (Abb. II-3.2).



**Abbildung II-3.34** Modellgeometrie des normalen Meshs ("Triangle normal", Tab. II-3.19) der Messreihen eTRT\_04 bis eTRT\_07 (Abmessungen in Tab. II-3.1, S. 94).



**Abbildung II-3.35** Modellgeometrie des Meshs GruidBuilder fein (Tab. II-3.19, Abmessungen in Tab. II-3.1).



Abbildung II-3.36 Modellgeometrie des Meshs Triangle fein 2 (Tab. II-3.19, Abmessungen in Tab. II-3.1).



**Abbildung II-3.37** Modellgeometrie des Meshs Triangle fein 4 (Tab. II-3.19, Abmessungen in Tab. II-3.1).

# Ergebnisse der Kontrollmodelle

Die Ergebnisse der Kontrollmodelle zeigen, dass in allen Modellen die Werte der berechneten Wärmeleitfähigkeiten fast identisch sind (Tab. II-3.20). Die maximale Abweichung vom Standard-Modell "eTRT\_04-4.1\_c0" beträgt lediglich ca. 0,006 W/(m K). Bei der Modellreihe "eTRT\_04-3.1\_c1 bis c7" beträgt die maximale Abweichung vom Standard-Modell "eTRT\_04-3.1\_c0" sogar nur ca. 0,002 W/(m K). Dies ist durch die annähernd identische Steigung aller Temperaturkurven im Auswertebereich der Wärmeleitfähigkeitsberechnungen zu erklären (Abb. II-3.38 & Abb. II-3.39).

Man kann jedoch auch sehr deutlich sehen, dass die Temperaturkurven untereinander einen teilweise sehr starken Versatz besitzen (Abb. II-3.38 & Abb. II-3.39). Dieser Versatz beträgt zum Teil bis zu 3,9°C (Tab. II-3.20). Während die Temperaturkurven der Modelle mit der Wärmeeinbringung über die Materialparameter (c4 bis c7) allgemein sehr ähnlich verlaufen, haben die Temperaturkurven bei einer Wärmeeinbringung über eine Randbedingung vierter Art (c0 bis c3) auch untereinander einen sehr starken Versatz (Abb. II-3.38 & Abb. II-3.39). Ursache für diesen Temperaturversatz ist die Art der Wärmeeinbringung.

Bei einer Wärmeeinbringung über eine Randbedingung vierter Art (Heat Source/Sink Type) kommt es an den Knoten und im Nahfeld der Einbringung zu fehlerhaft übersteigerten Temperaturwerten (mündliche Mitteilung Feflow Support 2012). Bei einer Wärmeeinbringung über die Materialparameter der Elementzellen (Heat Source Material Properties) treten diese Fehlmessungen an den Einbringungsknoten nicht auf (Modelle eTRT\_04-4.1\_c4 bis c7 & eTRT\_04-3.1\_c4 bis c7).

ModelIname Wärmeleitfähigkeit λ				Steigung der linearen	Abweichung von Gesteins-	Maximale, nach 3 Tagen
	Gestein (vorgegeben) [W/(m K)]	Verpressung (vorgegeben) [W/(m K)]	Berechnet	Regression im Auswerte- bereich (48h – 72h) [-]	wärmeleitfähigkeit [%]	erreichte Endtemperatur
eTRT 04-4 1 c0	4	0.8	3.96	0.60	1.00	20.63
eTRT_04-4.1_c1	4	0,8	3,97	0,60	0,86	24,52
eTRT_04-4.1_c2	4	0,8	3,96	0,60	1,07	20,91
eTRT_04-4.1_c3	4	0,8	3,96	0,60	1,01	23,31
Max. Abweichung von Standard-Mesh c0		0,00558	0,00085	0,14	3,89	
eTRT_04-4.1_c4	4	0,8	3,96	0,60	1,03	18,16
eTRT_04-4.1_c5	4	0,8	3,96	0,60	1,11	18,40
eTRT_04-4.1_c6	4	0,8	3,96	0,60	1,02	18,44
eTRT_04-4.1_c7	4	0,8	3,96	0,60	1,10	18,45
Max. Abweichung von Mesh c4		0,00313	0,00048	0,08	0,29	
Max. Abweichung v	Max. Abweichung von Standard-Mesh c0		0,00427	0,00065	0,11	2,47

Tabelle II-3.20 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung der Kontrollmodellierungen (nach Gleichung II-1.1).

ModelIname	Wärmeleitfähigkeit λ		Steigung der linearen	Abweichung von Gesteins-	Maximale, nach 3 Tagen	
	Gestein	Verpressung	Berechnet	Regression im Auswerte-	wärmeleitfähigkeit	erreichte Endtemperatur
	(vorgegeben)	(vorgegeben)		bereich (48h – 72h)		
	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[-]	[%]	[°C]
eTRT_04-3.1_c0	2	0,8	2,00	1,19	0,03	23,12
eTRT_04-3.1_c1	2	0,8	2,00	1,19	0,11	27,05
eTRT_04-3.1_c2	2	0,8	2,00	1,20	0,11	23,44
eTRT_04-3.1_c3	2	0,8	2,00	1,20	0,12	25,84
Max. Abweichung von Standard-Mesh c0		)	0,00190	0,00113	0,09	3,93
eTRT_04-3.1_c4	2	0,8	2,00	1,19	0,03	20,64
eTRT_04-3.1_c5	2	0,8	2,00	1,19	0,11	20,93
eTRT_04-3.1_c6	2	0,8	2,00	1,19	0,11	20,97
eTRT_04-3.1_c7	2	0,8	2,00	1,20	0,12	20,98
Max. Abweichung von Mesh c4		0,00196	0,00117	0,10	0,34	
Max. Abweichung von Standard-Mesh c0		0,00189	0,00113	0,09	2,47	

Diese Problematik wird bislang nur in den Feflow White Papers V (DHI-WASY 2010) angesprochen und dort lediglich im Zusammenhang bei einer Benutzung der neu implementierten BHE-Funktion. Laut mündlicher Aussage des Feflow-Supports (2012) verhalten sich die am selben Knoten gemessenen Temperatur-, bzw. Head-Werte bei Heat und Flow-Randbedingungen vierter Ordnung allerdings identisch. Das heißt, dass grundsätzlich die am Knoten des Wärme- bzw. Flow-Eintrags gemessenen Werte vom Programm über- bzw. unterschätzt werden, je nachdem welches Vorzeichen der Eintrag besitzt. Dies kann man sehr deutlich in Abb. II-3.38 und Abb. II-3.39 erkennen.

Da sich die Temperaturfront der thermalen Beeinflussung des numerischen Netzes durch die Wärmeeinbringung am Anfang der Einbringung im Nahbereich des Einbringungsknotens befindet, ist dort in diesem zeitlichen Bereich auch die Verzerrung der absoluten Temperaturen am höchsten (Abb. II-3.38 & Abb. II-3-39). Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Temperaturfront weiter vom Einbringungsknoten weg und damit der durch die Wärmeeinbringung beeinflusste Bereich größer ist, ist auch der Anstieg der Temperaturen nur noch minimal durch die Verzerrung beeinflusst. Dies bedeutet, dass es zu einem Versatz der Temperaturkurve kommt, die Kurve jedoch im zeitlich hinteren Bereich (Auswertebereich) parallel zu den von der Verzerrung unbeeinflussten Werten verläuft.



Abbildung II-3.38 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_04-4.1c0 bis c7.



Abbildung II-3.39 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT\_04-3.1c0 bis c7.

Da die Steigungen der Temperaturkurven im Auswertebereich und damit die berechneten Wärmeleitfähigkeiten in allen Kontrollmodellen beider Modellreihen bis in die dritte Nachkommastelle annähernd gleich sind (Tab. II-3.20), kann man die Ergebnisse der Haupt-Modellreihen eTRT\_04 bis eTRT\_07 als hinreichend aussagekräftig ansehen.

Um eine Konvergenz der Modelle an reale Temperaturwerte bei sehr feinem Meshing aufzuzeigen, wurden analog zu den Modellen eTRT\_04-4.1c4 bis c7 fünf weitere Modelle mit unterschiedlich feinem Meshing gerechnet, die jedoch nicht weiter auf ihre Wärmeleitfähigkeiten ausgewertet wurden (Tab. II-3.21, Abb. II-3.40). Das Modell mit der feinsten Auflösung (c7 mit ca. 340.000 Knoten) wurde hierbei als Referenzmodell herangezogen.

ModelIname	Mesh	Anzahl Knoten pro Slice/Layer	Endtemperatur [°C]	Temperaturdifferenz zum Referenzmodell eTRT_04-4.1c7 [°C]
eTRT_04-4.1_c4	Triangle normal	39.802	18,15660	0,29314
eTRT_04-4.1_c5	GridBuilder fein	194.996	18,39953	0,05021
eTRT_04-4.1_c6	Triangle fein 2	198.347	18,44201	0,00773
eTRT_04-4.1_c7	Triangle fein 4	338.606	18,44974	-
eTRT_04-4.1_c8	Triangle grob	8.560	18,36159	0,08815
eTRT_04-4.1_c9	Triangle 1c	128.683	18,44757	0,00217
eTRT_04-4.1_c10	Triangle fein 3	245.346	18,44959	0,00015
eTRT_04-4.1_c11	Triangle fein 1b	117.751	18,22497	0,22477
eTRT_04-4.1_c12	Triangle fein 1a	78.908	18,22240	0,22734

**Tabelle II-3.21** Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT\_04-4.1c4 bis c12(Wärmeeinbringung Heat source solid).



Abbildung II-3.40 Konvergenzplot der Modellreihe eTRT\_04-4.1c.

Bei einer Erhöhung der Knotenzahl numerischer Modelle sollten sich bei einem gleichmäßig verteilten Gitter die erhaltenen Endtemperaturwerte einem Optimalwert annähern, der am ehesten den realen Temperaturen bei einer Umsetzung des Modells in der Realität entspricht. Trägt man den Dekadischen Logarithmus der Knotenanzahl zum Dekadischen Logarithmus der Temperaturdifferenz zwischen Modell und Referenzmodell (c7) auf (Abb. II-3.40), so sollte eine lineare Abhängigkeit mit einer Steigung zwischen -1 und -2 der erhaltenen Werte erkennbar sein.

Die vorliegenden Werte zeigen nur eine schwache lineare Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich 0,28 (Abb. II-3.40). Es zeigt sich, dass im vorliegenden Fall nicht nur die Anzahl der Knoten für die Unterschiede in den erhaltenen Temperaturwerten verantwortlich sind. Dies lässt darauf schließen, dass zusätzliche Faktoren, wie z.B. eine jeweils unterschiedliche Anordnung der Knoten im Nahbereich der Wärmeeinbringung, bzw. des modellierten Bohrlochs, Auswirkungen auf die erhaltenen Endtemperaturen besitzen können. Da die Knoten im Nahbereich der modellierten Erdwärmesonde von Modell zu Modell nicht gleichmäßig verteilt wurden, ist hier keine direkte Konvergenz zu den Werten des Modells mit der höchsten Knotenanzahl erkennbar. Da die Temperaturen jedoch nur wenig voneinander abweichen, kann man auch hier von einer guten Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Modelle sprechen.

## II-4. Vergleich der Ergebnisse

Da die Kontrollmodelle eTRT\_04-4.1c0 bis c7 und eTRT\_04-3.1c0 bis c7 gezeigt haben, dass die Modelle auch bei verschiedenem Meshing vergleichbare Wärmeleitfähigkeitswerte liefern, ist es möglich, die Ergebnisse der vier Modellreihen mit der Durchführung und den Ergebnissen von enhanced Thermal Response Tests zu vergleichen und zu bewerten.

#### II-4.1 Modellreihe mit reiner Konduktion

Die Modellreihe eTRT\_04 hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Modelle bei einem rein konduktiven Wärmetransport alle sehr nahe an den im Modell vorgegebenen Gesteinswärmeleitfähigkeiten liegen. Die größte Abweichung innerhalb der Modellreihe wurde erreicht bei einer rein innenliegenden Kabelgeometrie (Modellposition 3 & 4) und einer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials (Modell 3 & 4). Selbst bei diesen Modellen jedoch wird ein Wert von ca. 6% Abweichung zur Gesteinswärmeleitfähigkeit nicht überstiegen (Tab. II-3.10).

Da man davon ausgehen kann, dass diese Konstellation in der realen Testdurchführung relativ selten vorkommt (kleinerer Bohrradius, Einhaltung des Zeitkriteriums bei der Messung, Befestigung der Glasfaserkabel alle 2-4 m außen an den Erdwärmesondenrohren, etc.), bzw. durch den Einsatz von speziell für Erdwärmesonden hergestellten Verfüllzementen (verbesserte Wärmeleitfähigkeit  $\ge 2$  W/(m K)) relativ einfach zu verhindern ist, kann man von einer sehr guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eines eTRT bei rein konduktiven Untergrundbedingungen ausgehen.

### II-4.2 Modellreihe Konduktion bei einem 3-Schicht-Modell

Die Ergebnisse der Modellreihe eTRT\_05 haben gezeigt, dass auch die berechneten Werte auch bei einer geschichteten Geologie sehr nah an den für das Gestein festgelegten Werten liegen. Lediglich im direkten Übergangs-Slice zwischen zwei Schichten mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit, weichen die Ergebnisse stärker von den für das Gestein vorgegebenen Werten ab (Tab. II-3.13). Da sich die Wärme, die auf diesem Slice in den Untergrund abgegeben wird, gleichmäßig zur Hälfte in die obere (bzw. untere) Schicht verteilt (Brunnen-Funktion von Feflow), ist auch der Temperaturanstieg und damit die berechnete Wärmeleitfähigkeit direkt davon abhängig. Es hat sich gezeigt, dass die berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte auf den entsprechenden Slices nur minimal von dem Mittelwert der Wärmeleitfähigkeiten zwischen oberer (bzw. untere) Schicht und der mittleren Schicht abweichen (max. 2%, Tab. II-3.13). Dies zeigt, dass der eTRT, auch im Fall eines stratigraphisch unterschiedlichen geschichteten Untergrundes mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, sehr gut reproduzierbare Ergebnisse liefert.

## II-4.3 Modellreihe Konduktion mit Wärmeeintragsänderungen

Spannungsänderungen während des Messbetriebs sind ein nicht zu unterschätzendes Problem bei der Durchführung von Thermal Response Tests. Auch die vorliegenden Modellierungsergebnisse der Testreihe eTRT\_06 zeigen dies deutlich. Selbst bei kleineren linearen Änderungen des Wärmeeintrags über den Messzeitraum, weichen die Ergebnisse deutlich von den vorgegebenen Gesteinswärmeleitfähigkeiten ab. Die Abweichungen sind zum Teil so stark, dass die Ergebnisse eine Aussage über die Untergrundwärmeleitfähigkeiten nicht zulassen (Tab. II-3.14). Da die Wärmequelle beim eTRT auch noch in unmittelbarer Nachbarschaft zum Temperatursensor steht (Kupferlitze und Glasfaser des LWL-Hybridkabels), sind die Auswirkungen von Spannungs- und damit Wärmeeintrags-schwankungen viel unmittelbarer in den Temperaturdaten festzustellen, als dies bei einem herkömmlichen TRT der Fall ist. Dies wurde auch in mehreren Feldversuchen beobachtet.

Wenn der Wärmeeintrag mit der Temperatur über die Messdauer aufgezeichnet wird, ist es lediglich in einfachen Fällen möglich, die Temperaturkurven der Rohdaten zu bereinigen und auf exakte Ergebnisse zu kommen. Die vorliegenden Modellierungen zeigen, dass eine nicht konstante Wärmezufuhr in den Untergrund eine der großen Fehlerquellen bei der herkömmlichen Auswertung von Thermal Response Tests mittels der Linienquellentheorie darstellt. Zur Lösung des Problems muss eine andere Herangehensweise gefunden werden.

### II-4.3.1 Theoretische Lösung mit schwankender Wärmezufuhr

Um eine Lösung des Problems schwankender Heizleistung bei TRTs und eTRTs zu erlangen muss man auf die Herleitung der für die Auswertung verwendeten Formeln zurückgehen. Die theoretische Herleitung der Linienquellenformel (Gleichung I-2.1 & II-1.1) ist in CARSLAW & JAEGER (1959) und HELLSTRÖM (1991) ausführlich erläutert. Sie leitet sich aus der folgenden Integral-Lösung der Laplace-Transformation ab (HELLSTRÖM 1991 nach CARSLAW & JAEGER 1959):

$$T^{q}(\mathbf{r},\mathbf{t}) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ -\frac{1}{r_{b}} \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \left( 1 - e^{-\alpha u^{2}t} \right) \frac{J_{0}(ur)Y_{1}(ur_{b}) - Y_{0}(ur)J_{1}(ur_{b})}{u^{2} [J_{1}^{2}(ur_{b}) + Y_{1}^{2}(ur_{b})]} du \right]$$
(II-4.1)
Τ <sup>q</sup>	Temperatur [K]									
r	Radi	us [m]								
t	Zeit [	s]								
q	Wärr	nefluss [W/m]								
λ	Wärr	neleitfähigkeit [W/(m K)]								
r <sub>b</sub>	Bohr	lochradius [m]								
α	Tem	peraturleitfähigkeit [m²/s]								
J <sub>0</sub> (u), J <sub>1</sub>	(u)	Bessel Funktion erster Ordnung								
Y <sub>0</sub> (u), Y	₁(u)	Bessel-Funktion zweiter Ordnung								

Eine numerisch einfachere, programmierbare Lösung des vorigen Integrals ist mittels der folgenden Gleichungen gegeben (HELLSTRÖM 1991 nach VEILLON 1972 und BAUDOIN 1988):

$$T^{q}(\mathbf{r},\mathbf{t}) = \frac{q}{2\pi r_{b}\lambda} \sum_{j=1}^{j=10} \frac{V_{j}}{j} \frac{K_{0}(\omega_{j}r)}{\omega_{j}K_{1}(\omega_{j}r_{b})}$$
(II-4.2a)

mit

$$\omega_j = \sqrt{\frac{jln(2)}{\alpha t}} \tag{II-4.2b}$$

und

$$V_j = \sum_{k=Int(\frac{j-1}{2})}^{min(j,5)} \frac{(-1)^{j-5}k^5(2k)!}{(5-k)!\Gamma(k)k!(j-k)!\Gamma(2k-j+1)}$$
(II-4.2c)

 $K_v(x)$  modifizierte Bessel-, bzw. MacDonald-Funktion

Γ(k) Gamma-Funktion, Γ(k) entspricht (k-1)! für ganzzahlige k (ABRAMOWITZ & STEGUN 1964)

Eine Annäherung der Lösung von Gleichung II-4.1 mittels des Exponentialintegrals E<sub>1</sub> ist in CARSLAW & JAEGER (1959) und HELLSTRÖM (1991) wie folgt als Linienquellen-Approximation beschrieben:

$$T^{q}(\mathbf{r},\mathbf{t}) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_{1}\left(\frac{r^{2}}{4\alpha t}\right) \tag{II-4.3}$$

Für lange Zeiträume  $\frac{\alpha t}{r^2} \ge 5$  kann das Integral  $E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)$  mit  $ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma$  angenähert werden.

Hieraus ergibt sich folgende Gleichung (HELLSTRÖM 1991, KRISTIANSEN 1982, GEHLIN 2002), die als Langzeitlösung der Linienquelle bezeichnet wird und die Grundlage darstellt zur Auswertung von TRTs (Gleichung I-2.1 & Gleichung II-1.1):

$$T^{q}(t) = \frac{q_{k}}{4\pi\lambda} \left[ ln\left(\frac{4\alpha t}{r_{b}^{2}}\right) - \gamma \right] \qquad \text{mit} \qquad q_{k} = konst. \tag{II-4.4}$$

T<sub>f</sub> Temperatur Fluid [K]

qk konstanter Wärmefluss [W/m]

γ Euler-Mascheroni-Konstante [-]



**Abbildung II-4.1** Darstellung der dimensionslosen Temperaturänderung  $4\pi\lambda T_b^q/q_1$  als Funktion der dimensionslosen Zeit  $\alpha t/r_b^2$  berechnet mit Beispielwerten bei  $r = r_b$  (nach HELLSTRÖM 1991). Rote, durchgezogene Linie = numerische Inversion der Laplace-Transform-Lösung (Gleichung II-4.2), grüne, gestrichelte Linie = Linienquellenapproximation (Gleichung II-4.3) und blaue, gepunktete Linie = Langzeitlösung der Linienquelle (Gleichung II-4.4). Gut zu erkennen ist der Unterschied zwischen der exakten Lösung (durchgezogene Linie) und der Näherung (gepunktete Linie) bei kleinen  $\alpha t/r_b^2$  (und damit kleinen t).

**Tabelle II-4.1** Fehler zur exakten Lösung bei Unterschiedlichen  $\alpha t/r_b^2$  (HELLSTRÖM 1991).

αt/r <sub>b</sub> ² [-]	5	10	20	50	100
Fehler [%] ~	10,5	5,3	2,5	1,0	0,5

Da Gleichung II-4.4 eine mit vielfachen Vereinfachungen versehene Annäherung der exakten Lösung (Gleichung II-4.1) ist (HELLSTRÖM 1991), ergibt sich bei kleinen Zeitschritten *t* ein relativ großer Fehler zwischen der Lösung nach VEILLON (1972) (Gleichung II-4.2) und der Langzeitlösung der Linienquellenapproximation (Gleichung II-4.4). Dieser Fehler fällt erst ab einem Wert von rund  $\frac{\alpha t}{r_{z}^{2}} > 5$  auf einen Wert von unter 10% (Tab. II-4.1, Abb. II-4.1).

Für die Linienquellengleichung (II-4.4) gibt es ein Step-Pulse-Verfahren, bei der Änderungen des Wärmeeintrags berücksichtigt werden können (HELLSTRÖM 1991, YAVUZTURK & SPITLER 1999). Das Verfahren bedient sich Heavyside-Treppenfunktionen, um die schrittweise Änderung des Wärmeeintrags zu beschreiben (HELLSTRÖM 1991). Die Schrittlänge jedes Wärmepulses wird dabei so bestimmt, dass der Fehler zur exakten Lösung möglichst gering ist. Das bedeutet, dass es bei einer Änderung des Wärmeeintrags eine Mindestzeitlänge für einen vorgegeben Fehler gibt (Tab. II-4.1). Bei herkömmlichen Temperaturleitfähigkeiten für Gesteine bedeutet dies in Abhängigkeit vom Bohrlochdurchmesser, dass mindestens 2-3, oft sogar 30-40 Stunden zwischen einer Spannungsänderung liegen müssen (siehe Beispiel 1), damit der mathematische Fehler bei diesem Schritt unter 10% liegt (bei angestrebten kleineren Fehlern liegt die Zeit teilweise deutlich höher).

## Beispiel 1 für einen tolerierten Fehler von 10% (Tab. II-4.1):

$$\alpha = 1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \qquad r_b = 0.15 \text{ m} \rightarrow t = \frac{5r_b^2}{\alpha} = \frac{5.0.15^2 m^2}{1.10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 112500 \text{ s} = 31,25 \text{ h}$$

Die nötigen Zeitschrittlängen zwischen einzelnen Wärmeeintragsänderungen beim Step-Pulse-Verfahren sind somit auch bei günstigen Verhältnissen viel zu hoch, da sich die Schwankungen in der Realität meist minütlich oder sogar sekündlich ändern. Das Verfahren ist somit für die reale Anwendung bei sehr kurzfristigen Wärmeeintragsschwankungen nicht geeignet und wird deshalb auch meist bei langfristigen Änderungen im Wärmeeintrag verwendet (HELLSTRÖM 1991, YAVUZTURK & SPITLER 1999), wie z.B. die monatsweise Änderung des Eintrags beim Programm EED. Der Lösungsweg nach VEILLON 1972 und BAUDOIN 1988 (Gleichungen II-4.2a-c) liefert im Vergleich zur Linienquellenapproximation exaktere Werte und kann zur Berechnung herangezogen werden. Um mittels Gleichung II-4.2a den Temperaturanstieg bei einem eTRT simulieren zu können, muss die Gleichung analog zu Gleichung I-2.1 um die ungestörte Untergrundtemperatur T<sub>s</sub> und den Term des Bohrlochwiderstandes R<sub>b</sub> erweitert werden:

$$T^{q}(\mathbf{r}, \mathbf{t}) = \frac{q}{2\pi r_{b}\lambda} \sum_{j=1}^{j=10} \frac{V_{j}}{j} \frac{K_{0}(\omega_{j}r)}{\omega_{j}K_{1}(\omega_{j}r_{b})} + qR_{b} + T_{s}$$
(II-4.5)

R<sub>b</sub> thermischer Bohrlochwiderstand [(K m)/W]

T<sub>s</sub> Temperatur ungestörter Untergrund [°C]

Da die Ermittlung von  $\lambda$  aus obiger Gleichung durch die zusätzliche Unbekannte R<sub>b</sub> nicht eindeutig lösbar ist, wurde versucht mittels der Programmierung eines grid search Algorithmus mit wechselnden Werten für  $\lambda$  und R<sub>b</sub> zu einer Lösung zu kommen. Bei einer Berechnung einer Temperaturkurve nach Gleichung II-4.5 bewirkt eine Änderung der Werte für  $\lambda$  eine Änderung der generellen Steigung der dargestellten Kurve. Eine Änderung von R<sub>b</sub> bewirkt hingegen eine Parallelverschiebung des hinteren Teils der Temperaturkurve. Vergleicht man nun die aus Gleichung II-4.5 für beliebige  $\lambda$  und R<sub>b</sub> entstandene Temperaturkurve mit der Temperaturkurve, deren  $\lambda$ - und R<sub>b</sub>-Werte zu ermitteln sind (z.B. die Temperaturkurve aus einem TRT oder eTRT), so sollten die  $\lambda$ - und R<sub>b</sub>-Werte annähernd identisch sein, wenn die Quadrate der Differenzen zwischen den beiden Temperaturkurven möglichst klein sind. Summiert man die Differenzenguadrate im Auswertebereich (Tag 2 bis Tag 3, Abb. II-4.2), so erhält man einen Wert, der kleiner wird, je besser die Übereinstimmung zwischen der berechneten und der vorgegebenen Temperaturkurve ist. Ein Kontour-Plot der summierten Differenzenquadrate ist in Abbildung II-4.2 aufgetragen. Der rote Punkt bezeichnet den Punkt, an dem die Summe der Differenzenquadrate am niedrigsten ist. Dementsprechend sollten die Werte dieses Punktes für λ- und R<sub>b</sub>, annähernd mit den entsprechenden Werten der vorgegebenen Temperaturkurve identisch sein. Es zeigt sich allerdings, dass im vorliegenden, beispielhaften Fall die Werte voneinander abweichen (Abb. II-4.2). Die vorgegebene Temperaturkurve besitzt Werte für  $\lambda$ - und R<sub>b</sub> von 2 W/(m K) und ca. 0,18 (m K)/W. Die mittels des grid-search Algorithmus ermittelten Werte liegen jedoch bei 1,6 W/(m K) und 0,16 (m K)/W. Man erkennt zudem, dass zwar ein niedrigster Wert ermittelt werden konnte, dass aber in einer von links unten nach rechts oben ansteigenden Kurve ein Bereich liegt, in dem ähnlich niedrige Werte für  $\lambda$ - und R<sub>b</sub> liegen und somit auch hier die Aussage der Wärmeleitfähigkeitsermittlung nicht eindeutig ist.



**Abbildung II-4.2** Darstellung der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bei konstanter Wärmezufuhr mittels einer grid search Berechnung. Der rote Punkt im Kontour-Plot zeigt den besten Fit zwischen den beiden Temperaturkurven im Auswertebereich und somit die Werte für  $\lambda$  und R<sub>b</sub> an.

Aufgrund der nicht eindeutigen Ergebnisse liefert auch dieser Lösungsweg keine klaren Ergebnisse, die das Problem eines schwankenden Wärmeeintrags während TRT- und eTRT-Messungen zufriedenstellend lösen.

## II-4.3.2 Lösung des Wärmezufuhrproblems über das Relaxationsverhalten

Es ist möglich das Problem schwankenden Wärmeeintrags über das Relaxationsverfahren (Kapitel II-1.2.3) zu lösen. Die Herangehensweise erfolgt analog zur Methode nach HORNER (1951), die für die Bestimmung der hydraulischen Permeabilität über den Druckabbau in Bohrlöchern entwickelt wurde (Horner Plot). Für die Anwendung bei Thermal Response Tests bedeutet dies, dass zusätzlich zum Temperaturanstieg auch der Temperaturabfall nach Beendigung der Wärmezufuhr aufgezeichnet und ausgewertet wird (Gleichung II-1.3). Die dem Verfahren zugrunde liegende Gleichung wird nach DORNSTÄDTER et al. (2008) wie folgt beschrieben:

$$T^{q}(t) = \frac{\dot{q}_{L}}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{t}{t-t_{h}}\right) + T_{b}$$
(II-4.6)

$\dot{Q_L}$	Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]
λ	Wärmeleitfähigkeit des Messabschnitts [W/(m K)]
t	Zeit [s]
$t_{\rm h}$	Dauer des Aufheizvorgangs [s]
$T_{b}$	ungestörte Temperatur der Glasfaser [°C]

Die zur Auswertung benötigte Heizleistung  $\dot{Q}_L$  berechnet sich hierbei aus der Gesamtmenge der eingebrachten Wärme  $Q_{total}$  über dem Zeitabschnitt  $t_h$  des Aufheizvorgangs der Messung (Gleichung II-4.7). Mögliche Schwankungen der eingebrachten Wärme sind somit für die vorliegende Vorgehensweise unerheblich.

$$\dot{\boldsymbol{Q}}_L = \frac{\boldsymbol{Q}_{total}}{t_h} \tag{II-4.7}$$

 $\dot{Q_L}$  Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]  $Q_{total}$  Eingebrachte Gesamtwärmemenge [J/m]

*th* Dauer des Aufheizvorgangs [s]

Mittels der so bestimmten mittleren Heizleistung lässt sich anhand des Relaxationsverfahrens (Kapitel II-1.2.3) die Wärmeleitfähigkeit der Beispielkurve von Modell eTRT\_06-7 (Abb. II-4.3) und Modell eTRT\_06-9 bestimmen (Tab. II-4.2). Das für den vorliegenden Lösungsweg neu erstellte Modell eTRT\_06-9 entspricht in seinen thermischen Eigenschaften hierbei Modell eTRT\_04-4.3 ( $\lambda_{rock}$  = 4 W/(m K),  $\lambda_{fill}$  = 0,8 W/(m K), Kabelposition 3). Beide Modelle wurden um die Temperaturabklingkurve (von Tag 3 bis Tag 8) erweitert und ausgewertet.

**Tabelle II-4.2** Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Modell eTRT\_06-7 ( $\lambda_{rock} = 2 \text{ W/(m K)}$ ) und Modell eTRT\_06-9 ( $\lambda_{rock} = 4 \text{ W/(m K)}$ ) mit dem Relaxationsverfahren. Der zur Berechnung verwendete Messabschnitt liegt zwischen Tag 6 und Tag 8.

Modell	eingebrachte Wärme <i>Q<sub>total</sub></i>	Dauer der Aufheizung <i>t</i> a	Steigung der Relaxations- geraden <i>m</i> rear	berechnete Wärmeleit- fähigkeit <i>1</i>	Abweichung vom Modell- wert Amer		
	[J/m]	[s - d]	[K]	[W/(m K)]	[%]		
eTRT_06-7	7,776·10 <sup>6</sup>	2,592·10 <sup>5</sup> - 3	1,20	1,99	0,6		
eTRT_06-9	7,776·10 <sup>6</sup>	2,592·10 <sup>5</sup> - 3	0,64	3,71	7,2		

Tabelle II-4.2 zeigt deutlich, dass die Verwendung des Relaxationsverfahrens auch bei stark von Wärmeeintragsänderung betroffenen Messungen zu korrekten Ergebnissen führt (Abweichung von Modell eTRT\_06-7 bei unter 1%, von Modell eTRT\_06-9 bei ca. 7%). Damit das Verfahren jedoch verwendet werden kann, ist es nötig die Temperaturen auch nach Beendigung des Aufheizvorgangs weiter zu messen. Hierfür sollte mindestens dieselbe Zeit wie für den Aufheizvorgang verwendet werden.



**Abbildung II-4.3** Darstellung der Auswertung nach dem Relaxationsverfahren für Modell eTRT\_06-7. Der Auswertebereich liegt zwischen Tag 6 und Tag 8. Die Auswertung von Modell eTRT\_06-9 erfolgte analog.

## II-4.4 Modellreihe 3-Schicht-Modell mit Grundwasserfluss

In einer Vielzahl von Fällen durchteufen Erdwärmesonden Aquifere mit teils großen Grundwasserfließgeschwindigkeiten. Die Modellreihe eTRT\_07 hat diesen Fall simuliert und erwartungsgemäß erhöhte effektive Wärmeleitfähigkeiten bei Grundwasserfluss in der mittleren Schicht festgestellt. Die Höchstwerte für die effektive Wärmeleitfähigkeit sind hier erwartungsgemäß bei dem Modell mit der höchsten Grundwasserfließgeschwindigkeit (~86 cm/d, Modell eTRT\_07-1) anzutreffen. Der errechnete Wert übersteigt die konduktive Wärmeleitfähigkeit des Umgebungsgesteins um das nahezu 18,5-fache. Aber auch schon geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten (~8,6 mm/d, Modell eTRT\_07-5) bewirken einen Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit um ca. 45% (Tab. II-3.15 & II-3.16).

Gut zu beobachten ist auch ein leichter Unterschied in den Wärmeleitfähigkeiten der beiden Observation Points pro Modell. Die berechneten Wärmeleitfähigkeiten der linken, unteren OPs sind in allen Modellen leicht höher, als die berechneten Wärmeleitfähigkeiten der rechten, oberen OPs (Abb. II-3.33). Ursache hierfür ist die unterschiedliche Anströmung der beiden OPs (Strömungsrichtung bei allen Modellen von links, nach rechts). Die angeströmte Fläche der Bohrlochwand (linker Halbkreis der Bohrlochwand) liegt näher beim linken, unteren OP, als beim rechten, oberen OP, der schon leicht im Fließschatten der Erdwärmesonde liegt (rechter Halbkreis der Bohrlochwand). Dadurch erfährt der linke, untere OP einen stärkeren Wärmeabtransport durch das Grundwasser, als der rechte, obere, was sich in leicht erhöhten, berechneten Wärmeleitfähigkeiten widerspiegelt.

Die Modelle zeigen somit, dass fließendes Grundwasser einen nicht unerheblichen Teil zum Wärmeabtransport bei eTRTs beitragen kann. Die errechneten Werte für die effektive Wärmeleitfähigkeit ist zum Teil um ein Vielfaches höher, als der reale Gesteinswert. Bei periodisch auftretender Grundwasserströmung kann dies zu einer Überschätzung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und damit zu Dimensionierungsfehlern bei der Planung von Erdwärmesondenanlagen führen. Grundsätzlich sind aus eTRTs berechnete Werte über einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 5 bis 6 W/(m K) kritisch, bzw. als durch Grundwasser beeinflusst zu sehen. Einheitliche Regelungen, wie bei von Grundwasser beeinflussten TRTs und eTRTs hinsichtlich der Dimensionierung und Planung vorgegangen werden sollte, existieren bislang nicht.

Eine Peclét-Zahl-Analyse (Gleichung II-1.4, II-1.5 & II-1.6) bei der vorliegenden Modellreihe führte zu Ergebnissen mit teils größeren Abweichungen zu den Erwartungswerten. Allgemein lässt sich sagen, dass die Festlegung der charakteristischen Länge auf den thermischen Einflussbereich der Sonde, bessere Ergebnisse liefert als die Festlegung des Parameters auf

den Bohrlochdurchmesser (Tab. II-3.17 & II-3.18). Es zeigte sich ebenfalls bei beiden Methoden, dass die Abweichungen von den zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten mit deren tatsächlicher Abnahme zunehmen. Eine lineare Beziehung der Unterschiede zu den angesetzten Werten ist hierbei nicht zu erkennen. Als Ursache möglich sind Effekte, die von der unterschiedlichen Umströmung der Sonde bei den unterschiedlichen Modellen herrühren (unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten im Umströmungsbereich der Sonde). Weiterführende Untersuchungen zu der Anwendbarkeit der Methode bei Modellrechnungen sind hier sinnvoll. Allgemein lässt sich sagen, dass die Werte, auch bei größerer Abweichung, doch zumindest in der richtigen Größenordnung liegen, weshalb die Methode für eine Abschätzung der Fließgeschwindigkeit in erster Näherung trotzdem geeignet ist.

## II-5. Diskussion der Modellierungsergebnisse

Die 4 unterschiedlichen Modellreihen aus Kapitel 3 haben gezeigt, dass der enhanced Thermal Response Test (eTRT) eine wirkungs- und sinnvolle Methode zur Bestimmung tiefenaufgelöster Wärmeleitfähigkeiten bei Erdwärmesondenprojekten ist. Die Unterschiede zwischen den berechneten zu den dem Gestein in den Modellen zugewiesenen Wärmeleitfähigkeiten sind selbst in ungünstigen Fällen nur minimal (bis max. ~6%). Da in den als ungünstig anzusehenden Modellen das Zeitkriterium nicht eingehalten wurde, wäre in der Realität, bei einer Einhaltung des Kriteriums durch eine Verlängerung der Testperiode (länger als 3 Tage), die Abweichung vom realen Untergrundwert sogar noch niedriger.

Unterschiede in den Gesteinswärmeleitfähigkeiten (Schichtaufbau des Untergrundes) bildet der Test in der Modellreihe sehr genau ab. Lediglich in den Übergangsbereichen zwischen den Schichten sind höhere Abweichungen möglich, da sich dort eine Misch-Wärmeleitfähigkeit zwischen der oberen und unteren Schicht einstellt. Dies wird hauptsächlich durch die relativ grobe Auflösung in der z-Richtung (1 m Slice-Abstand) hervorgerufen. Modellierungen mit einer feineren Auflösung des betreffenden Bereichs wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit (reale Messpunktabstande ca. 1 m) nicht durchgeführt.

Bei Grundwasserfluss zeigen die Modelle, dass der advektive Wärmeabtransport erwartungsgemäß zu einer Erhöhung der berechneten, effektiven Wärmeleitfähigkeit führt. Hier kann der eTRT wertvolle Hinweise auf das Vorhandensein, die Lokation und die Stärke des anliegenden Grundwasserstroms liefern.

Schwankungen in der Wärmeeinbringung sind, wie bei herkömmlichen TRTs, auch bei eTRTs eine wichtige Fehlerquelle. Da die Temperaturmessung beim eTRT in direkter Nachbarschaft zur Wärmeerzeugung steht (beides untergebracht in einem LWL-Hybridkabel, ca. 1-2 mm Abstand), ist der Test anfälliger für Schwankungen in der Wärmeleistung (in der Praxis oft hervorgerufen durch Spannungsschwankungen beim Baustrom). Zur Vermeidung dieser Problematik können Geräte zur elektrischen Spannungskonstanthaltung der Wärmeeinbringung vorgeschaltet werden. Durch Spannungsschwankungen betroffene Temperaturkurven können in einfachen Fällen bei Kenntnis der Spannungsunterschiede bereinigt werden. Bei komplexen Spannungsverteilungen ist dies oft nicht oder nur unter großem mathematischen Aufwand möglich (Kapitel II-4.3.1). Mittels der Auswertung des Relaxationsverhaltens bei von Schwankungen betroffenen Kurven kann jedoch die Wärmeleitfähigkeit des Umgebungsgesteins mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden (Kapitel II-4.3.2).

## Zusammenfassung Abschnitt I und Abschnitt II

Die Nutzung regenerativer Energien zur Wärmeerzeugung ist weltweit ein wichtiger Punkt bei der Umsetzung von Klimaschutzzielen einerseits und der schrittweisen Entkopplung von kohlenwasserstoffbasierter Wärmenutzung andererseits. Die oberflächennahe Geothermie kann hier einen wichtigen Beitrag leisten. Unsicherheiten bei der Bewertung des geologischen Untergrunds sind jedoch gerade bei größeren Projekten ausschlaggebend für Erfolg oder Misserfolg des Projektes.

Um Unsicherheiten in der Planungsgrundlage solcher Projekte zu minimieren, ist die Bestimmung von Untergrundparametern, wie z.B. der Wärmeleitfähigkeit der erbohrten Gesteine, eine zentrale Herausforderung an die Planer von Erdwärmesondenanlagen. Aber auch im Betrieb erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen sind Optimierungspotentiale gegeben, die über eine Aufzeichnung und Bewertung verschiedener überwachter Betriebsparameter (z.B. Wärmemengenzähler in der Anlage, Temperaturüberwachung des Untergrundes, etc.) ermittelt und umgesetzt werden können.

Die vorliegende Dissertation hat sich zum Einen mit der praktischen Qualitätssicherung an einem Beispielobjekt befasst (Abschnitt I, Forschungsprojekt "Qualitätssicherung bei Erdwärmesondenfeldern für Heiz- und Kühlzwecke und Überprüfung ihrer Effizienz im Ziel 2 Gebiet"), zum Anderen mit der Überprüfung einer neuartigen Messmethode zur Ermittlung von tiefenaufgelösten Wärmeleitfähigkeiten bei Erdwärmesonden mittels numerischer Modellierung (Abschnitt II, "Thermohydraulische Szenariomodellierungen des enhanced Thermal Response Tests").

In Abschnitt I zeigte sich, dass der enhanced Thermal Response Test ein wirksames Werkzeug zur Bestimmung und Bewertung tiefenaufgelöster Wärmeleitfähigkeiten bei Erdwärmesonden ist und überdies dazu beitragen kann, unverpresste Bereiche im Untergrund der Erdwärmesonde festzustellen und zu lokalisieren. Grundwasserströmung kann ebenfalls mittels des Tests in verschiedenen Tiefenbereichen lokalisiert und qualitativ bewertet werden. Schon bei kleineren Erdwärmesondenfeldern können solche, im Vorfeld des eigentlichen Ausbaus, z.B. an einer Probebohrung durchgeführten Messungen, zur Planungssicherheit und zur Kostenreduzierung durch Bohrmetereinsparung oder durch geringere jährliche Energiekosten beitragen. Die Einsparpotentiale hängen von der Anlagenart und -größe ab und bedürfen in jedem Fall einer Einzelfallbetrachtung.

Eine Temperaturüberwachung des Erdwärmesondenfeldes zeigte keine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Sonden. Mittels numerischer Modelle konnte gezeigt werden, dass Beeinflussungsmaxima von Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung, sowie von der Dauer des Wärmeentzugs abhängig sind. Die nicht zu erkennende Beeinflussung benachbarter Sonden kann im vorliegenden Fall alle drei Gründe als Ursache haben. Die Eingangsparameter der Erdwärmesondenfeld-Dimensionierung wurden übernommen und mittels zweier Modellierungsprogramme miteinander verglichen. Die Ergebnisse weichen nur unwesentlich voneinander ab und beeinflussen die Effizienz des Feldes nicht. Ein Vergleich zwischen geplantem und tatsächlichem Wärmebedarf (im ersten Betriebsjahr) ergab eine Abweichung von ca. 35%. Dies zeigt, dass die Ermittlung der Nutzungsparameter (Wärme-, Kältebedarf, etc.) häufig nicht allzu genau ist, jedoch die Effizienz der Anlage maßgeblich beeinflussen kann.

In Abschnitt II wurde die bereits in Abschnitt I vorgestellte und verwendete Methode des enhanced Thermal Response Tests mittels numerischer Modellierung auf ihre Reproduzierbarkeit hin überprüft und Stärken und Schwächen des Tests herausgearbeitet. Es zeigte sich, dass bei einem rein konduktiven Wärmetransport im Untergrund die Ergebnisse der berechneten Wärmeleitfähigkeiten sehr gut mit den vorgegebenen Wärmeleitfähigkeiten übereinstimmen. Selbst unter ungünstigen Bedingungen betrug die maximale Abweichung ca. 6% vom zu erwartenden Wert. Auch die vertikale Auflösung von Gesteinsschichten mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit gelingt bei den Modellierungen mit dem Tests sehr gut. Die Detektion von grundwasserdurchflossenen Schichten ist in den Modellen gut abbildbar und es zeigt sich eine große Abhängigkeit zwischen der Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der Grundwasserfließgeschwindigkeit.

Problematisch bleibt die auch bereits im Gelände festgestellte hohe Abhängigkeit des Tests von einer konstanten Wärmezufuhr (konstante elektrische Spannung). Die Modelle, die sich mit Abfällen, bzw. Anstiegen der Wärmezufuhr, sowie fluktuierendem Wärmeeintrag befassten, liefern in der Auswertung der Modellierung keine brauchbaren Ergebnisse. In solchen Fällen hat sich die Methode der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung mittels des Relaxationsverfahrens als sinnvollste Lösung herausgestellt.

## Ausblick

Die angesprochenen Probleme bei einer nicht konstanten Wärmezufuhr sind bislang nicht hinreichend gelöst. Weiterführende Forschung sollte sowohl auf Seiten der Spannungskonstanthaltung, als auch auf der mathematischen Nachbearbeitung von fehlerhaften Temperaturkurven liegen (bei aufgezeichneter Wärmeeinbringung). Eine Anpassung der exakten Lösung nach Gleichung II-4.2 an die vorliegende Problemstellung hat sich als schwierig herausgestellt. Die Anwendung des Relaxationsverfahrens an der vorliegenden Problemstellung hat sich als die sinnvollste Methode zur Berechnung von mit Wärmeeintragsschwankungen belasteten Temperaturkurven erwiesen. Auch der bisherige Einbau der Glasfaserkabel beim eTRT ist noch nicht optimal. Durch das Anbringen der Kabel an der Außenwandung der Sondenrohre, muss das Kabel nach der Verpressung im Bohrloch verbleiben. Dies verursacht zusätzliche Kosten für den Auftraggeber, welche durch einen neuartigen Test vermeidbar wären (geschätzte Einsparungen von bis zu 30% möglich). Eine Neuentwicklung des Thermal Response Tests mit einem im Erdwärmesondenrohr eingebrachten Spezialkabel würde es erlauben, auch nachträglich tiefenaufgelöste Wärmeleitfähigkeiten des Umgebungsgesteins zu messen. Eventuelle Schwierigkeiten bei der Messdatenauswertung, die durch Konvektion innerhalb des Erdwärmesondenrohres hervorgerufen werden könnten, müssen hierbei jedoch besonders beachtet und untersucht werden.

Die Ermittlung des tatsächlichen Wärme- und Kältebedarfs von Gebäuden ist bislang ebenfalls nicht hinreichend gelöst und bedarf eingehender Untersuchungen im Bereich der Heizungs- und Gebäudetechnik. Hier ist vor allem eine hinreichende Überwachung des Anlagenbetriebes durch entsprechende Messtechnik (Temperatur- und Wärmemengenzähler) sinnvoll.

## Literatur

- ABRAMOWITZ, M. & STEGUN, I.A. (1964) Handbook of Mathematical Functions; 1046 S., National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series 55, U.S. Department of Commerce, Washington.
- AFEI, T., DOTT, R. & HUBER, A. (2007) Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen; Scientific Report; 76 S.; Bundesamt für Energie BFE Schweiz, Bern.
- BARCENILLA, J.R., NUTTER, D.W. & COUVILLION, R.J. (2005) Effective Thermal Conductivity for Single-Bore Vertical Heat Exchangers with Groundwater Flow; ASHRAE Transactions 111/2: 258-263.
- BAUDOIN, A. (1988) Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par batterie
   d'éxchangeurs baionnette verticaux: modèle de prédimensionnement; 183 S.,
   L'Université de Reims Champagne-Ardenne, France (Dissertation).
- BLACKWELL, J.H. (1953) Radial-Axial Heat Flow in Regions Bounded Internally by Circular Cylinders; Canadian Journal of Physics **31/4**: 472-479.
- BLACKWELL, J.H. (1954) A Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk; Journal of Applied Physics **25/2**: 137-144.
- BLACKWELL, J.H. (1956) The Axial-Flow Error in the Thermal-Conductivity Probe; Canadian Journal of Physics **34/4**: 412-417.
- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. (1959) Conduction of Heat in Solids; 510 S.; Oxford University Press, Oxford.
- ČERMÁK, V. & RYBACH, L. (1982) Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks; In: Hellwege, K.-H. (ed), Landolt-Börnstein - Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group V: Geophysics and Space Research, Volume 1: Physical Properties of Rocks, Subvolume A, V-1a: 305-343, Springer Verlag, Berlin.
- CERMÁK, V. & RYBACH, L. (1979) Terrestial Heat Flow in Europe; 328 S., Springer Verlag, Berlin.
- CHIASSON, A.D., REES, S.J. & SPITTLER, J.D. (2000) A Preliminary Assessment of the Effects of Groundwater Flow on Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems; ASHRAE Transactions **106/1**: 380-393.

- CLAUSER, C. (2006) Geothermal Energy; In: Heinloth, K. (ed), Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group VIII: Advanced Materials and Technologies, Volume 3: Energy Technologies, Subvolume C: Renewable Energies, VIII-3C: 493-604, Springer Verlag, Berlin.
- CLAUSER, C. (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers; 332 S., Springer Verlag, Berlin.
- CLAUSER, C. & HUENGES, E. (1995): Thermal conductivity of rocks and minerals; In: AHRENS,T.J. (Eds.), Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants;American Geophysical Union, 105-126.
- DHI-WASY (2005a) FEFLOW White Papers Vol. I; 366 S., WASY GmbH, Berlin.
- DHI-WASY (2005b) FEFLOW White Papers Vol. II; 112 S., WASY GmbH, Berlin.
- DHI-WASY (2005c) FEFLOW White Papers Vol. III; 42 S., WASY GmbH, Berlin.
- DHI-WASY (2006) FEFLOW White Papers Vol. IV; 122 S., WASY GmbH, Berlin.
- DHI-WASY (2010) FEFLOW White Papers Vol. V; 108 S., WASY GmbH, Berlin.
- DIAO, N., LI, Q. & ZHAOHONG, F. (2004) Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection; International Journal of Thermal Sciences **43**: 1203-1211.
- DIERSCH, H.-J. (2005) WASY Software FEFLOW Reference Manual; 292 S., WASY GmbH, Berlin.
- DIERSCH, H.-J. (1993) GIS-based groundwater flow and transport modeling The simulation system FEFLOW; Praxis der Umwelt-Informatik Band 4 (Rechnergestützte Ermittlung, Bewertung und Bearbeitung von Altlasten): 187-208.
- DORNSTÄDTER, J., HEIDINGER, P. & HEINEMANN-GLUTSCH, B. (2008): Erfahrungen aus der Praxis mit dem enhanced Geothermal Response Test (EGRT); Tagungsband Der Geothermiekongreß 2008: 271-279, Karlsruhe.
- ERBAŞ, K., DANNOWSKI, G. & SCHRÖTTER, J. (1999): Reproduzierbarkeit und Auflösungsvermögen faseroptischer Temperaturmessungen für Bohrlochanwendungen: Untersuchungen in der Klimakammer des GFZ; 54 S., Scientific Technical Report 99/19, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- ESKILSON, P. (1987) Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes; 244 S., University of Lund, Sweden (Dissertation).

- FORRER, S., MÉGEL, T., ROHNER, E. & WAGNER, R. (2008) Mehr Sicherheit bei der Planung von Erdwärmesonden; bbr **5**: 42-47.
- FOWLER, C.M.R. (2000) The Solid Earth An Introduction to Global Geophysics; 472 S., Cambridge University Press, Cambridge.
- GEHLIN, S. & HELLSTRÖM, G. (2003) Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock; Renewable Energy **28/14**: 2221-2238.
- GEHLIN, S. (2002): Thermal Response Test Method Development and Evaluation; 191 S.; University of Luleå, Sweden (Dissertation).
- GEHLIN, S. (1998) Thermal Response Test In Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock; 73 S., University of Luleå, Sweden (Licentiate Thesis).
- HÄFNER, F., SAMES, D. & VOIGT, H.-D. (1992) Wärme- und Stofftransport Mathematische Methoden; 626 S.; Springer Verlag, Berlin.
- HÄHNLEIN, S., MOLINA-GIRALDO, N., BLUM, P., BAYER, P. & GRATHWOHL, P. (2010) Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden; Grundwasser **15/2**: 123-133.
- HARTOG, A.H. & PAYNE, D.N. (1982) A fibre-optic temperature-distribution sensor; IEE Colloquium Optic Fibre Sensors.
- HEIDINGER, P., DORNSTÄDTER, J., FABRITIUS, A., WELTER, M., WAHL, G. & ZUREK (2004) EGRT – Enhanced Geothermal Response Tests; 8 S., GTC Kappelmeyer GmbH, Karlsruhe.
- HELLSTRÖM, G. (1991): Ground Heat Storage Thermal analysis of Duct Storage Systems; 262 S.; University of Lund, Sweden (Dissertation).
- HELLSTRÖM, G. & SANNER, B. (1994) PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. IZW-Bericht **1/94**: 341-350; Karlsruhe.
- HESKE, C., KOHLSCH, O., DORNSTÄDTER, J. & HEIDINGER, P. (2011) Der Enhanced-Geothermal-Response-Test als Auslegungsgrundlage und Optimierungstool; bbr Sonderheft Oberflächennahe Geothermie 2011: 36-43.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W.G. (2009) Hydrogeologie; 383 S., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- HORNER, D. R. (1951) Pressure Build-up in Wells; Proceedings 3rd World Petroleum Congress, May 28 June 6 1951: 503-521, Den Haag.

- HUBER, H. (2013) Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Wärmetransportverhalten oberflächennaher, durchströmter Böden; 131 S., Mitteilungen des Instituts für Werkstoffe und Mechanik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt **40** (Dissertation).
- HUBER, H. & ARSLAN, U. (2012) Geothermal Field Tests with Forced Groundwater Flow; Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford CA, January 30 – February 1, 2012, SGP-TR-194.
- HUBER, A. (2005) Erdwärmesonden für Direktheizung Phase 1: Modellbildung und Simulation; Scientific Report; 66 S., Bundesamt für Energie BFE Schweiz, Bern.
- HUBER, A., GOOD, J., WIDMER, P. NUSSBAUMER, T., TRÜSSEL, D. & SCHMID, C. (2001) Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden – Handbuch zum Planungsvorgehen; Scientific Report, 64 S., Bundesamt für Energie BFE Schweiz, Bern.
- HUBER, A. & PAHUD, D. (1999a) Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder; Scientific Report, 94 S., Bundesamt für Energie BFE Schweiz, Bern.
- HUBER, A. & PAHUD, D. (1999b) Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie? Scientific Report, 18 S., Bundesamt für Energie BFE Schweiz, Bern.
- HURTER, S. & HAENEL, R. (2002) Atlas of Geothermal Resources in Europe; 93 S., Office for Official Publications of the European Geothermal Communities, Luxemburg.
- HURTIG, E., GROßWIG, S., JOBMANN, M., KÜHN, K. & MARSCHALL, P. (1994) Fibre-optic temperature measurements in shallow boreholes: Experimental application for fluid logging; Geothermics **23/4**: 355-364.
- KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. (1995) Grundwassermodellierung; 283 S.; Gebrüder Borträger, Berlin.
- KLOTZ, D. (1977): Berechnung der Filtergeschwindigkeit einer Grundwasserströmung aus Tracerverdünnungsversuchen in einem Filterpegel; GSF-Bericht R 149: 45 S., GSF-Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München.
- KÖNIG, R. (1988) Bestimmung der Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen durch Labormessungen und Modellrechnungen; 223 S., Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe (Diplomarbeit).

- KONRAD, J., BOR, J., EMMERMANN, K.-H., HÄFNER, F., HEITELE, H., HOHBERGER, K.-H., LOTHHAMMER, H. & RÉE, C. (1985): Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1:25.000 – Erläuterungen Blatt 6512 Kaiserslautern; 62 S., Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz.
- KRAPP, L. (1979): Gebirgsdurchlässigkeit im linksrheinischen Schiefergebirge Bestimmung nach verschiedenen Methoden; Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie 9: 313-347.
- KRISTIANSEN, J.I. (1982) The Transient Cylindrical Probe Method for Determination of Thermal Parameters of Earth Materials; 155 S., GeoSkrifter 18, Department of Geology, University of Aarhus, Denmark (Dissertation).
- LANGGUTH, H.-R. & VOIGT, R. (2004) Hydrogeologische Methoden; 1005 S., Springer Verlag, Berlin.
- LEE, C.K. & LAM, H.N. (2007) Effects of Groundwater Flow Direction on Performance of Ground Heat Exchanger Borefield in Geothermal Heat Pump Systems Using 3-D Finite Difference Method; Proceedings: Building Simulation 2007: 337-341.
- MALM, F. (2009): Der enhanced Thermal Response Test Ermittlung tiefenaufgelöster Untergrundwärmeleitfähigkeiten in der Praxis. Poster Tagung "TRT Symposium 2009", 16.09.2009, Göttingen.
- MALM, F., DECKERT, H., POHL, C. & LANGSHAUSEN, T. (2010) Qualitätssicherung bei Erdwärmesondenfeldern für Heiz- und Kühlzwecke und Überprüfung ihrer Effizienz im Ziel 2 Gebiet (Abschlussbericht); 74 S., Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Mainz.
- MALM, F. & DECKERT, H. (2013): Die Messung tiefenaufgelöster Untergrundwärmeleitfähigkeiten in geklüfteten Aquiferen bei Grundwassereinfluss an einem mittelgroßen Erdwärmesondenfeld; (in prep.).
- MESCHEDE, D. (2006) Gerthsen Physik; 1162 S., Springer Verlag, Berlin.
- MOGENSEN, P. (1983) Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages; Proceedings International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Stockholm, Sweden, June 6-8, 1983: 652-657.
- PANNIKE, S. (2005): Ausbreitung der Kältefahnen oberflächennaher Erdwärmesonden in Lockergesteinen; 48 S., Universität Bremen (Diplomarbeit).

- POLLACK, H.N., HURTER, S. & JOHNSON, J.R. (1993) Heat Flow from the Earth's Interior: Analysis of the Global Data Set; Reviews of Geophysics **31/3**: 267-280.
- RIEGGER, M., HEIDINGER, P., LORINSER, B. & STOBER, I. (2012) Auswerteverfahren zur Kontrolle der Verfüllqualität in Erdwärmesonden mit faseroptischen Temperaturmessungen; Grundwasser 17/2: 91-103.
- SANNER, B., MANDS, E., SAUER, M.K. & GRUNDMANN, E. (2008) Thermal Response Test, A
   Routine Method to Determine Thermal Ground Properties for GSHP Design;
   9<sup>th</sup> International IEA Heat Pump Conference, 20 22 May 2008, Zürich, Switzerland.
- SATTEL, G. (1979) Aufbau einer Messapparatur zur Bestimmung thermischer Parameter von Gesteinen und Messung an tertiären Sedimenten; Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe (Diplomarbeit).
- SCHÖTTLER, M. (2004): Erfassung der Grundwasserströmung mittels des GFV-Messsystems; Geotechnik **27**: 41-46.
- SIGNORELLI, S., BASSETTI, S., PAHUD, D. & KOHL, T. (2007) Numerical evaluation of thermal response tests; Geothermics **36/2**: 141-166.
- SIGNORELLI, S. (2004) Geoscientific Investigations for the Use of Shallow Low-Enthalpy Systems; 159 S., ETH Zürich, Switzerland (Dissertation).
- SPOHN, T. (1997) Planetologie; In: *Bergmann-Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik* Bd. **7**: 427:525, Walter de Gruyter, Berlin.
- STOBER, I. & BUCHER, K. (2012) Geothermie; 287 S., Springer Verlag, Berlin.
- STREB, C. (2012) Hydrochemische und hydraulische Untersuchungen eines gefluteten Bergwerks – Thermohydraulische Modellierung zur geothermischen Nutzung des Grubenpotentials; 179 S., Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz (Dissertation).
- SUTTON, M.G., NUTTER, A.W. & COUVILLION, R.J. (2003) A Ground Resistance for Vertical Bore Heat Exchangers With Groundwater Flow; Journal of Energy Resources Technology **125**: 183-189.
- THOLEN, M. & WALKER-HERTKORN, S. (2008) Arbeitshilfen Geothermie; 228 S., wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- TURCOTTE, D.L. & SCHUBERT, G. (2002) Geodynamics; 456 S., Cambridge University Press, Cambridge.

- VDI 4640 Blatt 1 (2010) Thermische Nutzung des Untergrundes Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte; 33 S., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI 4640 Blatt 2 (2001) Thermische Nutzung des Untergrundes Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen; 43 S., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI 4640 Blatt 3 (2001) Thermische Nutzung des Untergrundes Unterirdische Thermische Energiespeicher; 42 S., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI 4640 Blatt 4 (2004) Thermische Nutzung des Untergrundes Direkte Nutzungen; 40 S., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VEILLON, F. (1972) Quelques nouvelles méthods pour le calcul numérique de la transformée inverse de Laplace; 102 S., Université de Grenoble, France (Dissertation).
- WAGNER, V., BLUM, P., KÜBERT, M. & BAYER, P. (2013) Analytical approach to groundwaterinfluenced thermal response tests of grouted heat exchangers; Geothermics **46**: 22-31.
- WAGNER, R. & CLAUSER, C. (2005) Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity; Journal of Geophysics and Engineering **2**: 349-356.
- WITTE, H.J.L. (2002) Ground Thermal Conductivity Testing: Effects of Groundwater on the Estimate; 3. Kolloquium des AK Geothermik der DGG, 3-4 October 2002, Aachen, Germany.
- WITTE, H.J.L., VAN GELDER, G.J. & SPITLER, J.D. (2002) In Situ Measurements of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective; ASHRAE Transactions **108/1**: 263-272.
- YAVUZTURK, C. & SPITLER, J.D. (1999) A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers; ASHRAE Transactions **105/2**: 475-485.
- ZSCHOCKE, A. (2005): Correction of non-equilibrated temperature logs and implications for geothermal investigations; Journal of Geophysics and Engineering **2**: 364-371.
- ZSCHOCKE, A., RATH, V., GRISSEMANN, C. & CLAUSER, C. (2005): Estimating Darcy flow velocities from correlated anomalies in temperature logs; Journal of Geophysics and Engineering **2**: 332-342.

"He that breaks a thing to find out what it is has left the path of wisdom."

## Dissertationsschrift

Bestimmung verschiedener Untergrundparameter an einem Erdwärmesondenfeld für Heiz- und Kühlzwecke und thermohydraulische Modellierungen des enhanced Thermal Response Tests

# Anhang 1: Rohtemperaturdaten des Vergleichs zwischen TRT- und LWL-Messungen

Dateninhaber: Aufnahme der TRT-Daten: Aufnahme der LWL-Daten: Stadtverwaltung Speyer André Voutta Grundwasserhydraulik Institut für Geothermisches Ressourcenmanagement (igem)

Verwendung der Daten mit freundlicher Genehmigung der Stadtverwaltung Speyer.

t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	т [°С]
0	15.82	3421	18.04	6841	19.28	10261	19.97	13681	20.45	17101	20.81	20521	21.12	23950	21.36	27361	21.54	30781	21.72	34200	21.86	37621	22.01
60 120	15.80	3461	18.07	6900 6961	19.29	10321	19.98	13741	20.46	17160	20.82	20580	21.12	24001	21.30	27432	21.54	30841	21.72	34201	21.87	37661	22.01
180	15.88	3600	18.15	7021	19.32	10441	20.00	13861	20.48	17281	20.82	20701	21.14	24121	21.36	27541	21.55	30961	21.73	34399	21.88	37810	22.02
240	15.90	3661	18.18	7081	19.34	10501	20.01	13920	20.48	17341	20.83	20761	21.14	24182	21.37	27600	21.56	31021	21.73	34441	21.88	37861	22.02
300	15.91	3721	18.21	7171	19.36	10561	20.02	13980	20.49	17401	20.83	20821	21.14	24241	21.37	27664	21.56	31081	21.73	34501	21.88	37921	22.02
360	15.95	3781	18.24	7201	19.37	10621	20.03	14041	20.49	17461	20.84	20881	21.14	24301	21.38	27721	21.56	31147	21.73	34576	21.89	37980	22.03
420	15.97	3841	18.27	7261	19.39	10681	20.04	14101	20.50	17521	20.85	20941	21.15	24360	21.38	27781	21.56	31200	21.74	34621	21.89	38042	22.03
	16.20	3960	18.32	7381	19.42	10801	20.05	14221	20.50	17641	20.86	21001	21.15	24491	21.38	27901	21.50	31321	21.74	34741	21.89	38161	22.03
601	16.22	4021	18.35	7441	19.43	10861	20.06	14281	20.52	17701	20.86	21121	21.17	24541	21.38	27973	21.57	31381	21.74	34801	21.90	38221	22.03
661	16.24	4081	18.37	7500	19.44	10920	20.08	14341	20.52	17761	20.87	21181	21.18	24601	21.39	28021	21.57	31457	21.74	34861	21.90	38281	22.03
721	16.26	4141	18.39	7560	19.46	10981	20.09	14401	20.53	17821	20.88	21240	21.18	24660	21.39	28081	21.58	31501	21.74	34921	21.90	38350	22.04
780	16.30	4201	18.42	7621	19.47	11041	20.10	14461	20.54	17881	20.88	21301	21.19	24723	21.40	28141	21.58	31560	21.75	34981	21.90	38400	22.04
901	16.37	4320	18.46	7741	19.40	11161	20.11	14580	20.54	18001	20.89	21301	21.19	24701	21.40	28261	21.58	31689	21.75	35101	21.90	38521	22.04
961	16.40	4381	18.49	7801	19.51	11221	20.12	14641	20.56	18061	20.90	21481	21.19	24900	21.41	28321	21.59	31741	21.75	35161	21.91	38582	22.05
1021	16.43	4441	18.52	7860	19.52	11281	20.13	14701	20.56	18121	20.90	21541	21.20	24961	21.41	28381	21.59	31801	21.75	35221	21.91	38641	22.05
1081	16.47	4500	18.53	7921	19.53	11341	20.14	14761	20.56	18181	20.90	21601	21.20	25032	21.41	28441	21.59	31861	21.76	35280	21.91	38700	22.05
1141	16.50	4561	18.56	7981	19.55	11405	20.15	14821	20.57	18240	20.91	21661	21.20	25081	21.41	28515	21.60	31921	21.76	35341	21.91	38761	22.05
1201	16.55	4620	18.61	8101	19.56	11521	20.10	14001	20.58	18361	20.91	21721	21.21	25201	21.42	28621	21.60	32041	21.70	35461	21.91	38891	22.06
1321	16.58	4741	18.62	8160	19.59	11580	20.18	15001	20.59	18421	20.92	21841	21.21	25264	21.42	28681	21.60	32101	21.77	35521	21.91	38941	22.06
1381	16.62	4801	18.64	8221	19.60	11641	20.18	15060	20.60	18481	20.93	21901	21.21	25321	21.43	28748	21.60	32161	21.77	35581	21.91	39001	22.06
1441	16.64	4861	18.67	8288	19.62	11701	20.19	15121	20.61	18541	20.94	21960	21.21	25381	21.43	28801	21.60	32231	21.78	35640	21.91	39061	22.06
1501	16.66	4921	18.69	8341	19.62	11760	20.20	15181	20.62	18601	20.94	22020	21.22	25441	21.43	28861	21.61	32281	21.78	35701	21.92	39123	22.06
1621	16.68	4981 5040	18.71	8401 8461	19.63	11820	20.21	15241	20.63	18721	20.95	22080	21.23	25574	21.44	28920	21.62	32341	21.78	35821	21.92	39181	22.06
1680	16.71	5101	18.76	8521	19.66	11941	20.23	15361	20.64	18781	20.97	22201	21.24	25621	21.44	29057	21.63	32463	21.78	35881	21.92	39301	22.07
1740	16.74	5161	18.78	8581	19.67	12001	20.24	15421	20.64	18841	20.97	22261	21.24	25681	21.44	29101	21.63	32520	21.79	35941	21.92	39361	22.07
1801	16.84	5220	18.80	8641	19.68	12061	20.25	15481	20.65	18901	20.98	22321	21.25	25741	21.45	29161	21.63	32581	21.80	36001	21.93	39432	22.07
1861	16.94	5280	18.83	8701	19.69	12121	20.25	15541	20.66	18961	20.98	22381	21.25	25806	21.45	29221	21.63	32641	21.80	36060	21.93	39480	22.07
1921	17.04	5341 5401	18.86	8821	19.71	12181	20.26	15661	20.66	19021	20.99	22441	21.20	25001	21.40	29289	21.03	32701	21.80	36120	21.94	39541	22.07
2041	17.18	5461	18.88	8881	19.73	12301	20.27	15721	20.67	19141	20.99	22560	21.27	25981	21.47	29401	21.64	32821	21.80	36241	21.94	39664	22.08
2101	17.23	5521	18.90	8941	19.75	12361	20.28	15780	20.68	19201	21.00	22620	21.28	26041	21.48	29461	21.64	32880	21.81	36301	21.95	39721	22.08
2161	17.28	5581	18.92	9000	19.76	12421	20.29	15841	20.68	19261	21.01	22680	21.28	26116	21.48	29522	21.64	32941	21.81	36361	21.95	39781	22.08
2221	17.32	5641	18.94	9061	19.77	12481	20.30	15900	20.68	19321	21.01	22740	21.28	26161	21.48	29581	21.65	33005	21.81	36420	21.95	39841	22.08
2201	17.37	5761	18.90	9121	19.70	12541	20.31	16021	20.09	19360	21.01	22870	21.20	26280	21.40	29041	21.05	33121	21.02	36541	21.95	39901	22.00
2401	17.46	5821	18.99	9241	19.80	12661	20.32	16081	20.71	19501	21.01	22921	21.29	26348	21.49	29761	21.65	33181	21.82	36601	21.96	40021	22.09
2461	17.49	5881	19.02	9301	19.81	12720	20.33	16141	20.71	19561	21.02	22981	21.29	26401	21.50	29831	21.66	33240	21.83	36661	21.96	40080	22.10
2521	17.54	5941	19.03	9361	19.82	12781	20.33	16201	20.72	19621	21.03	23041	21.29	26461	21.50	29880	21.66	33315	21.83	36721	21.97	40141	22.10
2581	17.57	6001	19.05	9421	19.83	12840	20.35	16261	20.73	19681	21.03	23101	21.30	26521	21.50	29941	21.66	33361	21.83	36781	21.97	40206	22.10
2041	17.61	6121	19.00	940 I 9541	19.65	12900	20.30	16320	20.74	19741	21.04	23176	21.30	26657	21.50	30064	21.00	33481	21.03	36900	21.97	40200	22.10
2760	17.68	6181	19.10	9601	19.87	13021	20.37	16441	20.75	19860	21.04	23280	21.30	26701	21.52	30121	21.67	33547	21.84	36961	21.97	40381	22.10
2820	17.71	6241	19.12	9660	19.88	13080	20.38	16501	20.75	19921	21.04	23341	21.31	26761	21.52	30181	21.69	33601	21.84	37021	21.97	40440	22.10
2881	17.74	6301	19.13	9721	19.88	13141	20.38	16561	20.76	19981	21.07	23410	21.31	26821	21.52	30240	21.70	33661	21.83	37081	21.98	40516	22.10
2941	17.77	6361	19.14	9781	19.89	13201	20.39	16621	20.76	20041	21.08	23461	21.31	26890	21.52	30301	21.70	33721	21.84	37141	21.98	40561	22.10
3003	17.81 17.84	6420 6480	19.16	9841 9001	19.91	13261	20.39	167/1	20.77	20101	21.09	23521	21.32	26941 27001	21.52	30373	21.69	33/8U 33857	21.84	37201	21.98	40620	22.11 22.11
3121	17.87	6541	19.20	9961	19.92	13381	20.40	16801	20.78	20221	21.03	23641	21.32	27061	21.53	30481	21.70	33901	21.85	37321	21.99	40748	22.11
3181	17.90	6601	19.21	10021	19.94	13441	20.42	16861	20.78	20281	21.10	23700	21.33	27122	21.53	30541	21.71	33961	21.85	37381	22.01	40801	22.11
3241	17.94	6661	19.23	10081	19.94	13501	20.42	16920	20.79	20341	21.11	23761	21.34	27181	21.53	30605	21.71	34021	21.85	37441	22.01	40861	22.11
3301	17.97	6721	19.25	10146	19.96	13561	20.43	16981	20.80	20401	21.11	23821	21.34	27240	21.53	30661	21.71	34089	21.86	37501	22.01	40921	22.12
3360	18.00	6781	19.26	10201	19.96	13621	20.44	17041	20.80	20461	21.12	23881	21.35	27301	21.54	30721	21.72	34141	21.86	37561	22.01	40980	22.11

t [s]	T I°C1	t [s]	L U.J. L	t [s]	T [°C]	t [s]	L U.J. L	t [s]	T I°C1	t [s]	T I°C1	t [s]	T I°C1	t [s]	T I°C1	t [s]	т гост І	t [s]	T I°C1	t [s]	T I°C1	t [s]	T [°C]
41058	22 12	44464	22 25	47881	22.33	51301	22 42	54728	22.52	58141	22 60	61560	22.67	64981	22 76	68401	22.83	71821	22.91	75241	22.97	78661	23.07
41101	22.12	44521	22.18	47947	22.33	51361	22.42	54781	22.52	58212	22.60	61621	22.67	65041	22.77	68473	22.83	71881	22.91	75301	22.97	78721	23.07
41161	22.12	44580	22.26	48001	22.33	51420	22.42	54841	22.52	58261	22.60	61695	22.68	65101	22.78	68521	22.83	71957	22.92	75363	22.98	78780	23.08
41221	22.13	44641	22.26	48061	22.33	51482	22.42	54901	22.53	58321	22.60	61741	22.68	65161	22.78	68581	22.84	72001	22.92	75421	22.99	78841	23.08
41290	22.13	44701	22.26	48121	22.33	51541	22.42	54960	22.53	58380	22.60	61801	22.68	65221	22.78	68641	22.84	72061	22.91	75481	22.99	78900	23.07
41341	22.13	44774	22.26	48181	22.33	51601	22.43	55038	22.53	58444	22.60	61861	22.68	65311	22.78	68705	22.85	72121	22.91	75541	22.99	78961	23.07
41400	22.13	44821	22.26	48257	22.33	51661	22.43	55081	22.53	58501	22.60	61927	22.68	65341	22.78	68760	22.85	72189	22.91	75601	22.99	79021	23.07
41461	22.14	44881	22.25	48301	22.33	51721	22.43	55141	22.53	58560	22.60	61980	22.68	65400	22.78	68821	22.84	72241	22.92	75673	22.99	79081	23.07
41522	22.15	44940	22.24	48361	22.33	51791	22.44	55201	22.53	58621	22.61	62041	22.68	65461	22.79	68881	22.84	72301	22.92	75721	23.00	79141	23.08
41580	22.16	45006	22.24	48421	22.34	51841	22.43	55270	22.54	58681	22.60	62101	22.69	65521	22.79	68941	22.85	72361	22.92	75781	23.01	79201	23.08
41641	22.16	45061	22.25	48489	22.34	51901	22.44	55321	22.54	58754	22.59	62161	22.69	65581	22.79	69015	22.86	72421	22.92	75841	23.01	79260	23.09
41701	22.16	45121	22.24	48540	22.34	51960	22.45	55380	22.54	58801	22.59	62237	22.70	65641	22.79	69061	22.86	72480	22.93	75905	23.01	79321	23.09
41761	22.17	45181	22.24	48601	22.35	52022	22.45	55441	22.54	58861	22.59	62281	22.70	65701	22.79	69120	22.86	72541	22.93	75960	23.01	79380	23.09
41832	22.17	45241	22.25	48661	22.35	52081	22.44	55502	22.54	58920	22.59	62341	22.70	65761	22.79	69181	22.86	72601	22.93	76021	23.02	79441	23.09
41001	22.17	45315	22.25	48722	22.30	52141	22.45	00000 55601	22.54	50900	22.60	62401	22.70	65000	22.79	69247	22.87	72001	22.92	76151	23.02	79500	23.09
41940	22.17	40301	22.20	40701	22.30	52201	22.40	55021	22.04	59041	22.00	62521	22.70	65044	22.79	60361	22.07	72701	22.92	70101	23.02	79301	23.09
42001	22.17	40421	22.20	40041	22.30	52331	22.40	55740	22.04	59101	22.01	62581	22.70	66002	22.00	69/21	22.07	72840	22.92	76201	23.02	79621	23.09
42004	22.17	45548	22.25	48961	22.33	52381	22.40	55812	22.55	59221	22.01	62641	22.70	66061	22.00	69481	22.07	72040	22.92	76321	23.02	79740	23.10
42181	22.17	45601	22.25	49020	22.35	52440	22.40	55861	22.55	59295	22.02	62700	22.70	66121	22.00	69557	22.07	72963	22.92	76381	23.02	79801	23.10
42241	22.18	45661	22.26	49080	22.36	52501	22.47	55920	22.55	59340	22.63	62761	22.71	66181	22.80	69601	22.86	73021	22.94	76441	23.02	79861	23.10
42300	22.18	45721	22.26	49141	22.36	52563	22.46	55981	22.55	59401	22.63	62821	22.71	66241	22.80	69660	22.86	73081	22.94	76500	23.02	79921	23.10
42374	22.19	45781	22.26	49201	22.36	52621	22.47	56044	22.56	59461	22.63	62881	22.71	66310	22.80	69721	22.87	73141	22.93	76561	23.02	79981	23.11
42421	22.18	45857	22.26	49260	22.36	52681	22.47	56101	22.56	59528	22.63	62941	22.71	66361	22.79	69789	22.86	73200	22.94	76621	23.03	80041	23.11
42481	22.19	45900	22.26	49321	22.36	52741	22.47	56161	22.56	59581	22.63	63000	22.72	66420	22.79	69841	22.86	73273	22.94	76681	23.03	80101	23.11
42541	22.19	45961	22.27	49381	22.36	52800	22.48	56221	22.56	59641	22.64	63061	22.72	66480	22.80	69901	22.86	73321	22.94	76741	23.03	80161	23.11
42606	22.19	46021	22.27	49441	22.37	52872	22.48	56280	22.57	59700	22.64	63121	22.72	66542	22.81	69961	22.86	73381	22.94	76801	23.03	80221	23.11
42661	22.19	46090	22.28	49501	22.37	52921	22.48	56354	22.56	59761	22.64	63181	22.73	66601	22.81	70021	22.86	73441	22.94	76861	23.03	80281	23.11
42720	22.19	46141	22.28	49561	22.37	52981	22.48	56401	22.57	59837	22.65	63240	22.73	66661	22.81	70080	22.86	73505	22.94	76921	23.03	80341	23.11
42781	22.19	46201	22.28	49621	22.37	53041	22.48	56461	22.57	59880	22.65	63301	22.73	66721	22.82	70141	22.86	73561	22.94	76981	23.03	80401	23.11
42841	22.19	46260	22.28	49681	22.38	53104	22.48	56521	22.57	59941	22.64	63361	22.73	66781	22.82	70201	22.86	73621	22.94	77041	23.03	80461	23.12
42916	22.20	46322	22.28	49741	22.38	53161	22.48	56586	22.57	60001	22.64	63421	22.73	66850	22.82	70261	22.86	73681	22.95	77101	23.03	80521	23.11
42961	22.20	46381	22.29	49801	22.38	53221	22.49	56641	22.57	60070	22.64	63481	22.73	66900	22.81	70331	22.87	73741	22.96	77160	23.03	80590	23.12
43021	22.20	46501	22.29	49860	22.30	53261	22.49	56761	22.57	60181	22.04	63601	22.74	67021	22.01	70301	22.87	73861	22.96	77280	23.03	80701	23.11
43001	22.20	46561	22.30	49920	22.39	53/13	22.49	56821	22.57	60240	22.04	63660	22.74	67082	22.01	70440	22.00	73021	22.95	773/1	23.03	80760	23.11
43201	22.20	46631	22.20	50041	22.39	53461	22.49	56896	22.58	60302	22.64	63721	22.74	67141	22.82	70563	22.88	73981	22.95	77401	23.04	80821	23.11
43260	22.21	46681	22.29	50101	22.39	53521	22.49	56941	22.58	60361	22.65	63781	22.74	67201	22.82	70620	22.89	74047	22.96	77461	23.04	80881	23.12
43321	22.21	46741	22.29	50161	22.40	53580	22.49	57001	22.58	60421	22.65	63841	22.75	67260	22.82	70681	22.89	74101	22.96	77521	23.04	80941	23.12
43381	22.22	46801	22.30	50221	22.39	53645	22.49	57060	22.58	60481	22.65	63901	22.75	67321	22.82	70741	22.88	74160	22.96	77581	23.04	81001	23.12
43458	22.22	46864	22.30	50281	22.40	53701	22.49	57128	22.58	60541	22.65	63961	22.75	67391	22.83	70801	22.88	74221	22.96	77641	23.04	81061	23.13
43501	22.22	46921	22.30	50341	22.40	53761	22.50	57181	22.58	60611	22.65	64021	22.75	67441	22.83	70873	22.89	74281	22.96	77701	23.05	81130	23.13
43561	22.22	46981	22.30	50412	22.40	53820	22.50	57240	22.58	60660	22.65	64081	22.75	67501	22.83	70921	22.89	74357	22.96	77760	23.05	81181	23.12
43620	22.22	47041	22.31	50461	22.40	53881	22.50	57301	22.58	60721	22.65	64141	22.75	67560	22.83	70980	22.89	74401	22.96	77821	23.05	81241	23.12
43690	22.22	47101	22.31	50521	22.40	53954	22.50	57361	22.58	60781	22.65	64200	22.75	67623	22.83	71041	22.90	74461	22.97	77881	23.05	81300	23.11
43741	22.23	47173	22.31	50581	22.40	54001	22.50	57438	22.59	60844	22.66	64260	22.75	67681	22.83	71105	22.90	74521	22.97	77941	23.05	81362	23.11
43801	22.23	47220	22.31	50641	22.40	54060	22.50	57481	22.59	60901	22.66	64321	22.75	67741	22.83	71161	22.90	74589	22.97	78001	23.05	81421	23.11
43861	22.23	47281	22.31	50701	22.40	54121	22.50	57541	22.58	60961	22.66	64381	22.75	67801	22.84	71221	22.90	74640	22.97	78060	23.05	81481	23.11
43922	22.24	47341	22.31	50760	22.41	54186	22.50	57600	22.59	61021	22.66	64501	22.76	67022	22.84	71281	22.89	74701	22.97	78120	23.05	81541	23.12
43901	22.24	47400	22.32	50881	22.41	54241	22.01	57721	22.00	61153	22.00	64561	22.70	670.81	22.04 22.84	71/15	22.90	74822	22.91	78240	23.00	81670	23.11
44041	22.24	47521	22.32	50940	22.41	54361	22.51	57781	22.57	61200	22.00	64620	22.70	68041	22.04	71413	22.50	74881	22.31	78301	23.00	81721	23.12
44161	22.24	47580	22.32	51000	22.41	54420	22.51	57841	22.58	61261	22.67	64681	22.77	68100	22.84	71521	22.90	74941	22.98	78361	23.06	81781	23.12
44232	22.24	47641	22.32	51061	22.41	54496	22.51	57902	22.58	61321	22.67	64741	22.76	68164	22.83	71581	22.90	75000	22.98	78420	23.07	81841	23.13
44281	22.24	47715	22.32	51121	22.42	54541	22.51	57961	22.59	61386	22.67	64801	22.77	68221	22.82	71647	22.90	75061	22.98	78480	23.06	81902	23.13
44341	22.25	47761	22.33	51181	22.42	54600	22.51	58020	22.59	61441	22.67	64861	22.76	68281	22.82	71701	22.91	75131	22.98	78541	23.07	81961	23.13
44401	22.25	47821	22.32	51241	22.42	54661	22.51	58081	22.60	61501	22.67	64920	22.76	68341	22.83	71761	22.91	75181	22.97	78601	23.06	82020	23.13

t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]								
82081	23.13	85501	23.20	88921	23.26	92341	23.30	95761	23.36	99181	23.43	102600	23.48	106021	23.52	109440	23.55	112867	23.58	116281	23.62	119701	23.64
82141	23.13	85561	23.18	88981	23.26	92401	23.30	95822	23.35	99241	23.42	102660	23.48	106081	23.52	109500	23.55	112921	23.58	116350	23.62	119761	23.64
82211	23.13	85620	23.18	89041	23.26	92461	23.31	95881	23.35	99302	23.42	102721	23.48	106141	23.52	109560	23.55	112981	23.58	116401	23.62	119821	23.64
82261	23.13	85694	23.19	89101	23.26	92521	23.31	95941	23.37	99360	23.42	102781	23.48	106201	23.53	109621	23.55	113041	23.58	116461	23.62	119881	23.64
82321	23.13	85741	23.20	89161	23.26	92581	23.31	96001	23.38	99421	23.43	102841	23.48	106261	23.52	109681	23.55	113101	23.58	116521	23.62	119940	23.64
82381	23.13	85801	23.20	89221	23.26	92641	23.31	96060	23.37	99481	23.43	102900	23.48	106321	23.52	109741	23.56	113176	23.59	116588	23.62	120000	23.64
82443	23.14	85861	23.20	89280	23.26	92701	23.31	96131	23.38	99541	23.43	102961	23.48	106381	23.52	109801	23.56	113220	23.59	116641	23.62	120061	23.64
82501	23.14	85926	23.20	89341	23.26	92761	23.31	96181	23.38	99612	23.43	103021	23.48	106441	23.53	109860	23.56	113281	23.59	116701	23.62	120121	23.64
82560	23.14	85981	23.20	89401	23.27	92820	23.31	96241	23.38	99661	23.43	103081	23.48	106500	23.53	109930	23.56	113341	23.59	116761	23.62	120181	23.64
82621	23.14	86041	23.21	89461	23.27	92881	23.31	96301	23.38	99720	23.43	103144	23.48	106560	23.53	109981	23.56	113409	23.59	116821	23.62	120241	23.64
82681	23.14	86101	23.21	89521	23.27	92940	23.31	96362	23.38	99781	23.43	103200	23.48	106621	23.53	110041	23.56	113461	23.59	116881	23.62	120300	23.64
82752	23.15	86161	23.21	89581	23.27	93001	23.31	96420	23.38	99844	23.44	103260	23.48	106681	23.53	110101	23.56	113521	23.59	116940	23.62	120361	23.65
82800	23.15	86236	23.21	89641	23.27	93061	23.31	96481	23.39	99900	23.43	103321	23.49	106741	23.53	110162	23.56	113580	23.59	117000	23.62	120421	23.64
82001	23.15	96241	23.21	89701	23.27	93121	23.31	96541	23.30	100021	23.43	103361	23.49	106861	23.53	110221	23.50	113041	23.59	117101	23.02	120461	23.04
82921	23.15	86401	23.21	80821	23.20	93101	23.31	96671	23.30	100021	23.44	103441	23.49	106021	23.53	110201	23.50	113761	23.59	117121	23.02	120341	23.04
830/1	23.10	86468	23.21	89880	23.28	03301	23.31	96720	23.30	100000	23.44	103561	23.40	106080	23.50	110/00	23.56	113821	23.50	1172/1	23.62	120661	23.65
83101	23.14	86521	23.21	800/1	23.20	93361	23.31	96781	23.38	100134	23.44	103621	23.49	100900	23.54	110400	23.50	113881	23.59	117241	23.02	120001	23.65
83161	23.15	86580	23.22	90001	23.27	93421	23.32	96841	23.38	100201	23.44	103681	23.49	107101	23.55	110521	23.50	113950	23.59	117361	23.62	120721	23.65
83221	23.15	86641	23.22	90061	23.27	93481	23.32	96903	23.38	100321	23.44	103741	23.49	107160	23.54	110581	23.57	114001	23.59	117421	23.62	120841	23.65
83294	23.15	86701	23.22	90120	23.27	93541	23.32	96961	23.39	100386	23.44	103801	23.49	107221	23.54	110641	23.57	114061	23.59	117481	23.62	120901	23.65
83341	23.16	86778	23.22	90180	23.27	93601	23.32	97021	23.39	100441	23.44	103861	23.49	107281	23.54	110702	23.57	114121	23.59	117541	23.62	120961	23.65
83401	23.15	86821	23.22	90240	23.27	93660	23.32	97081	23.40	100501	23.45	103921	23.50	107341	23.54	110761	23.56	114183	23.59	117601	23.62	121021	23.65
83461	23.16	86881	23.22	90300	23.28	93720	23.32	97141	23.39	100561	23.44	103981	23.50	107401	23.54	110821	23.56	114241	23.59	117660	23.63	121081	23.65
83526	23.16	86940	23.23	90361	23.27	93780	23.32	97212	23.40	100620	23.44	104040	23.50	107461	23.54	110880	23.57	114301	23.59	117720	23.63	121140	23.65
83580	23.16	87010	23.23	90421	23.28	93841	23.32	97261	23.39	100696	23.44	104101	23.50	107520	23.54	110941	23.57	114361	23.59	117780	23.62	121200	23.65
83641	23.16	87061	23.23	90480	23.29	93901	23.32	97321	23.40	100741	23.45	104161	23.51	107581	23.55	111011	23.57	114421	23.59	117840	23.62	121261	23.65
83701	23.16	87121	23.23	90541	23.28	93961	23.32	97381	23.40	100801	23.45	104221	23.51	107641	23.56	111061	23.56	114492	23.60	117901	23.63	121321	23.65
83761	23.17	87181	23.23	90601	23.28	94021	23.32	97445	23.40	100861	23.45	104280	23.51	107701	23.55	111121	23.57	114540	23.60	117961	23.63	121381	23.65
83836	23.17	87242	23.23	90660	23.28	94081	23.33	97501	23.40	100928	23.45	104340	23.51	107761	23.54	111180	23.57	114601	23.60	118021	23.63	121441	23.65
83881	23.17	87301	23.23	90721	23.28	94141	23.33	97561	23.40	100981	23.45	104401	23.51	107820	23.54	111243	23.57	114661	23.60	118081	23.63	121501	23.65
83940	23.17	87361	23.24	90781	23.28	94201	23.33	97620	23.40	101040	23.45	104461	23.52	107881	23.54	111301	23.56	114725	23.60	118141	23.62	121561	23.65
84001	23.17	87421	23.25	90841	23.28	94261	23.33	97681	23.40	101101	23.45	104521	23.52	107941	23.54	111361	23.56	114781	23.60	118201	23.62	121621	23.66
84068	23.17	87481	23.26	90901	23.28	94321	23.33	97754	23.40	101161	23.45	104581	23.52	108001	23.54	111421	23.56	114841	23.60	118261	23.63	121681	23.65
84121	23.17	87552	23.26	90961	23.29	94380	23.33	97801	23.40	101238	23.45	104640	23.52	108061	23.54	111480	23.57	114900	23.60	118321	23.62	121740	23.66
04101	23.17	07661	23.20	91020	23.29	94441	23.33	97001	23.40	101201	23.45	104701	23.52	100120	23.54	111002	23.37	114901	23.60	110301	23.03	121001	23.00
8/300	23.17	87721	23.20	91001	23.29	94561	23.33	97921	23.40	101341	23.40	104701	23.31	1082/1	23.54	111661	23.57	115081	23.00	118501	23.03	121001	23.66
84378	23.17	87784	23.25	91201	23.29	94622	23.34	98040	23.41	101465	23.46	104881	23.49	108301	23.54	111721	23.57	115141	23.60	118561	23.63	121921	23.66
84421	23.18	87841	23.26	91261	23 29	94681	23.33	98101	23.41	101521	23.46	104941	23 49	108361	23.54	111783	23.57	115201	23.60	118621	23.63	122041	23.66
84481	23.18	87900	23.26	91320	23.28	94741	23.33	98161	23.41	101581	23.46	105001	23.49	108420	23.54	111841	23.57	115266	23.61	118681	23.63	122101	23.66
84541	23.18	87961	23.26	91381	23.28	94801	23.34	98221	23.41	101640	23.46	105061	23.49	108480	23.54	111901	23.57	115321	23.60	118741	23.63	122161	23.66
84610	23.19	88042	23.25	91441	23.29	94861	23.34	98296	23.42	101701	23.46	105121	23.50	108541	23.54	111961	23.57	115381	23.60	118801	23.63	122221	23.66
84661	23.19	88081	23.26	91500	23.29	94921	23.34	98341	23.42	101761	23.46	105181	23.50	108601	23.55	112020	23.57	115441	23.60	118861	23.63	122281	23.66
84721	23.19	88140	23.26	91561	23.29	94981	23.34	98400	23.42	101821	23.46	105241	23.50	108661	23.54	112093	23.57	115501	23.60	118921	23.63	122341	23.66
84781	23.19	88222	23.26	91621	23.29	95050	23.34	98461	23.41	101880	23.46	105300	23.51	108721	23.55	112141	23.57	115576	23.60	118980	23.64	122401	23.66
84842	23.19	88261	23.26	91681	23.29	95101	23.34	98528	23.42	101941	23.46	105361	23.50	108781	23.56	112201	23.57	115621	23.59	119041	23.63	122461	23.66
84900	23.19	88321	23.26	91740	23.29	95160	23.35	98580	23.42	102000	23.47	105421	23.51	108841	23.56	112261	23.57	115681	23.59	119100	23.63	122521	23.66
84961	23.19	88380	23.26	91801	23.29	95220	23.35	98641	23.42	102061	23.46	105481	23.51	108901	23.56	112325	23.57	115741	23.59	119161	23.63	122581	23.67
85021	23.19	88441	23.26	91861	23.30	95282	23.35	98701	23.41	102121	23.47	105541	23.51	108961	23.56	112381	23.57	115808	23.59	119221	23.63	122641	23.67
85081	23.20	88501	23.26	91921	23.30	95341	23.35	98760	23.41	102181	23.47	105600	23.51	109020	23.55	112440	23.58	115860	23.59	119281	23.64	122700	23.66
85152	23.19	88561	23.26	91984	23.30	95401	23.36	98838	23.42	102241	23.47	105661	23.51	109081	23.55	112501	23.58	115921	23.60	119341	23.64	122761	23.67
85201	23.19	88621	23.26	92041	23.30	95461	23.35	98881	23.42	102301	23.46	105721	23.51	109141	23.55	112561	23.58	115981	23.62	119401	23.64	122821	23.67
85260	23.20	88681	23.26	92100	23.30	95521	23.36	98940	23.42	102361	23.47	105781	23.52	109201	23.55	112634	23.58	116041	23.62	119461	23.64	122880	23.67
85321	23.20	88740	23.26	92161	23.30	95590	23.35	99001	23.43	102421	23.47	105841	23.52	109261	23.55	112681	23.58	116118	23.62	119521	23.64	122941	23.67
85384	23.20	88801	23.20	92221	23.30	95641	23.30	99070	23.43	102481	23.47	105901	23.52	109321	23.55	112/41	23.58	116161	23.62	119581	23.04	123001	23.07
85441	23.20	88861	23.20	92281	23.30	95700	23.30	99121	23.43	102541	23.47	105961	23.53	109380	23.55	112801	23.58	116220	23.62	119641	23.04	123060	23.07

t[s] T[°C]	t[s] T[°C]	t[s] T[	CIL t[s] T[°C]
123121 23.67 126553 23.71 129961 23.72 133381 23.74 136801 23.78 139406 23.83 141116 23.87 143460 23.89 146880 23.93	50301 23.97	153721 23	99 157141 24.03
123181 23.67 126601 23.71 130021 23.73 133441 23.73 136860 23.79 139437 23.83 141147 23.87 143521 23.90 146941 23.93	50361 23.97	153781 23	99 157201 24.02
123241 23.67 126660 23.72 130081 23.73 133500 23.74 136920 23.79 139469 23.83 141176 23.88 143581 23.89 147001 23.93	50424 23.97	153841 23.	99 157261 24.02
123301 23.67 126721 23.72 130141 23.72 133561 23.75 137006 23.79 139497 23.83 141210 23.88 143641 23.89 147061 23.93	50480 23.97	153911 23.	99 157320 24.03
123361 23.67 126785 23.71 130201 23.73 133621 23.75 137040 23.79 139526 23.83 141237 23.88 143700 23.90 147121 23.93	50541 23.97	153961 23.	99 157381 24.03
123421 23.67 126841 23.72 130261 23.72 133681 23.75 137101 23.80 139556 23.83 141267 23.88 143761 23.90 147181 23.93	50601 23.98	154020 23.	99 157441 24.03
123480 23.67 126901 23.72 130320 23.72 133740 23.75 137161 23.80 139587 23.83 141296 23.88 143821 23.90 147241 23.93	50661 23.97	154080 24.	00 157501 24.03
123541 23.67 126961 23.72 130381 23.72 133801 23.75 137221 23.80 139624 23.83 141327 23.88 143881 23.90 147301 23.94	50733 23.97	154141 24.	00 157561 24.03
123601 23.67 127021 23.72 130441 23.72 133861 23.75 137281 23.80 139646 23.83 141361 23.89 143941 23.90 147361 23.94	50781 23.97	154201 24.	00 157620 24.03
123661 23.67 127095 23.71 130500 23.72 133921 23.75 137340 23.80 139676 23.84 141386 23.89 144001 23.90 147421 23.93	50840 23.98	154261 23.	99 157681 24.03
123720 23.67 127141 23.71 130561 23.72 133981 23.75 137400 23.80 139707 23.84 141417 23.89 144061 23.90 147481 23.93	50901 23.98	154321 23.	99 157741 24.02
123781 23.67 127201 23.71 130621 23.71 134041 23.74 137461 23.80 139740 23.84 141446 23.89 144120 23.90 147541 23.94	50965 23.97	154381 23.	99 157801 24.03
123841 23.67 127261 23.72 130581 23.71 134101 23.74 137521 23.80 139766 23.84 141477 23.89 144181 23.90 147600 23.94	51021 23.97	154441 23.	99 157861 24.02
123901 23.67 127327 23.72 130741 23.72 134161 23.74 137581 23.80 139796 23.84 141507 23.88 144241 23.90 147661 23.94	51081 23.98	154500 23.	99 157921 24.03
123960 23.67 127361 23.72 130601 23.72 134221 23.74 137041 23.60 139627 23.64 141536 23.89 144301 23.69 147721 23.94	51141 Z3.96	154501 23	99 157981 24.03
124021 23.07 127490 23.72 130001 23.71 13421 23.73 13770 23.61 130000 23.60 14400 23.50 147701 23.64	51201 23.90	154691 23	99 158101 24.03
124000 23.07 127.00 2.072 130021 23.71 13401 23.75 137701 23.04 13004 23.04 141.07 23.08 144.09 23.00 147041 23.04	51321 23.90	154740 23	90 158161 24.03
124200 23.67 127637 23.72 131041 23.73 13461 23.76 137881 23.81 139947 23.84 14167 56 23.87 144541 23.90 147961 23.94	51380 23.98	154801 23	99 158220 24.04
124260 23.67 127681 23.71 131101 23.74 134521 23.76 137941 23.81 139976 23.84 141686 23.87 144601 23.90 148020 23.94	51441 23.98	154861 23	99 158281 24.05
124321 23.67 127741 23.71 131161 23.75 134581 23.76 138001 23.81 140011 23.84 141716 23.87 144660 23.91 148081 23.94	51506 23.98	154920 23	99 158341 24.04
124391 23.67 127800 23.72 131221 23.74 134640 23.76 138061 23.81 140037 23.84 141746 23.87 144721 23.90 148141 23.94	51561 23.98	154981 23.	98 158401 24.05
124441 23.68 127869 23.72 131280 23.74 134701 23.76 138120 23.81 140066 23.84 141776 23.87 144781 23.91 148200 23.94	51620 23.98	155041 23.	99 158461 24.04
124501 23.68 127921 23.72 131341 23.75 134761 23.76 138181 23.81 140096 23.84 141807 23.86 144841 23.91 148260 23.94	51681 23.98	155100 23.	99 158521 24.05
124561 23.68 127981 23.72 131401 23.75 134820 23.76 138241 23.81 140127 23.84 141837 23.86 144901 23.91 148321 23.94	51741 23.99	155161 23.	99 158581 24.04
124622 23.68 128041 23.72 131461 23.75 134881 23.75 138301 23.81 140156 23.85 141867 23.86 144961 23.91 148381 23.94	51815 23.99	155221 23.	99 158641 24.05
124681 23.68 128101 23.72 131521 23.75 134941 23.74 138361 23.81 140186 23.85 141896 23.86 145021 23.91 148440 23.94	51860 23.99	155281 23.	99 158700 24.05
124741 23.68 128178 23.71 131580 23.75 135001 23.75 138421 23.81 140217 23.85 141927 23.86 145081 23.91 148501 23.94	51921 23.99	155340 23.	99 158761 24.05
124800 23.69 128221 23.72 131641 23.75 135061 23.75 138480 23.81 140246 23.85 141957 23.87 145141 23.91 148561 23.94	51981 23.99	155400 24.	00 158821 24.05
124861 23.68 128281 23.72 131700 23.75 138541 23.82 140282 23.85 141986 23.87 145200 23.91 148620 23.94	52048 23.98	155461 24.	00 158881 24.05
124931 23.69 128341 23.71 131/60 23.75 135181 23.76 138596 23.82 14030/ 23.85 142016 23.86 145261 23.91 146681 23.95	52101 23.99	155521 24.	00 158941 24.05
124961 23.69 126411 23.71 131820 23.75 135241 23.76 138026 23.82 140356 23.85 142047 23.87 145321 23.91 146740 23.95	52161 23.99	155580 24.	00 159001 24.05
125041 23.06 126401 23.71 131061 23.75 135301 23.77 130659 23.62 140306 23.65 14207 23.67 145041 23.91 146001 23.95	52220 23.99	155041 24.	00 159061 24.05
125101 23.00 126321 23.71 131941 23.73 135000 23.77 130007 23.62 140390 23.05 142100 23.06 149441 23.91 140000 23.93	52201 23.99	155761 24	00 159121 24.05
12520 23.69 128643 23.71 132001 23.75 135481 23.76 138746 23.82 140456 23.85 142167 23.88 145561 23.92 149881 23.95	52401 23.99	155821 24	00 159241 24.06
	52461 23.99	155881 24	00 159300 24.05
125341 23.68 128760 23.72 132185 23.75 135601 23.76 138813 23.82 140516 23.86 142261 23.88 145681 23.92 149101 23.95	52521 23.99	155941 24.	00 159361 24.05
125401 23.68 128821 23.72 132241 23.75 135661 23.77 138836 23.82 140552 23.86 142321 23.88 145740 23.92 149160 23.95	52589 23.99	156000 24.	01 159420 24.05
125471 23.69 128881 23.72 132301 23.75 135721 23.77 138866 23.82 140576 23.86 142380 23.88 145801 23.92 149221 23.95	52641 23.99	156061 24.	01 159481 24.06
125521 23.69 128953 23.72 132361 23.75 135781 23.78 138896 23.82 140607 23.86 142441 23.88 145860 23.92 149281 23.95	52701 23.99	156121 24.	01 159541 24.06
125580 23.69 129001 23.72 132421 23.75 135841 23.79 138929 23.82 140636 23.86 142501 23.88 145921 23.92 149344 23.95	52761 23.99	156181 24.	01 159601 24.06
125641 23.69 129061 23.71 132481 23.75 135901 23.78 138957 23.82 140669 23.86 142561 23.89 145981 23.92 149401 23.95	52822 23.99	156241 24.	01 159661 24.06
125703 23.69 129120 23.72 132541 23.75 135961 23.78 138987 23.82 140697 23.86 142621 23.89 146041 23.92 149461 23.96	52881 23.98	156300 24.	01 159721 24.06
125761 23.69 129185 23.71 132601 23.76 136021 23.78 139016 23.82 140726 23.86 142681 23.89 146101 23.92 149520 23.97	52941 23.99	156361 24.	01 159780 24.06
125821 23.68 129241 23.71 132661 23.76 136081 23.78 139046 23.82 140757 23.86 142741 23.89 146161 23.92 149580 23.96	53001 23.99	156421 24.	01 159841 24.06
125880 23.69 129301 23.71 132720 23.75 136141 23.78 139083 23.82 140787 23.86 142800 23.89 146221 23.92 149653 23.97	53061 23.98	156480 24.	01 159901 24.06
125941 23.69 129361 23.71 132781 23.75 136201 23.77 139106 23.82 140823 23.86 142860 23.89 146281 23.92 149701 23.96	53131 23.98	156541 24.	01 159961 24.07
126012 23.69 129420 23.72 132641 23.75 136260 23.78 139137 23.83 140846 23.86 142921 23.86 146341 23.92 149/61 23.96 1	53180 23.98	156601 24.	02 160021 24.07
126001 23.00 125700 23.71 132501 23.73 130521 23.70 139107 23.00 1440077 23.00 144201 23.00 140401 23.92 140827 23.90 10011 23.00 14201 23.00 140040 23.92 140827 23.90 12614 23.00 1400400 23.00 140040 23.00 140040 23.00 140040 23.00 140040	53301 23.98	156720 24	01 1601/1 24.06
120121 2010 12011 2012 10201 2010 10001 2010 10001 2010 10007 2000 14000 14000 2000 14000 14000 2000 14000 14000 2000 14000 14000 2000 140000 140000 140000 140000 14000 140000 140000 140000 14000 14000 1400000	53364 23.90	156781 24	02 160201 24.00
126244 23.69 129661 23.71 13381 23.76 136501 23.78 139256 23.83 140967 23.87 143161 23.89 146581 23.93 150001 23.66	53421 23.99	156841 24	01 160261 24.07
126301 23.69 129720 23.71 133141 23.75 136561 23.79 139266 23.83 140996 23.87 14321 23.89 146641 23.93 150060 23.96	53481 23,99	156901 24	02 160321 24.07
126361 23.69 129781 23.72 133200 23.74 136621 23.78 139317 23.83 141026 23.86 143281 23.89 146701 23.93 150121 23.96	53540 23,99	156961 24	02 160380 24.07
126420 23.69 129841 23.71 133261 23.74 136681 23.78 139353 23.83 141057 23.87 143352 23.89 146761 23.93 150193 23.97	53601 23.99	157020 24	02 160441 24.07
126491 22.72 120001 22.72 122221 22.74 136740 22.79 130276 22.92 144004 22.97 142401 22.90 146091 22.02 150044 22.07	E2672 22.00	157080 24	02 160501 24.07

t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]
160560	24.07	163981	24.11	167401	24.15	170820	24.20	174241	24.23	177661	24.27	181081	24.31	184501	24.33	187921	24.33	191341	24.34
160621	24.07	164041	24.11	167461	24.15	170881	24.19	174300	24.23	177737	24.27	181141	24.31	184561	24.33	187981	24.34	191401	24.33
160681	24.07	164110	24.12	167520	24.15	170941	24.19	174361	24.23	177781	24.28	181201	24.31	184621	24.33	188040	24.33	191461	24.33
160741	24.07	164161	24.12	167580	24.15	171000	24.20	174420	24.24	177841	24.27	181261	24.31	184681	24.33	188101	24.34	191521	24.33
160801	24.07	164221	24.12	167640	24.15	171061	24.21	174480	24.24	177901	24.27	181321	24.31	184741	24.33	188160	24.34	191581	24.33
160861	24.07	164281	24.12	167700	24.15	171121	24.21	174542	24.24	177960	24.27	181381	24.31	184801	24.33	188220	24.34	191640	24.33
160921	24.07	164341	24.12	167761	24.16	171181	24.21	174601	24.24	178021	24.28	181440	24.31	184861	24.33	188280	24.34	191701	24.33
160980	24.07	164418	24.13	167821	24.16	171241	24.21	174661	24.24	178081	24.28	181501	24.31	184921	24.33	188340	24.34	191761	24.33
161040	24.07	164460	24.13	167881	24.15	171301	24.21	174720	24.25	178141	24.27	181561	24.31	184981	24.33	188401	24.34	191821	24.33
161101	24.07	164520	24.13	167941	24.16	171361	24.21	174781	24.25	178201	24.27	181621	24.31	185041	24.33	188461	24.34	191880	24.33
161161	24.07	164581	24.13	168001	24.16	171421	24.20	174841	24.24	178261	24.27	181680	24.31	185101	24.33	188521	24.34	191940	24.33
161221	24.08	164650	24.13	168061	24.16	171481	24.21	174901	24.25	178321	24.28	181740	24.31	185161	24.34	188581	24.34	192001	24.33
161281	24.08	164701	24.13	168121	24.16	171541	24.20	174961	24.25	178381	24.28	181800	24.31	185220	24.34	188641	24.34	192061	24.33
161341	24.08	164761	24.13	168180	24.16	171601	24.20	175020	24.25	178441	24.28	181861	24.31	185281	24.34	188701	24.34	192121	24.33
161401	24.08	164821	24.13	168241	24.16	1/1661	24.20	175081	24.25	178510	24.28	181921	24.31	185340	24.33	188761	24.34	192181	24.33
161461	24.08	164881	24.13	168300	24.16	171721	24.21	175141	24.25	178560	24.28	181981	24.31	185401	24.33	188821	24.34	192241	24.33
161521	24.08	164940	24.13	168361	24.16	171781	24.21	175201	24.25	178620	24.28	182040	24.32	185461	24.33	188881	24.34	192301	24.33
161580	24.08	165001	24.13	168421	24.10	171841	24.21	175261	24.25	178681	24.27	182101	24.32	185521	24.33	188941	24.34	192361	24.33
161701	24.08	165101	24.12	1695401	24.10	171901	24.21	175320	24.25	170001	24.27	102101	24.32	105000	24.34	189004	24.34	192420	24.33
161761	24.09	165101	24.13	169601	24.10	171901	24.21	175441	24.20	179961	24.20	192221	24.32	195701	24.34	109001	24.34		
161821	24.09	1652/1	24.13	168661	24.10	172021	24.21	175501	24.25	178021	24.20	1823/1	24.32	185761	24.34	180181	24.34		
161881	24.09	165301	24.13	168721	24.10	172033	24.21	175561	24.25	178981	24.27	182401	24.32	185821	24.34	189241	24.34		
161941	24.09	165361	24.12	168781	24.10	172201	24.20	175621	24.25	179050	24.20	182460	24.32	185881	24.34	189301	24.34		
162001	24.09	165422	24 11	168841	24.16	172260	24 20	175681	24.25	179100	24.28	182520	24.32	185941	24.34	189361	24.34		
162061	24.09	165481	24.11	168901	24.17	172321	24.21	175741	24.25	179161	24.28	182581	24.32	186001	24.34	189432	24.34		
162121	24.09	165541	24.11	168960	24.16	172381	24.21	175800	24.25	179221	24.28	182641	24.32	186061	24.34	189481	24.34		
162181	24.09	165600	24.11	169021	24.16	172441	24.21	175861	24.25	179282	24.28	182701	24.32	186121	24.33	189541	24.34		
162241	24.09	165661	24.11	169081	24.16	172500	24.21	175921	24.25	179341	24.28	182761	24.32	186181	24.34	189601	24.34		
162301	24.09	165721	24.12	169141	24.17	172561	24.21	175981	24.25	179401	24.30	182821	24.32	186241	24.34	189661	24.34		
162361	24.09	165781	24.12	169201	24.17	172621	24.22	176041	24.25	179460	24.30	182881	24.32	186301	24.34	189721	24.35		
162421	24.09	165841	24.12	169261	24.17	172681	24.22	176101	24.26	179521	24.30	182941	24.32	186361	24.34	189781	24.34		
162481	24.09	165901	24.12	169321	24.16	172741	24.21	176161	24.25	179591	24.30	183001	24.32	186421	24.34	189841	24.34		
162541	24.10	165961	24.12	169380	24.17	172800	24.22	176221	24.25	179640	24.31	183061	24.32	186481	24.33	189901	24.34		
162601	24.09	166020	24.12	169441	24.16	172861	24.22	176280	24.25	179701	24.31	183121	24.32	186541	24.34	189961	24.34		
162661	24.09	166081	24.12	169501	24.16	172920	24.22	176340	24.25	179760	24.31	183181	24.32	186601	24.34	190021	24.34		
162721	24.09	166141	24.12	169561	24.16	172981	24.22	176401	24.25	179821	24.31	183241	24.32	186661	24.33	190080	24.33		
162781	24.09	166201	24.13	169620	24.17	173041	24.22	176461	24.26	179881	24.31	183301	24.32	186721	24.33	190140	24.33		
162841	24.09	166261	24.12	169680	24.17	173101	24.23	176520	24.26	179941	24.31	183361	24.32	186783	24.33	190201	24.32		
162901	24.10	166321	24.13	169741	24.17	173161	24.22	176580	24.26	180001	24.31	183421	24.32	186841	24.34	190261	24.33		
162961	24.10	166381	24.13	169801	24.18	173220	24.23	176641	24.26	180061	24.31	183481	24.32	186900	24.34	190321	24.32		
163021	24.10	166441	24.13	169861	24.18	173281	24.23	1/6/01	24.26	180121	24.31	183541	24.33	186960	24.34	190381	24.32		
163080	24.10	166501	24.13	169921	24.18	173341	24.22	1/6/61	24.20	180181	24.31	183600	24.33	187020	24.34	190440	24.33		
163141	24.10	100001	24.13	170041	24.10	173401	24.23	176001	24.20	100241	24.31	100001	24.33	107000	24.34	190501	24.33		
163201	24.10	166691	24.13	170041	24.10	173401	24.23	176040	24.20	100301	24.31	103721	24.32	107140	24.34	100621	24.33		
163201	24.10	166741	24.13	170100	24.10	173520	24.23	170940	24.20	100301	24.31	103/00	24.33	107201	24.34	100691	24.33		
163320	24.10	166901	24.14	170101	24.10	1736/1	24.23	177061	24.20	100420	24.31	192001	24.33	197221	24.34	1007/1	24.33		
163440	24.10	166861	24.14	170221	24.19	173701	24.23	177121	24.27	180540	24.31	183061	24.32	197391	24.34	100801	24.34		
163501	24.10	166921	24.14	170200	24.10	173761	24.23	177181	24.21	180601	24.31	184021	24.32	187440	24.34	190861	24.34		
163561	24.03	166980	24.13	170401	24.10	173821	24 23	177241	24.27	180661	24.31	184081	24.32	187501	24.34	190921	24.34		
163621	24 10	167040	24 15	170461	24 19	173880	24 23	177301	24 27	180721	24.31	184141	24.33	187561	24.34	190980	24.35		
163681	24.10	167101	24.15	170520	24.19	173941	24.23	177361	24.27	180781	24.31	184201	24.33	187620	24.34	191041	24.35		
163741	24.11	167161	24.14	170581	24.20	174001	24.23	177420	24.27	180841	24.31	184261	24.33	187680	24.34	191101	24.35		
163801	24.10	167221	24.15	170641	24.19	174061	24.23	177481	24.27	180901	24.31	184320	24.33	187741	24.34	191161	24.35		
163860	24.11	167281	24.15	170701	24.20	174121	24.23	177541	24.27	180960	24.31	184381	24.33	187801	24.34	191221	24.36		
163920	24.11	167341	24.15	170761	24.20	174181	24.23	177601	24.27	181021	24.31	184441	24.33	187861	24.34	191281	24.35		

### Daten der LWL-Messung

0         16.1         10054         19.71         15039         20.47         20023         20.93         25007         21.30         29991         21.56         3488         21.77         39959         21.96         44944         22.10         49928           175         16.87         5159         18.20         10142         19.73         15126         20.49         20110         20.93         25094         21.30         30078         21.56         34975         21.77         39959         21.96         44944         22.10         50015         263         16.92         5246         18.25         10229         19.74         15213         20.50         20188         20.94         25182         21.31         30166         21.55         35150         21.76         40134         21.96         45206         22.11         50102         30253	22.26         54824         22.38           22.25         54911         22.39           22.25         55086         22.39           22.26         55261         22.40           22.26         55348         22.40           22.26         555261         22.40           22.26         55348         22.40           22.26         555261         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.30         55873         22.39           22.39         55961         22.39           22.29         55964         22.39           22.29         56948         22.40	338 339 339 339 40 40 40 40 40 40 39 40 39 39
88       16.83       5071       18.16       10054       19.71       15039       20.47       20023       20.93       25007       21.30       29991       21.56       34975       21.77       39959       21.96       44944       22.10       49928         175       16.87       5159       18.20       10142       19.73       15126       20.49       20110       20.93       25094       21.30       30078       21.56       35062       21.76       40047       21.96       45031       22.10       50015         263       16.92       5246       18.25       10229       19.74       15213       20.50       20198       20.94       25182       21.31       30166       21.55       35150       21.76       40134       21.96       45118       22.10       50102         350       16.98       5334       18.29       10317       19.76       15301       20.51       20285       20.95       2569       21.30       30253       21.56       35237       21.77       40221       21.96       45206       22.11       50190         438       17.03       5421       18.33       10404       19.78       15838       20.52       20372       20.	22.25         54911         22.39           22.25         54999         22.39           22.26         55086         22.39           22.26         55261         22.40           22.26         55348         22.40           22.26         55523         22.40           22.26         55634         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         55964         22.40           22.30         55786         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56948         22.40	39 39 39 40 40 40 40 40 40 39 40 39 39
175       16.87       5159       18.20       10142       19.73       15126       20.49       20110       20.93       25094       21.30       30078       21.56       35062       21.76       40047       21.96       45031       22.10       50015         263       16.92       5246       18.25       10229       19.74       15213       20.50       20198       20.94       25182       21.31       30166       21.55       35150       21.76       40134       21.96       45118       22.10       50102         350       16.98       5334       18.29       10317       19.76       15301       20.51       20285       20.95       25269       21.30       30253       21.56       35237       21.77       40221       21.96       45206       22.11       50190         438       17.03       5525       10.49       10404       19.78       15848       20.52       20372       20.96       25357       21.30       30341       21.56       35352       21.78       40309       21.98       45293       22.11       50277         525       17.09       5596       18.41       10579       19.80       15563       20.547       20.98	22.25         54999         22.39           22.25         55086         22.39           22.26         55174         22.40           22.26         55261         22.40           22.25         55436         22.40           22.25         55436         22.40           22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.30         55786         22.34           22.30         55873         22.39           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	39 39 40 40 40 40 40 40 39 40 39 39
263       16.92       5246       18.25       10229       19.74       15213       20.50       20198       20.94       25182       21.31       30166       21.55       35150       21.76       40134       21.96       45118       22.10       50102         350       16.98       5334       18.29       10317       19.76       15301       20.51       20285       20.95       25269       21.30       30253       21.56       35237       21.77       40221       21.96       45206       22.11       50190         438       17.03       5421       18.33       10404       19.78       15388       20.52       20372       20.96       25357       21.30       30341       21.66       35325       21.78       40309       21.98       45293       22.11       50277         525       17.09       5509       18.38       10492       19.79       15476       20.53       20460       20.96       25444       21.81       30428       21.58       35412       21.79       40396       21.84       45481       22.12       50455         612       17.14       5566       18.41       10579       19.80       15563       20.54       20635       2	22.25         55086         22.39           22.26         55174         22.40           22.26         55261         22.40           22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.26         555436         22.40           22.27         55611         22.39           22.30         55786         22.30           22.30         55873         22.39           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	<ol> <li>39</li> <li>40</li> <li>40</li> <li>40</li> <li>40</li> <li>40</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>39</li> <li>39</li> <li>39</li> </ol>
350       16.98       5334       18.29       10317       19.76       15301       20.51       20285       20.95       25269       21.30       30253       21.56       35237       21.77       40221       21.96       45206       22.11       50190         438       17.03       5421       18.33       10404       19.78       15388       20.52       20372       20.96       25357       21.30       30341       21.56       35232       21.78       40309       21.98       45293       22.11       50277         525       17.09       5509       18.38       10492       19.79       15476       20.53       20460       20.96       25444       21.18       35412       21.78       40309       21.98       45293       22.11       500277         521       17.09       5509       18.38       10492       19.79       15476       20.53       20.460       25444       21.31       30428       21.58       35510       21.80       40484       21.99       45468       22.12       50356         612       17.14       5568       18.45       10666       19.81       15651       20.54       20635       20.98       25619       21.33 <td< td=""><td>22.26         55174         22.40           22.26         55261         22.40           22.26         55348         22.40           22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.30         55786         22.30           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40</td><td>.40 .40 .40 .40 .40 .40 .39 .40 .39 .39 .39</td></td<>	22.26         55174         22.40           22.26         55261         22.40           22.26         55348         22.40           22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.30         55786         22.30           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	.40 .40 .40 .40 .40 .40 .39 .40 .39 .39 .39
438       17.03       5421       18.33       10404       19.78       15388       20.52       20372       20.96       25357       21.30       30341       21.56       35325       21.78       40309       21.98       45293       22.11       50277         525       17.09       5509       18.38       10492       19.79       15476       20.53       20460       20.96       25444       21.31       30428       21.58       35412       21.79       40396       21.98       45381       22.12       50365         612       17.14       5596       18.41       10579       19.80       15563       20.54       20547       20.98       25532       21.32       30516       21.59       35500       21.80       40484       21.99       45468       22.13       50452         700       17.18       5683       18.45       10666       19.81       15651       20.54       20635       20.98       25619       21.33       30603       21.59       35587       21.80       40571       21.99       45468       22.14       50539         787       17.21       5771       18.49       10754       19.83       15738       20.56       20722       2	22.26         55261         22.40           22.26         55348         22.40           22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.30         55786         22.39           22.30         55873         22.39           22.30         55873         22.39           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	.40 .40 .40 .40 .39 .40 .39 .39 .39
525       17.09       5509       18.38       10492       19.79       15476       20.53       20460       20.96       25444       21.31       30428       21.58       35412       21.79       40396       21.98       45381       22.12       50365         612       17.14       5596       18.41       10579       19.80       15563       20.54       20547       20.98       25532       21.32       30516       21.59       35500       21.80       40484       21.99       45468       22.13       50452         700       17.18       5683       18.45       10666       19.81       15651       20.54       20635       20.98       25619       21.33       30603       21.59       35587       21.80       40571       21.99       45566       22.14       50539         787       17.21       5771       18.49       10754       19.83       15738       20.56       20722       21.00       25706       21.33       30690       21.60       35705       21.81       40659       21.99       45643       22.14       50637         707       17.21       5771       18.49       10754       19.83       15738       20.56       20722       2	22.26         55348         22.40           22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         55964         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	.40 .40 .40 .39 .40 .39 .39 .39
612       17.14       5596       18.41       10579       19.80       15563       20.54       20547       20.98       25532       21.32       30516       21.59       35500       21.80       40484       21.99       45468       22.13       50452         700       17.18       5683       18.45       10666       19.81       15651       20.54       20635       20.98       25619       21.33       30603       21.59       35587       21.80       40571       21.99       45556       22.14       50539         787       17.21       5771       18.49       10754       19.83       15738       20.56       20722       21.00       25706       21.33       30690       21.60       35575       21.81       40659       21.99       45643       22.14       50637         707       17.20       57771       18.49       10754       19.83       15738       20.56       20722       21.00       25706       21.60       35575       21.81       40659       21.99       45643       22.14       50627         707       17.09       40.50       20.57       21.80       25706       21.33       30690       21.60       35705       21.81 <td< td=""><td>22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56948         22.40</td><td>.40 .40 39 40 39 39</td></td<>	22.25         55436         22.40           22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56948         22.40	.40 .40 39 40 39 39
700         17.18         5683         18.45         10666         19.81         15651         20.54         20635         20.98         25619         21.33         30603         21.59         35587         21.80         40571         21.99         45556         22.14         50539           787         17.21         5771         18.49         10754         19.83         15738         20.56         20722         21.00         25706         21.33         30690         21.60         35675         21.81         40659         21.99         45643         22.14         50639           700         17.21         5771         18.49         10754         19.83         15738         20.56         20722         21.00         25706         21.33         30690         21.60         35675         21.81         40659         21.99         45643         22.14         50627	22.26         55523         22.40           22.27         55611         22.39           22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56948         22.40	.40 .39 40 39 39
787 17.21 5771 18.49 10754 19.83 15738 20.56 20722 21.00 25706 21.33 30690 21.60 35675 21.81 40659 21.99 45643 22.14 50627	22.27         55611         22.39           22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	.39 40 39 39
	22.29         55698         22.40           22.30         55786         22.39           22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	.40 39 39
8/5 17.22 5858 18.53 10841 19.85 15826 20.57 20810 21.01 25/94 21.33 30/78 21.60 35762 21.82 40746 21.99 45730 22.14 50714	22:30         55786         22:39           22:30         55873         22:39           22:29         55961         22:39           22:29         56048         22:40	.39 39
962 17.24 5946 18.56 10929 19.86 15913 20.58 20897 21.02 25881 21.32 30865 21.61 35849 21.82 40834 21.98 45818 22.14 50802	22.30         55873         22.39           22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	39
1050 17.24 0033 18.59 11016 19.88 10000 20.59 20985 21.03 25969 21.33 30953 21.61 35937 21.82 40921 21.99 45905 22.15 50885	22.29         55961         22.39           22.29         56048         22.40	20
1137 17.24 0120 16.05 11104 19.05 10006 20.59 21072 21.04 20050 21.33 31040 21.61 30024 21.62 41006 21.99 49993 22.15 3097/ 1234 17.24 6009 10.66 11404 10.04 16475 20.60 2446 24.04 20050 21.53 31040 21.61 30024 21.62 41006 21.99 49993 22.15 3097/	22.29 50046 22.40	39
1224  17.24  0200  16.00  11191  19.91  10175  20.00  21139  21.04  20144  21.33  31120  21.02  30112  21.03  41090  22.00  40000  22.16  51046  210112  21.03  41090  22.00  40000  22.16  51046  210112  210	22 20 56135 22 /0	40
1300 17.24 638 18.72 11366 19.05 1635 1050 20.61 2134 21.05 2021 2.1.07 01215 2.1.02 0105 21.05 1105 2.2.06 1005 22.16 01	22.29 56223 22.40	40
1487 17.24 6470 18.75 11453 19.96 16438 20.62 21422 2105 26406 21.39 31390 21.62 36374 21.83 41358 22.01 46342 22.16 51326	22.29 56310 22.39	39
1574 17.24 6557 18.78 11541 19.98 16525 20.62 21509 21.06 26493 21.39 31477 21.62 36461 21.83 41446 22.03 46430 22.16 51414	22.28 56398 22.39	.39
1662 17.24 6645 18.81 11628 20.00 16613 20.64 21597 21.07 26581 21.40 31565 21.63 36549 21.83 41533 22.03 46517 22.17 51501	22.28 56485 22.39	.39
1749 17.23 6732 18.84 11716 20.01 16700 20.64 21684 21.08 26668 21.39 31652 21.64 36636 21.83 41620 22.03 46605 22.17 51589	22.29 56573 22.40	.40
1837 17.21 6819 18.87 11803 20.02 16787 20.66 21772 21.08 26756 21.40 31740 21.64 36724 21.83 41708 22.02 46692 22.17 51676	22.30 56660 22.40	.40
1924         17.19         6907         18.90         11891         20.04         16875         20.66         21859         21.09         26843         21.40         31827         21.65         36811         21.84         41796         22.02         46780         22.17         51764	22.31 56747 22.41	.41
2011 17.18 6994 18.94 11978 20.06 16962 20.67 21946 21.10 26930 21.40 31915 21.65 36899 21.84 41883 22.03 46867 22.16 51851	22.31 56835 22.41	.41
2099 17.18 7082 18.97 12066 20.07 17050 20.68 22034 21.11 27018 21.40 32002 21.65 36986 21.85 41971 22.04 46955 22.16 51938	22.31 56922 22.41	.41
2186       17.18       7169       19.00       12153       20.08       17137       20.68       22121       21.12       27105       21.41       32090       21.65       37074       21.86       42058       22.05       47042       22.16       52026	22.31 57010 22.41	.41
2274 17.18 7256 19.03 12240 20.09 17225 20.69 22209 21.12 27193 21.41 32177 21.66 37161 21.86 42145 22.05 47129 22.17 52113	22.31 57097 22.42	42
2361 17.17 7344 19.06 12328 20.10 17312 20.70 22296 21.12 27280 21.41 32264 21.66 37248 21.87 42233 22.04 47217 22.17 52201	22.31 57185 22.42	42
2449 17.17 7431 19.08 12415 20.12 17399 20.71 22384 21.12 27368 21.41 32352 21.66 37336 21.87 42320 22.04 47304 22.17 52288	22.31 57272 22.42	42
2536 17.16 7519 19.10 12503 20.14 17487 20.71 22471 21.13 27455 21.42 32439 21.65 37423 21.88 42408 22.05 47392 22.16 52376	22.32 57360 22.42	42
2624 17.17 7606 19.12 12590 20.16 17574 20.71 22559 21.13 27543 21.42 32527 21.66 37511 21.88 42495 22.05 47479 22.17 52463	22.32 57447 22.42	42
2/11 17.17 7093 19.15 12678 20.17 17662 20.72 22046 21.14 27630 21.43 32614 21.67 37598 21.88 42583 22.06 47567 22.18 52551 2750 47567 22.18 52551 21.44 14.473 14.14 14	22.32 57534 22.42	42
2/36 17.17 7/61 19.17 12/05 20.16 17/49 20.73 22/33 21.14 27/17 21.43 32/02 21.06 37/060 21.06 420/0 22.07 47/054 22.16 52030	22.32 57622 22.42	42
2000 17.10 7000 19.20 12033 20.20 17037 20.73 22021 21.13 27003 21.43 32767 21.09 3775 21.07 42739 22.07 47742 22.19 32729 22.07 47742 22.07 47742 22.19 32729 22.07 47742 22.07 47742 22.19 32729 22.	22.32 57707 22.41	41
3061 17 16 8043 19 26 1307 20 22 18012 20 77 22996 21 16 27980 21 44 32964 21 69 37948 21 88 42932 22 06 47016 22 19 52900	22.33 57884 22.41	41
3148 17.16 8131 19.28 13115 20.23 18099 20.77 23083 21.17 28067 21.45 33051 21.69 38035 21.89 43020 22.06 48004 22.20 52988	22.33 57972 22.41	.41
3236 17.19 8218 19.30 13202 20.25 18186 20.78 23171 21.17 28155 21.46 33139 21.70 38123 21.89 43107 22.06 48091 22.20 53075	22.33 58059 22.42	.42
3323 17.22 8305 19.33 13290 20.26 18274 20.79 23258 21.17 28242 21.48 33226 21.71 38210 21.89 43195 22.07 48179 22.21 53163	22.33 58146 22.42	.42
3410 17.26 8393 19.35 13377 20.28 18361 20.80 23346 21.18 28330 21.49 33314 21.71 38298 21.90 43282 22.07 48266 22.21 53250	22.33 58234 22.43	.43
3498 17.31 8480 19.37 13465 20.29 18449 20.81 23433 21.18 28417 21.49 33401 21.72 38385 21.91 43370 22.07 48354 22.21 53338	22.32 58321 22.44	.44
3585       17.36       8568       19.38       13552       20.30       18536       20.82       23520       21.18       28504       21.49       33489       21.71       38473       21.91       43457       22.07       48441       22.21       53425	22.33 58409 22.45	.45
3673       17.41       8655       19.41       13640       20.31       18624       20.82       23608       21.20       28592       21.49       33576       21.71       38560       21.90       43544       22.08       48529       22.22       53513	22.33 58496 22.45	45
3760 17.46 8743 19.43 13727 20.32 18711 20.83 23695 21.20 28679 21.50 33663 21.71 38648 21.90 43632 22.09 48616 22.22 53600	22.34 58584 22.45	45
3848         17.52         8830         19.45         13814         20.34         18798         20.84         23783         21.22         28767         21.50         33751         21.72         38735         21.89         43719         22.09         48703         22.22         53687	22.34 58671 22.45	45
3935         17.57         8918         19.47         13902         20.35         18886         20.85         23870         21.23         28854         21.51         33838         21.73         38822         21.90         43807         22.09         48791         22.22         53775	22.34 58759 22.45	45
4022 17.62 9005 19.50 13989 20.36 18973 20.86 23958 21.23 28942 21.51 33926 21.73 38910 21.90 43894 22.09 48878 22.22 53862	22.34 58846 22.46	46
4110 17.67 9093 19.52 14077 20.37 19061 20.86 24045 21.23 29029 21.52 34013 21.73 38997 21.91 43982 22.09 48966 22.23 53950	22.34 58933 22.46	46
4197 17.72 9180 19.54 14164 20.36 19148 20.86 24132 21.24 29117 21.53 34101 21.73 39085 21.92 44069 22.09 49053 22.24 54037	22.36 59021 22.47	47
+200 11.10 201 15.00 14202 20.30 12500 20.01 24220 21.20 2304 21.20 34100 21.14 39112 21.92 44107 22.10 49141 22.24 5412	22.30 39106 22.40	40 17
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	22.37 59283 22.47	47
4547 17.88 9530 19.59 14514 20.42 19498 20.91 24482 21.26 29466 21.53 34450 21.76 39434 21.93 44419 22.09 49103 22.24 54387	22.38 59371 22.48	.48
4634 17.94 9617 19.61 14601 20.43 19585 20.91 24570 21.27 29554 21.54 34538 21.76 39522 21.93 44506 22.09 49490 22.23 54474	22.38 59458 22.48	.48
4722 17.99 9705 19.64 14689 20.44 19673 20.91 24657 21.27 29641 21.54 34625 21.76 39609 21.94 44594 22.10 49578 22.24 54562	22.38 59545 22.48	.48
4809 18.04 9792 19.66 14776 20.44 19760 20.92 24745 21.28 29729 21.55 34713 21.76 39697 21.94 44681 22.09 49665 22.25 54649	22.38 59633 22.49	.49
4897 18.08 9879 19.68 14864 20.45 19848 20.92 24832 21.28 29816 21.55 34800 21.77 39784 21.95 44769 22.09 49753 22.26 54736		10
#### Daten der LWL-Messung

Bester         2-26         K-172         2-26         K-172         2-26         K-174         2-26         <	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]
empty         2230         befy         2330         befy         2330 <t< td=""><td>59808</td><td>22.49</td><td>64792</td><td>22.60</td><td>69776</td><td>22.68</td><td>74760</td><td>22.77</td><td>79745</td><td>22.88</td><td>84729</td><td>22.96</td><td>89713</td><td>23.04</td><td>94697</td><td>23.12</td><td>99681</td><td>23.17</td><td>104665</td><td>23.27</td><td>109649</td><td>23.37</td><td>114633</td><td>23.44</td></t<>	59808	22.49	64792	22.60	69776	22.68	74760	22.77	79745	22.88	84729	22.96	89713	23.04	94697	23.12	99681	23.17	104665	23.27	109649	23.37	114633	23.44
bit with with with with with with with wi	59895	22.50	64879	22.60	69864	22.69	74848	22.77	79832	22.88	84816	22.97	89800	23.05	94784	23.13	99768	23.17	104752	23.27	109737	23.37	114721	23.44
00008         22.00         06124         22.60         0701         22.10         00031         22.00         06051         22.00	60070	22.50	65054	22.59	70038	22.70	74935	22.11	80007	22.00	84904 84991	22.90	89000	23.05	94072	23.13	99000	23.17	104640	23.20	109624	23.30	114000	23.44
box         25.0         06.27         26.0         71.07         27.07         807.07         80.07         80.07 <td>60158</td> <td>22.50</td> <td>65142</td> <td>22.59</td> <td>70126</td> <td>22.71</td> <td>75110</td> <td>22.78</td> <td>80095</td> <td>22.90</td> <td>85079</td> <td>22.99</td> <td>90063</td> <td>23.06</td> <td>95047</td> <td>23.14</td> <td>100031</td> <td>23.18</td> <td>105015</td> <td>23.26</td> <td>109999</td> <td>23.39</td> <td>114983</td> <td>23.45</td>	60158	22.50	65142	22.59	70126	22.71	75110	22.78	80095	22.90	85079	22.99	90063	23.06	95047	23.14	100031	23.18	105015	23.26	109999	23.39	114983	23.45
b032         22.50         65.71         27.00         75.80         27.97         80.80         27.00         80.20         23.0         80.20         23.1         10.000         23.1         10.007         23.0         10.007         23.0         11	60245	22.50	65229	22.59	70213	22.71	75197	22.79	80182	22.90	85166	22.99	90150	23.06	95134	23.13	100118	23.18	105102	23.27	110086	23.39	115070	23.45
ebbed         25.0         69.44         2.0.0         73.4         7.0.7         7.2.0         73.4         73.2         73.0         74.40         27.4           6007         2.0.0         69.47         2.0.0         74.40         27.0         86.44         2.0.0         85.37         2.1.6         10038         2.1.6	60333	22.50	65317	22.60	70301	22.70	75285	22.79	80269	22.90	85254	22.99	90238	23.06	95222	23.13	100206	23.18	105190	23.28	110174	23.39	115158	23.45
00007         22.00         06.40         22.00         06.44         22.00         06.42         23.00         06.967         23.01         106.30         23.91         106.30	60420	22.50	65404	22.60	70388	22.70	75372	22.79	80357	22.90	85341	22.99	90325	23.06	95309	23.14	100293	23.18	105277	23.29	110261	23.39	115245	23.45
ebso         22.60         65.77         22.81         105.85         22.70         75.47         22.78         05.512         22.88         85.51         22.88         85.51         22.88         85.51         22.88         85.51         22.88         85.51         22.88         85.51         22.81         10.552         22.81         10.552         22.81         10.552         22.81         10.552         22.91         10.552         22.91         10.552         22.91         10.555	60507	22.50	65492	22.60	70476	22.70	75460	22.79	80444	22.89	85428	22.98	90412	23.06	95397	23.15	100380	23.19	105365	23.29	110349	23.39	115333	23.44
00000         2010         0004         2.00         00040         2.00         00040         2.00         00040         2.01 <th< td=""><td>60595</td><td>22.50</td><td>65579</td><td>22.61</td><td>70563</td><td>22.70</td><td>75547</td><td>22.79</td><td>80532</td><td>22.89</td><td>85516</td><td>22.98</td><td>90500</td><td>23.06</td><td>95484</td><td>23.14</td><td>100468</td><td>23.19</td><td>105452</td><td>23.29</td><td>110436</td><td>23.38</td><td>115420</td><td>23.44</td></th<>	60595	22.50	65579	22.61	70563	22.70	75547	22.79	80532	22.89	85516	22.98	90500	23.06	95484	23.14	100468	23.19	105452	23.29	110436	23.38	115420	23.44
0.000         2.20         0.964         2.20         0.967         2.20         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.20         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21         0.966         2.21 <t< td=""><td>60682</td><td>22.50</td><td>65666</td><td>22.62</td><td>70651</td><td>22.70</td><td>75635</td><td>22.78</td><td>80619</td><td>22.89</td><td>85603</td><td>22.98</td><td>90587</td><td>23.06</td><td>95571</td><td>23.14</td><td>100555</td><td>23.19</td><td>105539</td><td>23.29</td><td>110523</td><td>23.38</td><td>115508</td><td>23.44</td></t<>	60682	22.50	65666	22.62	70651	22.70	75635	22.78	80619	22.89	85603	22.98	90587	23.06	95571	23.14	100555	23.19	105539	23.29	110523	23.38	115508	23.44
b004         22.00         00930         22.00         70937         22.70         90847         22.00         90844         23.41         10938         23.20         10082         23.20         10082         23.20         10077         23.30         11977         23.41           6102         22.50         6614         22.62         7108         22.71         7586         22.00         8604         22.90         91074         23.00         90060         23.41         100674         23.01         11048         23.80         11148         23.80         11148         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11114         23.80         11187         23.80         11187         23.80         11187         23.80         11187         23.80         11187         23.80 <td>60857</td> <td>22.50</td> <td>658/1</td> <td>22.62</td> <td>70738</td> <td>22.70</td> <td>75809</td> <td>22.78</td> <td>80707</td> <td>22.90</td> <td>85778</td> <td>22.99</td> <td>90675</td> <td>23.00</td> <td>95059</td> <td>23.13</td> <td>100643</td> <td>23.19</td> <td>105627</td> <td>23.29</td> <td>110608</td> <td>23.38</td> <td>115683</td> <td>23.44</td>	60857	22.50	658/1	22.62	70738	22.70	75809	22.78	80707	22.90	85778	22.99	90675	23.00	95059	23.13	100643	23.19	105627	23.29	110608	23.38	115683	23.44
6103         22.0         6010         22.42         7000         22.71         7099         22.72         7099         22.72         7099         22.80         10503         22.90         10593         22.91         10593         22.91         10593         22.91         10597         23.91         11588         23.45           6124         22.60         6617         22.61         66168         22.61         66178         22.91         10597         23.01         111048         23.91         11503         23.91	60945	22.50	65929	22.02	70913	22.70	75897	22.70	80881	22.90	85866	22.99	90850	23.07	95834	23.14	100730	23.20	105802	23.29	110786	23.40	115770	23.44
e1100         2.2.0         60104         2.2.0         71078         2.2.0         71078         2.2.0         71078         2.2.0         10577         2.2.0         10577         2.2.0         10577         2.2.0         10577         2.2.0         10577         2.2.0         10577         2.2.0         10587         2.2.0 <th< td=""><td>61032</td><td>22.50</td><td>66016</td><td>22.62</td><td>71000</td><td>22.71</td><td>75984</td><td>22.78</td><td>80969</td><td>22.90</td><td>85953</td><td>22.99</td><td>90937</td><td>23.06</td><td>95921</td><td>23.14</td><td>100905</td><td>23.21</td><td>105889</td><td>23.29</td><td>110873</td><td>23.39</td><td>115858</td><td>23.45</td></th<>	61032	22.50	66016	22.62	71000	22.71	75984	22.78	80969	22.90	85953	22.99	90937	23.06	95921	23.14	100905	23.21	105889	23.29	110873	23.39	115858	23.45
e1294       22.50       66191       2.2.62       7175       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.71       75.8       2.2.91       6865       2.1.6       10152       2.3.0       111620       2.3.8       111620	61120	22.50	66104	22.62	71088	22.70	76072	22.80	81056	22.90	86040	22.99	91024	23.06	96009	23.14	100993	23.20	105977	23.29	110961	23.39	115945	23.45
6138       22.60       6677       2.2.62       71803       2.2.77       728.4       2.2.90       68213       2.2.90       91199       2.3.06       69617       2.3.16       10157       2.3.0       10158       2.3.0       10157       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0       10158       2.3.0	61207	22.50	66191	22.62	71175	22.71	76159	22.80	81144	22.90	86128	22.99	91112	23.06	96096	23.14	101080	23.20	106064	23.30	111048	23.39	116032	23.46
61880       22.61       68366       22.62       71350       22.72       763.4       22.80       8130       22.90       9137       23.06       90271       23.15       101205       23.20       1062.82       23.31       111223       23.38       111221       23.38       111221       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.38       111232       23.34       111342       23.38       111243       23.38       111243       23.34       111342       23.38       111442       23.38       111442       23.38       111442       23.38       111442       23.38       11144       23.44       11144       23.44       11144       23.44       11144       23.44       11144       23.44       11144       23.44       11144       23.44       11144       23.44       11144       23.44       111444       23.44       111454       23.45       1114574 <td>61294</td> <td>22.50</td> <td>66278</td> <td>22.62</td> <td>71263</td> <td>22.71</td> <td>76247</td> <td>22.80</td> <td>81231</td> <td>22.90</td> <td>86215</td> <td>22.99</td> <td>91199</td> <td>23.06</td> <td>96183</td> <td>23.14</td> <td>101167</td> <td>23.20</td> <td>106151</td> <td>23.30</td> <td>111136</td> <td>23.39</td> <td>116120</td> <td>23.46</td>	61294	22.50	66278	22.62	71263	22.71	76247	22.80	81231	22.90	86215	22.99	91199	23.06	96183	23.14	101167	23.20	106151	23.30	111136	23.39	116120	23.46
Bit	61382	22.51	66366	22.62	71350	22.72	76334	22.80	81319	22.91	86303	22.99	91287	23.06	96271	23.15	101255	23.20	106239	23.31	111223	23.39	116207	23.46
Bit Add       22.50       0 BB23       22.81       11.80       22.81       0 BB23       23.81       10.10.97       23.31       11.80       23.31       11.80       23.34       11.807       23.34         61732       22.51       66710       22.62       71707       22.73       77071       22.83       81643       22.80       91724       23.06       96706       23.15       101695       23.20       10676       23.32       111.80       23.30       11647       23.46         61919       22.51       66976       22.62       71767       22.73       7704       22.84       81934       22.80       9199       23.06       96876       23.15       101697       23.21       110603       23.22       111650       23.24       116817       23.42         62081       22.51       67676       22.43       77034       22.44       82018       22.93       87002       23.01       191694       23.15       101697       23.24       116835       23.34       110204       23.34       110204       23.34       110204       23.34       110217       23.24       116817       23.46       102342       23.11       101731       23.34       11201       23.44       1106	61469	22.51	66453	22.62	71437	22.72	76422	22.81	81406	22.91	86390	23.00	91374	23.06	96358	23.14	101342	23.20	106326	23.31	111311	23.39	116295	23.46
61792       22.51       66716       22.82       7170       22.72       7864       22.81       81675       23.00       91637       23.07       96621       23.14       101605       23.20       11673       23.41       11673       23.40       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41       11673       23.41	61644	22.50	66628	22.01	71612	22.71	76509	22.81	81581	22.91	86565	23.00	91462 01570	23.06	96533	23.14	101430	23.19	106501	23.31	111/185	23.39	116470	23.40
e1919       22.51       66803       22.62       71767       22.73       70774       22.92       86720       23.00       91714       23.08       90708       23.15       1016676       23.32       111660       23.40       116647       23.46         61996       22.51       66978       23.63       71162       22.47       76646       22.83       81931       22.92       8687       23.00       91696       23.01       91696       23.21       1018674       23.33       111855       23.44       1166107       23.46         62190       22.52       67153       22.64       72177       72.93       22.48       8216       22.93       87177       23.00       91687       23.14       102042       23.21       107036       23.33       11010       23.44       116904       23.44       107046       23.14       102042       23.21       107136       23.44       116904       23.44       116904       23.14       102194       23.21       107186       23.41       116904       23.44       116904       23.41       116904       23.44       116904       23.44       116904       23.41       116904       23.41       116904       23.41       116904       23.44 <td< td=""><td>61732</td><td>22.50</td><td>66716</td><td>22.62</td><td>71700</td><td>22.72</td><td>76684</td><td>22.82</td><td>81668</td><td>22.91</td><td>86653</td><td>23.00</td><td>91637</td><td>23.07</td><td>96621</td><td>23.14</td><td>101605</td><td>23.20</td><td>106589</td><td>23.32</td><td>111573</td><td>23.40</td><td>116557</td><td>23.46</td></td<>	61732	22.50	66716	22.62	71700	22.72	76684	22.82	81668	22.91	86653	23.00	91637	23.07	96621	23.14	101605	23.20	106589	23.32	111573	23.40	116557	23.46
61906       22.51       66691       22.62       71675       22.73       768.96       22.83       81943       22.93       80827       23.00       91719       23.20       101779       23.20       101764       23.32       11135       23.40       116719       23.46         62081       22.51       67055       22.64       77050       22.73       77044       22.84       82018       22.93       87002       23.00       91686       23.41       101654       23.21       10638       23.32       111303       23.40       116094       23.46         62264       22.52       67740       22.64       77212       22.73       77726       22.84       82193       22.93       87002       23.04       87177       23.06       87177       23.16       102129       23.21       10711       23.33       11248       23.44       11749       23.46       11749       23.46       11245       23.44       11749       23.46       11245       23.44       11749       23.44       11749       23.44       11749       23.44       11749       23.44       11749       23.44       11749       23.44       11749       23.44       11749       23.44       11749       23.44	61819	22.51	66803	22.62	71787	22.73	76771	22.82	81756	22.91	86740	23.00	91724	23.08	96708	23.15	101692	23.20	106676	23.32	111660	23.40	116644	23.46
6199       2.2.51       60978       2.2.83       71962       2.2.73       70946       2.2.84       81913       2.2.93       80915       2.3.10       91989       2.3.20       91087       2.3.21       101867       2.3.21       101867       2.3.21       101863       2.3.2       111823       2.3.01       111892       2.3.66         62169       2.2.52       67153       2.2.64       72137       2.7.37       77121       2.2.84       82109       2.3.03       87777       3.0.0       92717       2.3.15       101217       2.3.1       10708       2.3.3       111828       2.3.4       111699       2.3.45         62241       2.2.44       67328       2.2.44       7239       2.7.3       77380       2.2.44       8726       2.3.03       92245       2.3.04       97233       2.3.15       100217       2.3.1       107288       2.3.4       111282       2.3.42       117148       2.3.45         62606       2.2.54       67670       2.2.64       77609       2.2.64       87447       2.2.92       87748       2.3.16       100234       2.2.1       107048       2.3.41       111742       2.3.42       11742       2.3.4       11742       2.3.4       11742       2	61906	22.51	66891	22.62	71875	22.73	76859	22.83	81843	22.92	86827	23.00	91811	23.08	96796	23.15	101779	23.20	106764	23.32	111748	23.40	116732	23.46
62061       22.51       67065       22.64       72060       22.73       77034       22.84       82018       22.94       87002       23.00       91986       23.06       99970       23.15       101954       23.21       101038       23.21       111923       23.40       111994       23.46         62264       22.52       67340       22.64       72212       22.73       77209       22.84       82218       22.08       8776       23.01       92164       23.08       97145       23.15       102129       23.21       107713       23.34       112085       23.41       117082       23.46         62344       22.54       67630       22.66       72309       22.77       77738       22.84       82388       22.92       8752       23.03       92424       23.07       97405       23.15       102304       23.21       107763       23.41       112080       23.41       111741       23.44       11744       23.46         62690       22.54       67676       22.66       72662       22.74       77684       22.88       8767       23.03       92688       23.07       97670       23.18       10246       32.22       107555       23.41       112079	61994	22.51	66978	22.63	71962	22.73	76946	22.83	81931	22.93	86915	23.01	91899	23.08	96883	23.15	101867	23.21	106851	23.32	111835	23.40	116819	23.46
62169       22.52       67743       22.64       77121       22.83       87090       23.01       92074       23.08       9708       23.14       102129       23.21       107026       23.33       112010       23.34       112090       23.41       116994       23.45         62364       22.54       67418       22.64       77239       22.84       82281       22.92       87765       23.08       9723       23.15       102219       23.14       112105       23.34       112105       23.44       11762       23.45         62431       22.54       67503       22.66       72467       22.74       77868       22.86       82.92       87402       23.07       97408       23.16       102394       23.21       107376       23.34       112407       23.44       11744       23.46         62606       22.54       67678       22.64       77674       22.84       82600       22.92       87641       23.03       92614       23.07       97682       23.18       102654       23.22       107638       23.34       112472       23.44       11741       23.46         62680       22.55       67752       22.66       72767       23.18       102654	62081	22.51	67065	22.64	72050	22.73	77034	22.84	82018	22.94	87002	23.00	91986	23.08	96970	23.15	101954	23.21	106938	23.32	111923	23.40	116907	23.46
b225b       b224b       b234b       b24b       b24b <td>62169</td> <td>22.52</td> <td>67153</td> <td>22.64</td> <td>72137</td> <td>22.73</td> <td>77121</td> <td>22.83</td> <td>82106</td> <td>22.93</td> <td>87090</td> <td>23.01</td> <td>92074</td> <td>23.08</td> <td>97058</td> <td>23.14</td> <td>102042</td> <td>23.21</td> <td>107026</td> <td>23.32</td> <td>112010</td> <td>23.41</td> <td>116994</td> <td>23.46</td>	62169	22.52	67153	22.64	72137	22.73	77121	22.83	82106	22.93	87090	23.01	92074	23.08	97058	23.14	102042	23.21	107026	23.32	112010	23.41	116994	23.46
02347       22.54       67145       22.64       77280       22.73       7738       22.84       67303       22.64       67303       22.64       77397       23.44       11260       23.45       11260       23.44       11764       23.46       11764       23.46       11764       23.46       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117619       23.44       117719       23.44       117619       23.44 </td <td>62256</td> <td>22.52</td> <td>67240</td> <td>22.64</td> <td>72224</td> <td>22.72</td> <td>77209</td> <td>22.84</td> <td>82193</td> <td>22.93</td> <td>8/1//</td> <td>23.02</td> <td>92161</td> <td>23.08</td> <td>97145</td> <td>23.15</td> <td>102129</td> <td>23.21</td> <td>107113</td> <td>23.33</td> <td>112098</td> <td>23.41</td> <td>117082</td> <td>23.45</td>	62256	22.52	67240	22.64	72224	22.72	77209	22.84	82193	22.93	8/1//	23.02	92161	23.08	97145	23.15	102129	23.21	107113	23.33	112098	23.41	117082	23.45
G2519       G7703       L2.6       T7471       L2.6       B246       L2.2       B740       L3.0       D740       L3.0       D740 <thl3.0< th="">       D740       L3.0</thl3.0<>	62431	22.53	67415	22.04	72312	22.73	77383	22.04	82368	22.92	87352	23.03	92249 92336	23.08	97233	23.15	102217	23.21	107201	23.34	112100	23.42	117256	23.40
62606         22.54         67590         22.65         72574         22.47         77568         22.85         82543         22.92         87527         23.02         92511         23.07         97495         23.17         102479         23.22         107463         23.34         112477         23.41         117431         23.47           62683         22.54         67765         22.66         72749         22.74         77646         22.84         82718         22.92         87614         23.02         92598         23.07         97562         23.18         102566         23.22         107638         23.34         11253         23.40         117606         23.46           62866         22.55         67852         22.66         72847         27.47         77908         22.44         82893         22.92         87767         23.09         97757         23.18         1022916         23.22         107781         23.44         117897         23.44         11789         23.47         10304         23.22         107781         23.44         117896         23.44         117896         23.44         117896         23.44         117896         23.44         117896         23.44         117869         23.44	62519	22.54	67503	22.65	72487	22.74	77471	22.85	82456	22.92	87440	23.03	92424	23.07	97408	23.16	102392	23.21	107376	23.34	112360	23.42	117344	23.46
62683       22.54       67678       22.64       72662       22.74       77646       22.84       82630       22.92       87614       23.02       92588       23.07       97670       23.18       102666       23.22       107638       23.34       11253       23.40       117619       23.47         62781       22.55       67852       22.65       72837       22.74       777821       22.84       82705       23.03       92757       23.19       102654       23.22       107703       23.34       112822       23.35       112710       23.99       117694       23.46         63043       22.56       67940       22.65       73091       22.74       77966       22.84       82893       22.92       87677       23.03       92661       23.08       97452       23.18       102829       32.22       107703       23.44       117796       23.47       117818       23.47         63043       22.56       68152       22.66       73099       27.3       76033       22.44       82080       23.02       9306       23.09       96020       23.16       103004       23.23       107618       23.34       112852       23.41       117869       23.47       63363	62606	22.54	67590	22.65	72574	22.74	77558	22.85	82543	22.92	87527	23.02	92511	23.07	97495	23.17	102479	23.22	107463	23.34	112447	23.41	117431	23.47
62781       22.56       67765       22.65       72749       22.74       77733       22.44       82718       22.91       87702       23.03       92686       23.07       97670       23.19       107638       23.22       107638       23.35       112622       23.39       117606       23.46         62868       22.55       67840       22.65       72837       22.74       77906       22.84       82805       22.92       87787       23.08       97757       23.19       102241       23.22       107781       23.44       112797       23.40       117761       23.47         63043       22.56       68027       22.66       73011       22.74       77906       22.84       82980       22.92       87964       23.02       93086       23.01       103004       23.23       107900       23.34       112872       23.44       117669       23.46         63131       22.56       68202       22.66       73186       22.73       78170       22.85       88139       23.02       93123       23.09       98107       23.17       103091       23.23       108075       23.35       113247       23.41       117803       23.47       10350       23.35       113241 <td>62693</td> <td>22.54</td> <td>67678</td> <td>22.64</td> <td>72662</td> <td>22.74</td> <td>77646</td> <td>22.84</td> <td>82630</td> <td>22.92</td> <td>87614</td> <td>23.02</td> <td>92598</td> <td>23.07</td> <td>97582</td> <td>23.18</td> <td>102566</td> <td>23.22</td> <td>107550</td> <td>23.34</td> <td>112535</td> <td>23.40</td> <td>117519</td> <td>23.47</td>	62693	22.54	67678	22.64	72662	22.74	77646	22.84	82630	22.92	87614	23.02	92598	23.07	97582	23.18	102566	23.22	107550	23.34	112535	23.40	117519	23.47
62868       22.55       67852       22.65       72837       22.74       77821       22.84       82805       22.91       87789       23.03       92773       23.08       97757       23.19       102741       23.22       107725       23.35       112710       23.39       117694       23.47         63043       22.56       68027       22.65       73011       22.74       77986       22.84       82980       22.92       87964       23.02       92948       23.09       97932       23.17       102916       23.22       107900       23.34       112972       23.41       117869       23.47         63131       22.56       68156       22.93       88155       22.93       88159       23.09       9107       23.17       103004       23.23       108755       23.41       117956       23.44       117856       23.41       118031       23.47         63305       22.66       7364       22.73       78258       22.84       83242       22.94       88226       23.07       93286       23.17       103178       23.23       108638       23.42       118218       23.44       118181       23.47       11324       23.42       118218       23.48       63480	62781	22.54	67765	22.65	72749	22.74	77733	22.84	82718	22.91	87702	23.03	92686	23.07	97670	23.19	102654	23.22	107638	23.35	112622	23.39	117606	23.46
62966       22.65       64940       22.65       73011       22.74       77906       22.84       82980       22.92       8767       23.08       97845       23.17       102296       23.22       107813       23.34       11297       23.40       117781       23.47         63131       22.56       68027       22.66       73099       22.73       78083       22.84       83068       22.92       8794       23.02       93036       23.09       98107       23.17       10304       23.23       107988       23.34       112972       23.41       118043       23.47         6303       22.56       68200       22.66       73166       22.73       78858       22.84       83042       22.94       88242       23.02       93123       23.09       98107       23.17       103017       23.23       108075       23.35       113059       23.41       118043       23.47         6303       22.55       68200       22.66       73361       22.73       78453       22.84       8330       22.93       8814       23.02       93285       23.17       103266       23.23       108250       23.35       113324       23.42       118218       23.47 <td< td=""><td>62868</td><td>22.55</td><td>67852</td><td>22.65</td><td>72837</td><td>22.74</td><td>77821</td><td>22.84</td><td>82805</td><td>22.91</td><td>87789</td><td>23.03</td><td>92773</td><td>23.08</td><td>97757</td><td>23.19</td><td>102741</td><td>23.22</td><td>107725</td><td>23.35</td><td>112710</td><td>23.39</td><td>117694</td><td>23.46</td></td<>	62868	22.55	67852	22.65	72837	22.74	77821	22.84	82805	22.91	87789	23.03	92773	23.08	97757	23.19	102741	23.22	107725	23.35	112710	23.39	117694	23.46
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	62956	22.55	67940	22.65	72924	22.74	77908	22.84	82893	22.92	8/8//	23.03	92861	23.08	97845	23.18	102829	23.22	107813	23.34	112/9/	23.40	117780	23.47
6321622.566820222.667327422.737817022.848332222.948822623.029321123.099819523.1710309123.2310816323.3511314723.4111804323.476330522.566829022.657327422.737834522.848333022.938813423.029329823.1710317823.2310816323.3511314723.4111813123.476339322.556836722.667344922.737843322.848330022.938813423.029329823.1710326623.2310825023.3511323423.4211818023.486346022.556845522.66735622.747852022.848350522.958848923.039347323.119845723.1810341123.2210842523.3511340923.4311893323.476365522.556865922.677362322.777869522.848355222.968857623.039360023.119854223.1810352823.2210860723.3811340923.4211848123.476374322.5668727737822.777869522.848355222.968857623.039360023.119864223.1810352823.2210861023.3811349923.4211848123.4763743 </td <td>63131</td> <td>22.50</td> <td>68115</td> <td>22.00</td> <td>73099</td> <td>22.74</td> <td>78083</td> <td>22.04</td> <td>83068</td> <td>22.92</td> <td>88052</td> <td>23.02</td> <td>92940 93036</td> <td>23.09</td> <td>97932</td> <td>23.17</td> <td>102910</td> <td>23.22</td> <td>107988</td> <td>23.34</td> <td>112005</td> <td>23.40</td> <td>117956</td> <td>23.47</td>	63131	22.50	68115	22.00	73099	22.74	78083	22.04	83068	22.92	88052	23.02	92940 93036	23.09	97932	23.17	102910	23.22	107988	23.34	112005	23.40	117956	23.47
63305       22.56       68290       22.65       73274       22.73       78258       22.84       83242       22.94       88226       23.02       93211       23.09       98195       23.17       103178       23.23       108163       23.35       113147       23.41       118131       23.47         63393       22.55       68377       22.66       73361       22.73       78435       22.84       83300       22.93       88314       23.02       93298       23.10       98282       23.17       103266       23.23       108250       23.35       113234       23.42       118218       23.48         63565       22.55       68652       22.66       73453       22.77       78630       22.84       83505       22.95       88489       23.03       93473       23.11       98369       23.22       108425       23.35       113409       23.42       118308       23.47         63655       22.56       68652       22.67       73711       22.75       78695       22.85       83660       22.97       88664       23.03       93735       23.11       98612       23.22       108612       23.37       113497       23.42       118481       23.47       13681	63218	22.56	68202	22.66	73186	22.73	78170	22.85	83155	22.93	88139	23.02	93123	23.09	98107	23.17	103091	23.23	108075	23.35	113059	23.41	118043	23.47
63393       22.55       68377       22.65       73361       22.73       78345       22.84       83330       22.93       88314       23.02       93298       23.10       98282       23.17       103266       23.23       108250       23.35       113234       23.42       118218       23.48         63480       22.55       68465       22.66       73449       22.73       78433       22.84       83417       22.94       88401       23.03       93385       23.10       98369       23.17       103353       23.23       108338       23.35       113202       23.42       118306       23.48         63668       22.55       68652       22.66       73623       22.77       78602       22.84       83505       22.95       88489       23.03       93473       23.11       98547       23.18       103425       23.22       108612       23.35       113409       23.42       118481       23.47         63630       22.56       68877       7361       22.87       78695       22.85       83667       23.03       93735       23.11       98632       23.19       103616       23.22       108607       23.88       113547       23.42       118658       23.47	63305	22.56	68290	22.65	73274	22.73	78258	22.84	83242	22.94	88226	23.02	93211	23.09	98195	23.17	103178	23.23	108163	23.35	113147	23.41	118131	23.47
63480       22.55       68465       22.66       73449       22.73       78433       22.84       83417       22.94       88401       23.03       93385       23.17       103353       23.23       108338       23.35       113322       23.42       118306       23.48         63568       22.55       68552       22.66       73536       22.74       78520       22.84       83505       22.95       88489       23.03       93473       23.11       98457       23.18       103411       23.22       108425       23.55       113409       23.43       118393       23.47         63655       22.55       68639       22.67       73623       22.75       78608       22.84       83592       2.96       8576       23.03       93648       23.11       98642       23.18       103528       23.22       108612       23.37       113497       23.42       118481       23.47         63743       22.56       68727       22.67       73711       22.77       78782       22.85       83677       2.97       88751       23.03       93752       23.11       98719       23.18       103703       23.23       1138671       23.43       118655       23.47       18655	63393	22.55	68377	22.65	73361	22.73	78345	22.84	83330	22.93	88314	23.02	93298	23.10	98282	23.17	103266	23.23	108250	23.35	113234	23.42	118218	23.48
63568       22.55       68552       22.66       73536       22.74       78520       22.84       83505       22.95       88489       23.03       93473       23.11       98457       23.18       103441       23.22       108425       23.35       113409       23.43       118393       23.47         63655       22.55       68639       22.67       73623       22.75       78608       22.84       83592       22.96       88576       23.03       93560       23.11       98632       23.18       103528       23.22       108612       23.37       113497       23.42       118481       23.47         63743       22.56       68727       22.67       73711       22.75       78695       22.85       83680       22.97       88664       23.03       93648       23.11       98632       23.19       103616       23.22       108607       23.88       1138671       23.42       118565       23.47         6330       22.57       68902       22.67       73866       22.75       78870       22.86       83855       22.95       88839       23.04       93923       23.11       98677       23.18       103703       23.24       10875       23.38       113846	63480	22.55	68465	22.66	73449	22.73	78433	22.84	83417	22.94	88401	23.03	93385	23.10	98369	23.17	103353	23.23	108338	23.35	113322	23.42	118306	23.48
63655       22.55       68639       22.67       73623       22.75       78608       22.84       83592       22.96       88576       23.03       93560       23.11       98544       23.18       103528       23.22       108512       23.37       113497       23.42       118481       23.47         63743       22.56       68727       22.67       73711       22.75       78695       22.85       83680       22.97       88664       23.03       93648       23.11       98612       23.21       108616       23.22       108600       23.38       113584       23.42       118658       23.46         63803       22.56       68814       22.67       73712       22.75       78872       22.85       83767       22.97       88751       23.03       93735       23.11       98719       23.81       103703       23.23       108607       23.38       113571       23.42       118655       23.47         63018       22.57       68989       22.67       73973       22.76       78977       22.86       83852       22.95       88839       23.04       93910       23.11       98607       23.18       103703       23.24       108775       23.38       113846	63568	22.55	68552	22.66	73536	22.74	78520	22.84	83505	22.95	88489	23.03	93473	23.11	98457	23.18	103441	23.22	108425	23.35	113409	23.43	118393	23.47
63743       22.56       68727       22.67       73711       22.75       7895       22.85       63800       22.97       80604       23.03       93745       23.11       96032       23.12       103616       23.22       108600       23.38       113674       23.43       118665       23.47         63830       22.56       68814       22.67       73788       22.77       7872       22.85       83767       22.97       88751       23.03       93735       23.11       980719       23.23       108687       23.38       113671       23.42       118655       23.47         63918       22.57       68899       22.67       73973       22.76       78957       22.86       83855       22.95       88839       23.04       93823       23.11       980719       23.18       103703       23.23       108687       23.38       113671       23.42       118650       23.47         64005       22.57       68989       22.67       73973       22.76       78957       22.86       83942       22.95       89913       23.10       98981       23.19       103965       23.24       108950       23.37       113934       23.43       118830       23.47	63655	22.55	68639	22.67	73623	22.75	78608	22.84	83592	22.96	88576	23.03	93560	23.11	98544	23.18	103528	23.22	108512	23.37	113497	23.42	118481	23.47
6330       22.50       60014       22.66       73786       22.74       70702       22.83       63017       22.84       106057       23.43       108057       23.44       118743       23.47         63918       22.57       68989       22.67       73973       22.76       78870       22.86       83852       23.04       9310       23.11       98807       23.18       103703       23.24       108667       23.38       113759       23.43       118743       23.47         64005       22.57       68989       22.67       73973       22.76       78957       22.86       83942       22.95       88926       23.04       93910       23.11       98807       23.18       103751       23.24       108622       23.38       113846       23.43       118830       23.47         64092       22.57       69077       22.67       74061       22.76       79045       22.86       84029       22.95       8913       23.05       93998       23.10       98812       23.19       103965       23.24       108950       23.37       113934       23.43       118830       23.47         64180       22.56       69164       22.67       74148       22.76	63743	22.50	68727	22.67	73711	22.75	78695	22.85	83680	22.97	88664	23.03	93648	23.11	98632	23.19	103616	23.22	108600	23.38	113584	23.43	118568	23.46
64005       22.57       68067       22.67       74061       22.76       79075       22.86       84029       22.95       89013       23.05       93998       23.10       9884       23.19       103855       23.24       108850       23.37       113846       23.43       118830       23.47         64092       22.57       69077       22.67       74061       22.76       79045       22.86       84029       22.95       89013       23.05       93998       23.10       98981       23.19       103955       23.24       108950       23.37       113934       23.43       118918       23.47         64180       22.56       69164       22.67       74148       22.76       79133       22.87       84117       22.95       89101       23.05       94085       23.11       99069       23.19       104053       23.24       109037       23.37       114021       23.43       119005       23.48         64267       22.56       69251       22.66       74236       22.76       79308       22.86       84204       22.95       89188       23.11       99056       23.19       104140       23.25       109124       23.36       114109       23.43       119005	63918	22.50	68902	22.00	73886	22.74	78870	22.00	83855	22.97	88839	23.03	93735	23.11	98807	23.10	103703	23.23	108775	23.30	113071	23.42	118743	23.47
64092       22.57       69077       22.67       74061       22.76       79045       22.86       84029       22.95       89013       23.05       93998       23.10       103965       23.24       108950       23.37       113934       23.43       118918       23.47         64180       22.56       69164       22.67       74148       22.76       79133       22.87       84117       22.95       89101       23.05       94085       23.11       99069       23.19       104053       23.24       109037       23.37       114021       23.43       119005       23.48         64267       22.56       69251       22.66       74236       22.76       79220       22.86       84204       22.95       89188       23.04       94172       23.11       99156       23.19       104140       23.25       109124       23.36       114109       23.43       119093       23.48         64355       22.57       69339       22.67       74323       22.76       79308       22.86       84292       22.96       89276       23.03       94260       23.12       99244       23.18       104228       23.25       109212       23.37       114196       23.43       119180	64005	22.57	68989	22.67	73973	22.76	78957	22.86	83942	22.95	88926	23.04	93910	23.11	98894	23.18	103878	23.24	108862	23.38	113846	23.43	118830	23.47
64180       22.56       69164       22.67       74148       22.76       79133       22.87       84117       22.95       89101       23.05       94085       23.11       99069       23.19       104053       23.24       109037       23.37       114021       23.43       119005       23.48         64267       22.56       69251       22.66       74236       22.76       79220       22.86       84204       22.95       89188       23.04       94172       23.11       99156       23.19       104103       23.25       109124       23.36       114109       23.43       119093       23.48         64355       22.57       69339       22.67       74323       22.76       79308       22.86       84292       22.96       89276       23.03       94260       23.12       99244       23.18       104228       23.25       109212       23.37       114196       23.43       119180       23.48	64092	22.57	69077	22.67	74061	22.76	79045	22.86	84029	22.95	89013	23.05	93998	23.10	98981	23.19	103965	23.24	108950	23.37	113934	23.43	118918	23.47
64267 22.56 69251 22.66 74236 22.76 79220 22.86 84204 22.95 89188 23.04 94172 23.11 99156 23.19 104140 23.25 109124 23.36 114109 23.43 119093 23.48 64355 22.57 69339 22.67 74323 22.76 79308 22.86 84292 22.96 89276 23.03 94260 23.12 99244 23.18 104228 23.25 109212 23.37 114196 23.43 119180 23.48	64180	22.56	69164	22.67	74148	22.76	79133	22.87	84117	22.95	89101	23.05	94085	23.11	99069	23.19	104053	23.24	109037	23.37	114021	23.43	119005	23.48
64355 22.57 69339 22.67 74323 22.76 79308 22.86 84292 22.96 89276 23.03 94260 23.12 99244 23.18 104228 23.25 109212 23.37 114196 23.43 119180 23.48	64267	22.56	69251	22.66	74236	22.76	79220	22.86	84204	22.95	89188	23.04	94172	23.11	99156	23.19	104140	23.25	109124	23.36	114109	23.43	119093	23.48
	64355	22.57	69339	22.67	74323	22.76	79308	22.86	84292	22.96	89276	23.03	94260	23.12	99244	23.18	104228	23.25	109212	23.37	114196	23.43	119180	23.48
64442 22.57 69426 22.67 74410 22.76 79395 22.86 84379 22.96 89363 23.02 94347 23.12 99331 23.18 104315 23.26 109299 23.37 114284 23.43 119268 23.48	64442	22.57	69426	22.67	74410	22.76	79395	22.86	84379	22.96	89363	23.02	94347	23.12	99331	23.18	104315	23.26	109299	23.37	114284	23.43	119268	23.48
0403U 22.58 09014 22.67 74498 22.75 70570 23.87 84467 22.96 84467 22.96 89451 23.03 94435 23.13 99419 23.18 104403 23.26 109387 23.37 114347 23.43 119355 23.48 64617 23.50 60661 23.66 10047 23.67 144456 23.75 70570 23.67 140442 23.67 14044	64530 64617	22.58	69514 60601	22.67	74498 74585	22.75	79482	22.86	84467	22.96	89451	23.03	94435	23.13	99419 00506	23.18	104403	23.26	109387	23.37	1143/1	23.43	119355	23.48
64705 22.60 69689 22.68 74673 22.76 79657 22.88 84642 22.95 89625 23.04 94610 23.13 99594 23.17 104578 23.27 109562 23.37 114546 23.44 119530 23.49	64705	22.60	69689	22.68	74673	22.76	79657	22.88	84642	22.95	89625	23.03	94610	23.13	99594	23.17	104578	23.20	109562	23.37	114546	23.44	119530	23.49

#### Daten der LWL-Messung

t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	т [°С]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]						
119617	23.49	124601	23.54	129586	23.59	134570	23.62	139554	23.68	144538	23.70	149522	23.78	154506	23.82	159490	23.86	164474	23.89	169458	23.92	174443	23.98
119705	23.49	124689	23.53	129673	23.59	134657	23.62	139641	23.68	144625	23.70	149610	23.78	154594	23.82	159578	23.80	164562	23.89	169546	23.92	174530	24.00
119880	23.49	124864	23.53	129848	23.60	134832	23.62	139816	23.68	144800	23.70	149785	23.77	154769	23.80	159753	23.86	164737	23.88	169721	23.92	174705	24.01
119967	23.49	124951	23.54	129936	23.59	134920	23.63	139904	23.67	144888	23.71	149872	23.77	154856	23.80	159840	23.86	164824	23.88	169808	23.92	174792	24.00
120054	23.49	125039	23.54	130023	23.59	135007	23.63	139991	23.67	144975	23.71	149959	23.77	154943	23.79	159928	23.86	164911	23.87	169895	23.92	174880	24.00
120142	23.49	125126	23.53	130111	23.58	135095	23.63	140079	23.67	145063	23.71	150047	23.76	155031	23.79	160015	23.86	164999	23.87	169983	23.93	174967	24.00
120229	23.49	125214	23.54	130198	23.58	135182	23.63	140166	23.67	145150	23.71	150134	23.76	155118	23.79	160102	23.86	165086	23.87	170158	23.93	175055	24.00
120317	23.49	125389	23.53	130230	23.50	135357	23.03	140233	23.00	145325	23.71	150309	23.70	155293	23.80	160277	23.85	165261	23.87	170130	23.94	175230	24.01
120492	23.49	125476	23.54	130460	23.59	135444	23.62	140428	23.67	145412	23.71	150397	23.76	155381	23.81	160365	23.85	165349	23.88	170333	23.95	175317	24.02
120579	23.49	125564	23.54	130548	23.59	135532	23.62	140516	23.67	145500	23.72	150484	23.76	155468	23.82	160452	23.85	165436	23.89	170420	23.95	175404	24.02
120666	23.50	125651	23.54	130635	23.59	135619	23.61	140603	23.67	145587	23.71	150571	23.76	155556	23.82	160540	23.85	165523	23.89	170508	23.95	175492	24.01
120754	23.50	125739	23.54	130723	23.58	135707	23.61	140691	23.67	145675	23.72	150659	23.76	155643	23.81	160627	23.86	165611	23.89	170595	23.95	175579	24.01
120841	23.51	125826	23.53	130810	23.58	135794	23.62	140778	23.67	145762	23.71	150746	23.77	155730	23.81	160714	23.80	165786	23.90	170683	23.95	175007	24.00
121016	23.51	126001	23.52	130985	23.59	135969	23.63	140953	23.67	145937	23.72	150921	23.78	155905	23.82	160889	23.86	165873	23.90	170857	23.95	175842	24.00
121104	23.50	126088	23.53	131072	23.59	136056	23.63	141040	23.67	146025	23.70	151009	23.78	155993	23.82	160977	23.86	165961	23.89	170945	23.95	175929	24.01
121191	23.50	126176	23.54	131160	23.60	136144	23.63	141128	23.67	146112	23.70	151096	23.78	156080	23.81	161064	23.86	166048	23.89	171032	23.95	176017	24.01
121279	23.50	126263	23.54	131247	23.60	136231	23.63	141215	23.67	146199	23.71	151184	23.78	156168	23.81	161152	23.86	166136	23.90	171120	23.95	176104	24.01
121366	23.50	126351	23.55	131335	23.59	136319	23.63	141303	23.67	146287	23.71	151271	23.78	156255	23.81	161239	23.86	166223	23.90	171207	23.95	176191	24.02
121403	23.50 23.50	126438	23.55	131422	23.60	136406	23.03	141390	23.68	146374	23.72	151358	23.78	156430	23.81	161414	23.80	166398	23.89	171295	23.95	176366	24.02
121628	23.50	126613	23.56	131597	23.61	136581	23.63	141565	23.69	146549	23.74	151533	23.77	156517	23.81	161501	23.86	166485	23.89	171470	23.95	176454	24.02
121716	23.51	126701	23.56	131685	23.61	136668	23.62	141652	23.68	146637	23.75	151621	23.77	156605	23.82	161589	23.86	166573	23.90	171557	23.94	176541	24.03
121803	23.52	126788	23.56	131772	23.60	136756	23.62	141740	23.68	146724	23.74	151708	23.78	156692	23.83	161676	23.86	166660	23.90	171645	23.94	176629	24.02
121891	23.51	126876	23.55	131859	23.61	136843	23.62	141827	23.68	146811	23.74	151796	23.78	156780	23.83	161764	23.86	166748	23.90	171732	23.95	176716	24.02
121978	23.51	126963	23.55	131947	23.61	136931	23.63	141915	23.68	146899	23.73	151883	23.78	156867	23.84	161851	23.85	166835	23.90	171819	23.94	176803	24.02
122003	23.51	127030	23.56	132122	23.61	137106	23.63	142002	23.69	140900	23.74	152058	23.79	157042	23.83	162026	23.86	167010	23.90	171994	23.94	176978	24.02
122240	23.51	127225	23.56	132209	23.60	137193	23.64	142177	23.69	147161	23.74	152145	23.79	157130	23.82	162113	23.86	167097	23.91	172082	23.95	177066	24.03
122328	23.51	127313	23.56	132297	23.60	137281	23.65	142265	23.70	147249	23.73	152233	23.80	157217	23.83	162201	23.85	167185	23.92	172169	23.96	177153	24.03
122415	23.50	127400	23.56	132384	23.60	137368	23.65	142352	23.70	147336	23.72	152320	23.79	157304	23.83	162288	23.84	167272	23.93	172257	23.96	177241	24.03
122503	23.50	127488	23.56	132471	23.60	137455	23.65	142439	23.70	147424	23.73	152408	23.80	157392	23.84	162376	23.85	167360	23.93	172344	23.95	177328	24.04
122590	23.51	127575	23.50	132559	23.60	137543	23.00	142527	23.70	147511	23.74	152495	23.80 23.80	157479	23.84	162463	23.85	167535	23.93	172431	23.95	177503	24.03
122765	23.52	127750	23.55	132734	23.60	137718	23.65	142702	23.71	147686	23.73	152670	23.80	157654	23.84	162638	23.86	167622	23.93	172606	23.96	177590	24.03
122852	23.51	127837	23.55	132821	23.60	137805	23.64	142789	23.70	147773	23.74	152758	23.80	157742	23.83	162726	23.86	167710	23.93	172694	23.97	177678	24.03
122940	23.52	127925	23.56	132909	23.60	137893	23.65	142877	23.70	147861	23.75	152845	23.80	157829	23.83	162813	23.87	167797	23.93	172781	23.97	177765	24.04
123027	23.52	128012	23.57	132996	23.60	137980	23.65	142964	23.70	147948	23.75	152932	23.80	157916	23.84	162900	23.86	167884	23.93	172869	23.98	177853	24.05
123115	23.52 23.52	128100	23.57	133083	23.60	138067	23.65	143051	23.70	148036	23.74	153020	23.79	158004	23.85	162988	23.87	167972	23.93	172956	23.99	177940	24.04
123292	23.52	128275	23.57	133258	23.60	138242	23.65	143226	23.69	148211	23.75	153195	23.78	158179	23.85	163163	23.86	168147	23.93	173131	24.00	178115	24.04
123377	23.52	128362	23.57	133346	23.59	138330	23.65	143314	23.69	148298	23.75	153282	23.78	158266	23.84	163250	23.86	168234	23.93	173218	24.00	178202	24.04
123464	23.52	128449	23.57	133433	23.59	138417	23.66	143401	23.69	148385	23.76	153370	23.79	158354	23.84	163338	23.86	168322	23.94	173306	23.99	178290	24.04
123552	23.52	128537	23.57	133521	23.60	138505	23.66	143489	23.70	148473	23.76	153457	23.79	158441	23.84	163425	23.87	168409	23.94	173393	23.99	178377	24.04
123639	23.52	128624	23.56	133608	23.60	138592	23.65	143576	23.69	148560	23.77	153544	23.79	158529	23.84	163512	23.88	168497	23.94	173481	23.98	178465	24.04
123727	23.52 23.53	128712	23.50	133090	23.01	138767	23.00	143004	23.70	148048	23.76	153632	23.80 23.80	158703	23.84	163687	23.88 23.88	168671	23.94	173656	23.98	178640	24.03
123902	23.54	128887	23.56	133870	23.60	138854	23.65	143838	23.69	148823	23.76	153807	23.79	158791	23.84	163775	23.88	168759	23.95	173743	23.99	178727	24.04
123989	23.54	128974	23.56	133958	23.60	138942	23.65	143926	23.69	148910	23.76	153894	23.79	158878	23.85	163862	23.88	168846	23.95	173831	23.99	178815	24.05
124077	23.54	129061	23.57	134045	23.60	139029	23.66	144013	23.70	148998	23.76	153982	23.80	158966	23.84	163950	23.88	168934	23.94	173918	23.99	178902	24.05
124164	23.54	129149	23.58	134133	23.60	139117	23.66	144101	23.70	149085	23.77	154069	23.80	159053	23.85	164037	23.87	169021	23.94	174005	23.99	178989	24.05
124252	23.54	129236	23.59	134220	23.60	139204	23.66	144188	23.70	149172	23.77	154157	23.81	159141	23.85	164124	23.86	169109	23.93	174093	23.99	170164	24.04
124339	23.54 23.54	129324	23.59	134395	23.62	139292	23.67	144270	23.70	149200	23.77	154244	23.81	159228	23.86	164299	23.86	169283	23.93	174160	23.90 23.97	179252	24.04 24.06
124514	23.54	129499	23.59	134482	23.62	139466	23.67	144451	23.70	149435	23.77	154419	23.82	159403	23.86	164387	23.88	169371	23.92	174355	23.97	179339	24.07

#### Daten der LWL-Messung

t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]
179427	24.06	184413	24.15	189404	24.26
179514	24.06	184501	24.16	189491	24.26
179601	24.06	184588	24.16	189578	24.26
179689	24.06	184675	24.16	189666	24.26
179776	24.06	184763	24.15	189753	24.26
179864	24.07	184850	24.15	189841	24.26
179951	24.07	184938	24.15	189928	24.25
180039	24.07	185025	24.15	190016	24.25
180126	24.07	185113	24.15	190103	24.26
180214	24.06	185200	24.16	190191	24.26
180301	24.06	185287	24.17	190278	24.26
180389	24.06	185375	24.18	190365	24.26
180476	24.07	185462	24.18	190453	24.26
180563	24.07	185550	24.18	190540	24.25
180651	24.08	185637	24.18	190628	24.26
180738	24.09	185725	24.19	190715	24.26
180826	24.09	185813	24.19	190803	24.26
180913	24.09	185900	24.20	190890	24.25
181001	24.08	185988	24.20	190977	24.25
181088	24.08	186075	24.20	191065	24.25
181176	24.08	186163	24.20	191152	24.25
181263	24.09	186251	24.21	191240	24.25
101300	24.09	100330	24.22	191327	24.20
101430	24.10	100420	24.22	101502	24.20
101525	24.11	196601	24.22	101500	24.20
181700	24.11	186689	24.22	191677	24.25
181788	24.10	186777	24.22	191764	24.20
181875	24.11	186864	24.23	191852	24.26
181963	24.11	186952	24.23	191939	24.27
182050	24.10	187039	24.24	192027	24.28
182137	24.10	187127	24.25	192114	24.28
182225	24.10	187214	24.25	192202	24.28
182312	24.11	187302	24.25	192289	24.28
182400	24.11	187389	24.25	192377	24.29
182487	24.11	187477	24.25		
182575	24.11	187564	24.25		
182662	24.10	187652	24.26		
182750	24.10	187740	24.25		
182837	24.10	187827	24.25		
182924	24.11	187915	24.24		
183012	24.11	188003	24.24		
183099	24.11	188090	24.24		
193275	24.11	199265	24.23		
183362	24.12	188353	24.22		
183450	24.13	188440	24.22		
183537	24.12	188528	24.22		
183625	24.12	188616	24.22		
183713	24.13	188703	24.23		
183800	24.13	188791	24.23		
183888	24.13	188878	24.23		
183976	24.13	188966	24.24		
184063	24.13	189054	24.24		
184151	24.13	189141	24.25		
184238	24.14	189229	24.25		
184326	24.15	189316	24.26		

# Dissertationsschrift

Bestimmung verschiedener Untergrundparameter an einem Erdwärmesondenfeld für Heiz- und Kühlzwecke und thermohydraulische Modellierungen des enhanced Thermal Response Tests

Anhang 2: Matlab Skripte

- Anhang 2.a) Matlab-Skript- und Funktionsfiles Relaxationsmethode
- Anhang 2.b) Matlab-Skript- und Funktionsfiles Temperaturberechnung von Erdwärmesonden
- Anhang 2.c) Matlab-Skript- und Funktionsfiles Wärmeleitfähigkeitsberechnung bei schwankendem Wärmeeintrag (Kontourplot)

## Anhang 2.a) Matlab-Skript- und Funktionsfiles Relaxationsmethode

#### **Relaxation-Method.m**

```
ş
% Thermal Conductivity Calculation of BHEs Using the Relaxation Method
oʻç
% used methods:
% Relaxation Method of the Line Source Approximation (RLS)
8
% Florian Malm 2013
% Sources:
% Malm 2013
% after Dornstädter et al. 2008 & Heske et al. 2011
2
 _____
% References:
% Malm, F. (2013) Bestimmung verschiedener Untergrundparameter an einem
% Erdwärmesondenfeld für Heiz- und Kühlzwecke und thermohydraulische
% Modellierungen des enhanced Thermal Response Tests; Universität Mainz
% (Dissertation).
º .
% Relaxation Method:
% Eq. II-1.3:
% tc = Q l/(4*pi*m)
% m
     = incline of the ln(t/(t-th))-T-matrix solved by linear
00
      regression of the data
§ _____
                    _____
o.c.
% start of script
clear:
  _____
% input variables
∞
t_hd = 3.0; % end of the heat injection [d]
t start = 6.0;
               % start of calculation [d]
t_end = 8.0;
               % end of calculation [d]
               % round to position after decimal point [-]
prec = 2.0;
tc rock = 2.0;
               % thermal conductivity of surrounding rock,
               % estimated through modeling or laboratory
               % measurements [W/(m K)]
               % important for the calculation of the
               % deviation
% selectable heat input method, choose input method with ifql variable
% _____
    = 30;
               % mean heat input [W/m]
Q l
ifql
   = 1;
               \% if ifgl = 1, then do calculation of Q l with
               % relax_m_calc_Q_l-script, else take Q_l from
               % input above
% _____
```

```
% load data sets
% data sets must be a time-temperature matrix (in accumulated seconds and
% degrees Celsius) and a time-heat-injection matrix (in accumulated days
and
% joule per day per meter) without a header in *.txt-ASCII-format
∞
% time-temperature-matrix, t(:,1) [s], T(:,2) [°C]
tT relax = load('t-T_relax_input.txt','-ASCII');
% time-heat-injection-matrix, t(:,1) [d], q(:,2) [J/d/m]
if ifql == 1
         = load('t-q relax input.txt','-ASCII');
  tq relax
end
% calculated variables
%
t h = t_h d^{24*60*60};
prec calc = ['%10.',num2str(round(prec)),'f'];
                  % position after decimal point [-]
olo
if ifql == 1
  tq_relax_s(:,1) = tq_relax(:,1)*60*60*24; % t(:,1) [s]
tq_relax_s(:,2) = tq_relax(:,2)/60/60/24; % q(:,2) [W/m]
  clear tq_relax;
end
    _____
8 ____
% calculate Q l [W/m]
8 -----
% build tq_data with relax_m_calc_Q_l.m -script
if ifgl == 1
 [Q 1] = relax m calc Q l(tq relax s,t h);
end
clear ifql;
% calculate thermal conductivity [W/(m K)]
0/9
% build tc with relax_m_calc_tc.m -script
•
[tc,T 0,m regr,r2] = relax m calc tc(tT relax,t h,t start s,t end s,Q l);
tc dev = 100*abs(tc-tc rock)/tc rock; % deviation from given tc [%]
alo
% output text
Tx01=' ';
Tx02='Calculation of the Thermal Conductivity with the Relaxation-Method';
Tx03=' (Malm 2013 after Dornstädter 2008 and Heske 2011)';
Tx04='-----
                                        ____!
Tx05='Input Parameters:';
Tx06=['End of Heat Injection after:
                                   ', ...
  num2str(t hd,prec calc),' d'];
Tx07=['Start of Calculation after:
                                   ', ...
  num2str(t start,prec_calc),'
                     d'];
                                   ', ...
Tx08=['End of Calculation after:
  num2str(t end,prec calc),' d'];
```

```
Tx09=['Given Thermal Conductivity of Rock:
                                                 ', ...
    num2str(tc_rock,prec_calc),' W/(m K)'];
Tx10='-----
                              _____
                                                   ____!!
Tx11='Output Parameters:';
Tx12=['Incline of the ln(t/(t-th))-T-Slope:
                                                  ', ...
    num2str(m_regr,prec_calc),' K'];
Tx13=['Coefficient of Determination R<sup>2</sup>:
                                                  ', ...
   num2str(r2,prec_calc),' -'];
                                                 ', ...
Tx14=['Calculated Thermal Conductivity of Rock:
   num2str(tc,prec_calc),' W/(m K)'];
Tx15=['Deviation from calculated to given TC:
                                                 ', ...
   num2str(tc_dev,prec_calc),' %'];
Tx16=['Calculated Temperature of Undisturbed Ground T0:
                                                 ', ...
   num2str(T_0,prec_calc),' °C'];
Tx17='----
                               -----';
Tx18=' ';
disp(Tx01);disp(Tx02);disp(Tx03);disp(Tx04);disp(Tx05);disp(Tx06);
disp(Tx07); disp(Tx08); disp(Tx09); disp(Tx10); disp(Tx11); disp(Tx12);
disp(Tx13); disp(Tx14); disp(Tx15); disp(Tx16); disp(Tx17); disp(Tx18);
clear Tx01 Tx02 Tx03 Tx04 Tx05 Tx06 Tx07 Tx08 Tx09 Tx10 Tx11 Tx12 Tx13;
clear Tx14 Tx15 Tx16 Tx17 Tx18;
§ _____
                            _____
% END OF SCRIPT
§ _____
```

# relax\_m\_calc\_Q\_l.m

```
function [Q l] = relax_m_calc_Q_l(tq_relax_s,t_h)
% calculate Q l [W/m] for Relaxation Method.m -script
06
% input arguments:
% tq_relax_s = time-heat-injection-matrix, t(:,1) [s], q(:,2) [W/m]
% t_h = end of the heat injection [s]
96
% output argument:
% Q l = mean heating power per unit length for two cables [W/m]
8 ------
qr_s = size(tq_relax_s);
y = 1;
for i=1:qr s(1)
   if tq relax s(i,1) < t h
      y=y+1;
   end
end
          = zeros(y,2);
:) = tq_relax_s(1:y,:);
tq data
tq data(1:y,:)
% calculate Q l
                                 % mean heat injection [W/m]
% mean heat injection [W/m]
% mean HI for two cables! [W/m]
mean_Q_data = mean(tq_data,1);
mean_Q_1 = abs(mean_Q_data(1,2));
     = mean Q 1*2;
Q 1
```

# relax\_m\_calc\_tc.m

```
= end of calculation [s]
= mean heating power per unit length for two cables [W/m]
% t end s
% Q l
     _____
% ____
% output arguments:
             = thermal conductivity of surrounding rock [W/(m K)]
% tc
% T_0 = undisturbed temperature of the underground [°C]
% m_regr = incline of the ln(t/(t-th))-T-slope [K]
% r2 = coefficient of determination R^2 [-]
%
§ _____
                             _____
% Relaxation Method:
% Eq. II-1.3:
% tc = Q_1/(4*pi*m)
% m
        = incline of the ln(t/(t-th))-T-matrix solved by linear
        regression of the data via the polyfit-function
8
2
% build tT data
8 -----
r s = size(tT relax); z = 0; m = 0; n = 0;
for i=1:r_s(1)
   if tT_relax(i,1) < t h</pre>
      z=z+1;
   end
   if tT relax(i,1) < t start s</pre>
     m=m+1;
   end
   if tT relax(i,1) <= t end s</pre>
     n=n+1;
   end
end
n = n-z; m = m-z;
             = zeros(n-m-1,2);
tT data
for i=1:n-m-1
   tT data(i,1) = log(tT relax(i+z+m+1,1)/(tT relax(i+z+m+1,1)-t h));
end
tT data(1:end,2) = tT relax(z+m+2:n+z,2);
                                     _____
%
% caclulate linear regression of ln(t/(t-th))-T-File
o's
lin regr = polyfit(tT data(:,1),tT data(:,2),1);
ç.____
% calculate thermal conductivity of surrounding rock
%
tc = Q_l/(4*pi*lin_regr(1)); % thermal conductivity [W/(m K)]
T_0 = lin_regr(2); % temperature undisturbed ground [°C]
m_regr = lin_regr(1); % incline of the ln(t/(t-th))-T-slope [K]
% calculate coefficient of determination R^2
% R^2 = (Pearson's Correlation Coefficient)^2 = corr(X,Y)^2
r2
     = corr(tT data(:,1),tT data(:,2))^2; % R^2 [-]
```

# Anhang 2.b) Matlab-Skript- und Funktionsfiles Temperaturberechnung von

Erdwärmesonden

# LSA-LSE-LSL.m

```
% -----
% Temperature Calculation of BHEs Using Various Methods
06
% used methods:
% Long Term Solution of the Line Source Approximation (LSA)
% Line Source Approximation using the Exponential Integral E1(x) (LSE)
% Numerical Inversion of the Laplace Transform Solution (LSL)
2
% Florian Malm 2013
% Sources:
% after Hellstroem 1991, pp. 150 & 153 (10.09 & 10.13)
% after Carslaw & Jaeger 1959, pp. 261
응 _____
                             _____
% References:
% -Baudoin, A. (1988) Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par
% batterie d'echangeurs baionnette verticaux; L'Universite de Reims
% Champagne-Ardenne, France (Dissertation).
% -Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. (1959) Conduction of Heat in Solids;
% 510 p., Oxford University Press, Oxford.
% -Hellstroem, G. (1991) Ground Heat Storage; 262 p., University of Lund,
% Sweden (Dissertation).
% -Veillon F. 1972. Ouelques nouvelles methodes pour le calcul numerique
% de la transformée inverse de Laplace, Université de Grenoble, France
% (Dissertation).
٥<u>،</u>
% Line Source Approximation:
% Eq. 10.13: Tfq(t) = q1/(4*pi*tc) * [ln([4*a*t]/rb^2)-eulmas] + q1*Rb + T0
oc.
% Line Source Exponential Integral E1(x):
% Eq. 10.09: Tfq(t) = q1/(4*pi*tc) * E1(r^2/[4*a*t] + q1*Rb + T0
∞
% Numerical Inversion of Laplace Transform Solution:
% Eq. 10.06: Tq(r,t) = q1/(2*pi*rb*tc) *sum[j=1-->j=10]((Vj/j)
                    * KO(Wj*r)/wj*K1(wj*rb))
% Eq. 10.07: wj = sqrt[(j*ln(2))/(tdiff*t)]
% Eq. 10.08: Vj = sum[k=Int((j-1)/2)-->min(j,5)](((-1)^(j-5)*k^5*(2k)!)
               /((5-k)!*(k-1)!*k!*(j-k)!*(2k-j)!))
8
2
               note: (k-1)! = gamma(k); (2k-j)! = gamma(2k-j+1)
_____
% start of script
clear;
% input variables
06
tc = 2.0;
                         % thermal conductivity rock, W/(m K)
v_heat_cap = 2.0;
                          % vol. heat capacity, MJ/(m^3 K)
r = 0.15;
r_b = 0.15;
Q = 30;
                          % radius, m
                          % borehole radius, m
                         % constant heat input, W/m
8 ---
    _____
     = 0.188620138905809; % thermal borehole resistivity, (m K)/W
= 10; % undisturbed ground temperature, °C
RЬ
т О
```

```
% calculated variables
∞
       = abs(psi(1)); % Euler-Mascheroni-Constant, -
eulmas
       = tc/(v heat cap*1e6); % thermal diffusivity rock, m^2/s
t_diff
% import time-heat-input-dataset, n,2-matrix, s -- W/m
                               _____
    -----
tq_data = load('t-q_input.txt','-ASCII');
% tT_data = load('t-T_input.txt','-ASCII');
% \text{ tc}(\text{tT data}) = 2.74863 \text{ W/ (m K)}
∞
% Calculation of the
% Long Term Solution of the Line Source Approximation (LSA)
% (eq. 10.13, p. 153, Hellstroem 1991)
% calculation T-t-line
% -----
   = LineSource Approx(r,t diff,tq data,tc,eulmas,Q);
[T]
% Create plot a la Hellstroem (fig. 10.2, p. 152, Hellstroem 1991)
06
Hellplot=zeros(size(T));
Hellplot(:,1) = log((t_diff*tq_data(:,1))./r_b.^2);
Hellplot(:,2)=(4.*pi.*tc.*T(:,2))./tq data(:,2);
8 -----
% Calculation of the
% Line Source Approximation Using the Exponential Integral E1(x) (LSE)
% (eq. 10.09, p. 150, Hellstroem 1991)
% calculation T-t-line
% -----
[Tq]
    = LineSource(r,t_diff,tq_data,tc,Q);
% Create plot a la Hellstroem (fig. 10.2, p. 152, Hellstroem 1991)
8 -----
Hellplot LSE=zeros(size(Tq));
Hellplot_LSE(:,1)=log((t_diff*tq_data(:,1))./r_b.^2);
Hellplot_LSE(:,2) = (4.*pi.*tc.*Tq(:,2))./tq_data(:,2);
o.
% Calculation of the
% Numerical Inversion of Laplace Transform Solution (LSL)
% (eq. 10.06, 10.07 & 10.08, p. 150, Hellstroem 1991)
% calculation T-t-line
% _____
[Tt] = LineSource_Laplace(r,t_diff,tq_data,tc,r_b,Q);
% Create plot a la Hellstroem (fig. 10.2, p. 152, Hellstroem 1991)
Hellplot LSL=zeros(size(Tq));
Hellplot LSL(:,1)=log((t diff*tq data(:,1))./r b.^2);
Hellplot LSL(:,2)=(4.*pi.*tc.*Tt(:,2))./tq data(:,2);
```

```
٥<u>،</u>
% Result Plots
% T-t-plot
ok
                             % font size for the all fonts in the plot
fs=12;
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
h b fig = [scrsz(3)/2 scrsz(4)/1.2];
pos_fig = [abs((scrsz(3)-h_b_fig(1))/2) abs((scrsz(4)-h_b_fig(2))/2)];
figure('Position',[pos fig(1) pos fig(2) h b fig(1) h b fig(2)])
subplot(2,1,1);
plot(T(1:end,1)/60/60/24,T(1:end,2),'.',Tq(1:end,1)/60/60/24, ...
    Tq(1:end,2), '--', Tt(1:end,1)/60/60/24, Tt(1:end,2), '-');
grid on;
% title('time-temperature plot line source');
xlabel('t [d]','fontsize',fs);
ylabel('T [°C]','fontsize',fs);
hleglentry1 = 'Langzeitlösung der Linienquellenapproximation';
hleqlentry2 = 'Linienquellenapproximation';
hleq1entry3 = 'exakte Lösung nach Veillon 1972';
hleq1 = leqend(hleq1entry1, hleq1entry2, hleq1entry3);
set(hleg1, 'Location', 'SouthEast');
y min = [min(T(:,2)) min(Tq(:,2)) min(Tt(:,2))];
y \max = [\max(T(:,2)) \max(Tq(:,2)) \max(Tt(:,2))];
axis([0 max(T(:,1))/60/60/24 round(min(y_min))-2 round(max(y_max))+2]);
set(gca, 'YTick', -100:2:100)
set(gca,'fontsize',fs);
% plot a la Hellstroem (fig. 10.2, p. 152, Hellstroem 1991)
% ln([a*t]/rb^2)
% (4*pi*tc*Tbq)/q1
§ _____
                     _____
subplot(2,1,2);
plot(Hellplot(1:end,1),Hellplot(1:end,2),'.',Hellplot LSE(1:end,1), ...
    Hellplot_LSE(1:end, 2), '--', Hellplot_LSL(1:end, 1), ...
    Hellplot LSL(1:end, 2), '-');
grid on;
% title('figure 10.2, p. 152, Hellstroem 1991');
hleg2entry1 = 'Langzeitlösung der Linienquellenapproximation';
hleg2entry2 = 'Linienquellenapproximation';
hleg2entry3 = 'exakte Lösung nach Veillon 1972';
hleg2 = legend(hleg2entry1, hleg2entry2, hleg2entry3);
set(hleg2, 'Location', 'SouthEast');
xlabel('ln(\alphat/r_b^2) [-]','fontsize',fs);
ylabel('4\pi\lambdaT_b^q/q_1 [-]','fontsize',fs);
set(gca, 'fontsize', fs);
o.
% END OF SCRIPT
```

### LineSource\_Approx.m

```
8
             q_vec(:,1) - time [s]
             q vec(:,2) - time-varying heat input [W/m]
8
          - thermal diffusivity of surrounding rock [m^2/s]
2
   а
%
   lambda - thermal conductivity of the surrounding rock [W/(m K)]
         - Euler-Mascheroni-constant [0,5772...]
8
   gamma
         - constant heat input [W/m]
8
  0
8 -----
                                             _____
% Output:
          - ntimesteps*2 matrix which contains:
8
  т
            T(:,1) - time [s]
8
            T(:,2) - temperature [°C]
8
8 _____
                                        _____
                -----
n
  = size(q vec,1);
  = zeros(n,2);
Т
for i = 1:n
   T(i,2)
            = (q_vec(i,2)/(4*pi*lambda))*(log((4*a*q_vec(i,1))/r^2) ...
               -gamma);
           = q vec(i,1);
   T(i,1)
end
```

#### LineSource.m

```
function [Tq] = LineSource(r,a,q vec,lambda,Q)
% LineSource computes heat injection from a pipe by a line source starting
% at t=0.
% [Tq] = LineSource(r,a,t,q,lambda)
§ _____
% Input Arguments:
%
  r - radius at which temperature is evaluated [m]
8
        - ntimesteps*2 matrix which contains:
  q_vec
2
            q vec(:,1) - time [s]
8
            q vec(:,2) - time-varying heat input [W/m]
° a
         - thermal diffusivity of surrounding rock [m^2/s]
 lambda – thermal conductivity of the surrounding rock [W/(m K)]
8
% Q - constant heat input [W/m]
°
                               _____
% Output:
% Tq
         - ntimesteps*2 matrix which contains:
8
           Tq(:,1) - time [s]
%
          Tq(:,2) - temperature [°C]
8 _____
               _____
                                 _____
n = size(q vec, 1);
Tq = zeros(n, 2);
for i = 1:n
           = (q vec(i,2)/(4*pi*lambda))*expint(r^2/(4*a*q vec(i,1)));
   Tq(i,2)
   Tq(i,1) = q_vec(i,1);
end
```

#### LineSource\_Laplace.m

```
% Eq. 10.06: Tq(r,t) = q1/(2*pi*rb*tc) *sum[j=1-->j=10]((Vj/j)
                       * KO(Wj*r)/wj*K1(wj*rb))
% Eq. 10.07: wj = sqrt[(j*ln(2))/(tdiff*t)]
% Eq. 10.08: Vj = sum[k=Int((j-1)/2)-->min(j,5)](((-1)^(j-5)*k^5*(2k)!)
                  /((5-k)!*(k-1)!*k!*(j-k)!*(2k-j)!))
                  note: (k-1)! = gamma(k); (2k-j)! = gamma(2k-j+1)
2
% Input Arguments:
8
  r - radius at which temperature is evaluated [m]
   r b
         - radius of the borehole [m]
8
   q vec - ntimesteps*2 matrix which contains:
8
             q_vec(:,1) - time [s]
q_vec(:,2) - time-varying heat input [W/m]
8
8
8
          - thermal diffusivity of surrounding rock [m^2/s]
   а
9
   lambda - thermal conductivity of the surrounding rock [W/(m K)]
8
   0
          - constant heat input [W/m]
8 -----
% Output:
8
  Τt
           - ntimesteps*2 matrix which contains:
8
             Tt(:,1) - time [s]
8
            Tt(:,2) - temperature [°C]
§ _____
                                   ------
n = size(q vec, 1);
Tt = zeros(n, 2);
for itime = 1:size(q vec,1)
   t = q \text{ vec}(\text{itime}, 1);
   q = q \text{ vec}(\text{itime}, 2);
   [Tt timestep] = ComputeLaplace(a,t,lambda,r,r b,q);
   Tt(itime,1) = t;
Tt(itime,2) = Tt_timestep;
end
8_____
function [S] = ComputeLaplace(a,t,lambda,r,r b,q)
% evaluates eq. 10.6 for a given timestep and q
S
 = 0;
for j=1:10
   [V_j]
   [V_j] = V_j_function(j);
[omega_j] = Omega_j(j,a,t);
   S = S + V j/j*besselk(0, omega j*r)/(omega j*besselk(1, omega j*r b));
end
S = S*q/(2*pi*r b*lambda);
o._____
function [omega j] = Omega j(j,a,t)
% computes omega j (eq. 10.7)
omega j = \operatorname{sqrt}(j \cdot \log(2) / (a \cdot t));
%_____
function [V j] = V j function(j)
% note: negative factorials can be expressed via the gamma function:
% --> n! = factorial(n) = gamma(n+1)
% --> (k-1)! = factorial(k-1) = gamma(k)
 = -> (2*k-j)! = factorial(2*k-j) = gamma(2*k-j+1) 
% note end.
k min = double(int32((j-1)/2));
k \max = \min([j,5]);
V j = 0;
```

# Anhang 2.c) Matlab-Skript- und Funktionsfiles Wärmeleitfähigkeitsberechnung bei schwankendem Wärmeeintrag (Kontourplot)

# Num\_LSL.m

```
_____
% Temperature Calculation of BHEs Using Various Methods
8
  _____
% used methods:
% Numerical Inversion of the Laplace Transform Solution (LSL)
2
% Florian Malm & Boris Kaus 2013
% -
% Sources:
% after Hellstroem 1991, pp. 150 & 153 (10.09 & 10.13)
% after Carslaw & Jaeger 1959, pp. 261
% _____
% References:
% -Baudoin, A. (1988) Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par
% batterie d'echangeurs baionnette verticaux; L'Universite de Reims
% Champagne-Ardenne, France (Dissertation).
% -Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. (1959) Conduction of Heat in Solids;
% 510 p., Oxford University Press, Oxford.
% -Hellstroem, G. (1991) Ground Heat Storage; 262 p., University of Lund,
% Sweden (Dissertation).
% -Veillon F. 1972. Quelques nouvelles methodes pour le calcul numerique
% de la transformée inverse de Laplace, Université de Grenoble, France
% (Dissertation).
% Numerical Inversion of Laplace Transform Solution:
% Eq. 10.06: Tq(r,t) = q1/(2*pi*rb*tc) *sum[j=1-->j=10]((Vj/j)
                    * KO(Wj*r)/wj*K1(wj*rb))
8
% Eq. 10.07: wj = sqrt[(j*ln(2))/(tdiff*t)]
% Eq. 10.08: Vj = sum[k=Int((j-1)/2)-->min(j,5)](((-1)^(j-5)*k^5*(2k)!)
8
                /((5-k)!*(k-1)!*k!*(j-k)!*(2k-j)!))
                note: (k-1)! = gamma(k); (2k-j)! = gamma(2k-j+1)
8
8 _____
% start of script
% _____
      _____
clear:
profile on;
t = cputime;
start clock = clock;
% input constants ans variables
v_heat_cap = 2.0;
                       % vol. heat capacity, MJ/(m^3 K)
r = 0.1;
                        % radius, m
        = 0.1;
                         % borehole radius, m
r b
```

```
% undisturbed ground temperature, °C
T = 10;
<u>9</u>
% starting values for numeric forward modelling
% := 1 --> save end-time-temp.-matrix
if save
       = 1;
                      % := 0 --> don't save matrix
                      % := 1 --> save Num LSL Output-File
if save p = 1;
                      % := 0 --> don't save Num LSL Output-File
      = 1;
                      % := 1 --> do numeric modelling
if num
                      % := 0 --> do no numeric modelling
plot_lang = 0;
                      % plot language: 1 := english, 0 := german
tc = 1.00; = 0.100;
                      % thermal conductivity rock, W/(m K)
                      % thermal borehole resistivity, (m K)/W
tc_step = 0.01;
R_b_step = 0.001;
                      % tc step, W/(m K)
                      % Rb step, (m K)/W
comp_start = 2.0;
                      % start of comparation, d
comp_stal
comp_end = 3.0,
n1 = 201;
= 201;
1 0;
                      % end of comparaion, d
                      % matrix dimension for tc, -
                      % matrix dimension for R b, -
prec
       = 1.0;
                      % round to position after decimal point, -
8 ______
% tc = 2.74863;
% R_b = 0.188516548286207;
8 ---
   % calculated variables
eulmas = abs(psi(1)); % Euler-Mascheroni-Constant, -
comp_st_s = comp_start*60*60*24; % start of comparation, s
comp end s = comp end*60*60*24; % end of comparaion, s
8 -----
% import data
%
% import time-heat-input-dataset, n,2-matrix, s -- W/m
% import time-temperature-dataset, n,2-matrix, s -- °C
tq_data_in = load('t-q_input.txt','-ASCII');
tT data = load('t-T input.txt','-ASCII');
٥<u>،</u>
o's
% adapting of t-q-input-data
o's
% [tq data] = Num tq data adaption(tq data in,tT data);
tq data = tq data in;
°
                  _____
if if num == 1
  %
   % calculation T-t-line
   _____
   [mean err matrix,tc matrix,R b matrix] = Num mean err matrix ...
      (n1,n2,tc,R b,tc step,R b step,r,v heat cap,tq data,r b, ...
      T_0,tT_data,comp_st_s,comp_end_s,start_clock);
   8 -----
   [row,column] = find(mean err matrix==min(min(mean err matrix)));
  min mean error = mean err matrix(row, column);
   tc end = tc matrix(row,1);
   R \overline{b} end = R \overline{b} matrix(column, 1);
  tc = tc_end;
R_b = R_b_end;
   8 _____
```

```
end
```

```
%
% calculation for plot
٥<u>،</u>
% Calculation of the
% Numerical Inversion of Laplace Transform Solution (LSL)
% (eq. 10.06, 10.07 & 10.08, p. 150, Hellstroem 1991)
[Tt] = Num_LineSource_Laplace(r,v_heat_cap,tq_data,tc,r_b,R_b,T_0);
[delta T t] = Num delta T t(tT data, Tt, comp st s, comp end s);
if if save ==1
   savetext = ['T-t input WLF-',num2str(tc),' Rb-',num2str(R b),'.txt'];
   save(savetext, 'Tt', '-ASCII');
   clear savetext;
end
%
% calculation of runtime
%
e = cputime-t;
hr = floor(e/60/60);
mn = floor((e-hr*60*60)/60);
sc = e - hr * 60 * 60 - mn * 60;
if hr == 1
   if plot lang == 0
     hourtext = 'Stunde';
   else
     hourtext = 'hour';
   end
else
   if plot lang == 0
     hourtext = 'Stunden';
   else
     hourtext = 'hours';
   end
end
if mn == 1
   if plot lang == 0
     mintext = 'Minute';
   else
     mintext = 'minute';
   end
else
   if plot lang == 0
     mintext = 'Minuten';
   else
     mintext = 'minutes';
   end
end
if sc == 1
   if plot lang == 0
     sectext = 'Sekunde';
   else
     sectext = 'second';
   end
else
   if plot lang == 0
     sectext = 'Sekunden';
   else
     sectext = 'seconds';
   end
end
```

```
§ _____
% creation of Num LSL_Output-File
% Num LSL Output-File data content
2
   _____

      %
      1
      2
      3
      4
      5
      6
      7

      %
      1
      date and time:
      DD
      MM
      YYYY
      hh
      mm
      ss
      0

      %
      2
      calculation time:
      hr
      mn
      sc
      0
      0
      0

      %
      2
      calculation time:
      hr
      mn
      sc
      0
      0
      0

      %
      3
      calc.
      tc
      A
      b
      0
      0
      0

      %
      3
      calc.
      tc
      R
      b
      0
      0
      0

      %
      4
      min_err and Rbcalc:
      merr
      R
      b1
      R
      b2
      R
      b3
      R
      b4
      R
      b5
      ...

% 5 tc and data tc1 data1,1 data1,2 data1,3 data1,4 data1,5 ...
                               tc2 data2,1 data2,2 data2,3 data2,4 data2,5 ...
% 6 tc and data
87...
€ _____
if if num == 1
     c = clock;
     plop1
                    = horzcat(tc matrix, mean err matrix);
     plop2
                    = horzcat(min mean error, R b matrix');
     plop3
                    = zeros(1, size(plop2, 2));
     plop3(1,1) = tc; plop3(1,2) = R b;
                    = zeros(1, size(plop2, 2));
     plop4
     plop4(1,1) = hr; plop4(1,2) = mn; plop4(1,3) = sc;
      if c(1,3) < 10
           DD = ['0', num2str(c(1,3))];
      else
           DD=num2str(c(1,3));
     end
      if c(1,2) <10
           MM=['0',num2str(c(1,2))];
      else
           MM=num2str(c(1,2));
      end
      YYYY=num2str(c(1,1));
      if c(1, 4) < 10
           hh=['0',num2str(c(1,4))];
      else
           hh=num2str(c(1,4));
      end
      if c(1, 5) < 10
           mm = ['0', num2str(c(1, 5))];
      else
           mm = num 2 str(c(1, 5));
      end
      if c(1, 6) < 10
          ss=['0', num2str(round(c(1, 6)))];
      else
          ss=num2str(round(c(1, 6)));
      end
                      = zeros(1, size(plop2, 2));
     plop5
     plop5(1,1) = str2double(DD); plop5(1,2) = str2double(MM);
plop5(1,3) = str2double(YYYY); plop5(1,4) = str2double(hh);
plop5(1,5) = str2double(mm); plop5(1,6) = str2double(ss);
     plot output = vertcat(plop5,plop4,plop3,plop2,plop1);
      if if save p == 1
           plot_output_text=['Num_LSL_Output-File_',DD,'.',MM,'.',YYYY, ...
                 '_', hh, '-', mm, '-', ss, '_', num2str(n1), 'x', num2str(n2), '.txt'];
           save(plot_output_text, 'plot_output', '-ASCII');
           clear plot_output_text;
      end
      clear plop1 plop2 plop3 plop4 plop5 DD MM YYYY hh mm ss;
else
```

```
c = clock;
   plot_output = zeros(2,6);
plot_output = vertcat(c,plot_output);
   plot output(2,1) = hr; plot output(2,2) = mn; plot output(2,3) = sc;
   plot output(3,1) = tc; plot output(3,2) = R b;
end
8 --
                 _____
% % Result Plots and Text Output
· ♀ ♀ _____
___
       = 0; % zoom in X-left contour-plot
                                             --> 90
x cont a
x cont b = 0; % zoom in X-right contour-plot
                                            --> 104
y cont a = 0; % zoom in Y-down contour-plot
                                             --> 77
y cont b = 0; % zoom in Y-up contour-plot
                                             --> 117
cont lines = 300;
[plot out] = Num plot output(tT data,Tt,delta T t,if num,plot output, ...
   prec, hourtext, mintext, sectext, x cont a, x cont b, y cont a, y cont b, ...
   cont lines,plot lang);
plot out;
clear x cont a x cont b y cont a y cont b plot out;
% clear workspace
clear pos fig h b fig scrsz hleg1 hleg2 hleg3 prec calc;
profile viewer;
profile off;
% tq data30=tT data;
% n3=size(tq data30,1);
% for i=1:n3
% tq data30(i,2)=30;
% end
% save('t-q input-30W-m.txt','tq data30','-ASCII');
Num LineSource Laplace.m
```

```
function [Tt] = Num LineSource Laplace(r, cv, q vec, lambda, r b, Rb, T0)
% LineSource computes heat injection from a pipe by a line source starting
% at t=0.
8
8
  [Tt] = LineSource Laplace(r,a,t,q,lambda,r b,Rb,T0)
2
% --
     _____
% Numerical Inversion of Laplace Transform Solution*:
% *Hellstroem, G. (1991) Ground Heat Storage; 262 p., University of Lund,
% Sweden (Dissertation). p.150
% Eq. 10.06: Tq(r,t) = q1/(2*pi*rb*tc) *sum[j=1-->j=10]((Vj/j)
8
                       * KO(Wj*r)/wj*K1(wj*rb))
% Eq. 10.07: wj = sqrt[(j*ln(2))/(tdiff*t)]
% Eq. 10.08: Vj = sum[k=Int((j-1)/2)-->min(j,5)](((-1)^(j-5)*k^5*(2k)!)
8
                   /((5-k)!*(k-1)!*k!*(j-k)!*(2k-j)!))
8
                   note: (k-1)! = gamma(k); (2k-j)! = gamma(2k-j+1)
                     -----
8 -----
% Input Arguments:
% r - radius at which temperature is evaluated [m]
```

```
8
  r b
        - radius of the borehole [m]
   q vec - ntimesteps*2 matrix which contains:
8
8
           q vec(:,1) - time [s]
            q vec(:,2) - time-varying heat input [W/m]
9
   CV
         - volumetric heat capacity of surrounding rock [MJ/(m^3 K)]
9
   lambda - thermal conductivity of the surrounding rock [W/(m K)]
9
         - thermal borehole resistance [(m K)/W]
   Rb
8
        - starting temperature [°C]
   ΨО
8
8 -----
% Output:
          - ntimesteps*2 matrix which contains:
8
 Τt
8
           Tt(:,1) - time [s]
           Tt(:,2) - temperature [°C]
00
       _____
2
% start
%
% calculated variable
oʻ
a = lambda/(cv*le6); % thermal diffusivity rock, m^2/s
% create Tt-matrix
8 -----
n = size(q_vec,1);
Tt = zeros(n, 2);
for itime = 1:size(q_vec,1)
   t.
              = q vec(itime,1);
               = q_vec(itime, 2);
   [Tt timestep] = ComputeLaplace(a,t,lambda,r,r b,q,Rb,T0);
   Tt(itime,1) = t;
Tt(itime,2) = Tt_timestep;
end
% -
% calculation of:
% Eq. 10.06: Tq(r,t) = q1/(2*pi*rb*tc) *sum[j=1-->j=10]((Vj/j)
     * KO(Wj*r)/wj*K1(wj*rb))
8
8-----
function [S] = ComputeLaplace(a,t,lambda,r,r b,q,Rb,T0)
% evaluates eq. 10.6 for a given timestep and q
S = 0;
T t = T0;
for j = 1:10
   [V j]
           = V j function(j);
           = Omega_j(j,a,t);
   [omega j]
            = S + V_j/j*besselk(0,omega_j*r)/(omega j* ...
   S
                  besselk(1,omega j*r b));
              = T0+S; % note: uncertain if OK
   % T t
end
S = (S*q/(2*pi*r_b*lambda)) + q*Rb + T_t;
~
~
                                     _____
% calculation of:
% Eq. 10.07: wj = sqrt[(j*ln(2))/(tdiff*t)]
8-----
function [omega_j] = Omega_j(j,a,t)
% computes omega_j (eq. 10.7)
omega_j = sqrt(j*log(2)/(a*t));
8-----
% calculation of:
% Eq. 10.08: Vj = sum[k=Int((j-1)/2)-->min(j,5)](((-1)^(j-5)*k^5*(2k)!)
2
                /((5-k)!*(k-1)!*k!*(j-k)!*(2k-j)!))
2
                note: (k-1)! = gamma(k); (2k-j)! = gamma(2k-j+1)
§_____
```

#### Num\_delta\_T\_t.m

```
function [delta_T_t] = Num_delta_T_t(tT_data,Tt,comp_st_s,comp end s)
% creates t-delta-T-matrix with tT data and Tt
2
8
 [delta T t] = Num delta T t(tT data, Tt)
2
            _____
% _____
                            _____
% Input Arguments:
 tT_data- time-temperature n,2-matrix [s -- °C], givenTt- time-temperature n,2-matrix [s -- °C], calculated
8
8
        _____
8 _____
% Output:
  delta T t
9
               - time-delta-temperature n,2-matrix which contains:
8
                  tq data(:,1) - time [s]
                   tq data(:,2) - temperature [W/m]
8
% ____
% start
% cutting data-sets
olo
n = size(Tt, 1);
n \text{ comp} = 0;
for i = 1:n
   Tt count = Tt(i, 1);
   if Tt count < comp st s
      n comp = n comp + 1;
   end
end
n_{comp2} = n - n_{comp};
§ _____
                         _____
% creating delta-T-t-data
§ _____
delta T t = zeros(n comp2,2);
for i = 1:n comp2
   delta T t(i,1) = tT data(i+n comp,1);
   delta T t(i,2) = (tT data(i+n comp,2)-Tt(i+n comp,2))^2;
end
```

#### Num\_mean\_err\_matrix.m

```
function [mean_err_matrix,tc_matrix,R_b_matrix] = Num_mean_err_matrix ...
    (n1,n2,tc,R_b,tc_step,R_b_step,r,v_heat_cap,tq_data,r_b,T_0, ...
    tT_data,comp_st_s,comp_end_s,start_clock)
```

```
% creates tc-, R b- & mean err-matrix with tT data and Tt
2
  [mean err matrix,tc matrix,R b matrix] = Num mean err matrix(n1,n2, ...
2
     tc,R_b,r,t_diff,tq_data,r_b,T_0,tT_data,Tt)
9
2
% _____
% Input Arguments:
8
                   - length tc-matrix [-]
  n1
                   - length R b-matrix [-]
8
   n2
                   - starting value thermal conductivity [W/(m K)]
8
   tc
  R b
                   - starting value thermal borehole resistance [(m K)/W]
8
   tc step
                   - tc-step for mean error matrix [W/(m K)]
8
   R_b_step
                  - R b-step for mean error matrix [(m K)/W]
9
9
   r
                   - radius for temp-calculation [m]
   v_heat_cap - volumetric neat capacity ....,
tg data - time-heat-input n,2-matrix [s -- W/m]
9
9
                   - borehole radius [m]
9
   r b
   т_0
9
                  - undisturbed ground temperature [°C]
   i_o- undisturbed ground temperature [C]tT_data- time-temperature n,2-matrix [s -- °C], givencomp_st_s- starting time of comparison [s]comp_end_s- ending time of comparison [s]
9
8
8
e _____
         ___
             _____
% Output:
8
   mean err matrix - n1,n2-matrix which contains:
8
                     absolute value of mean deviation from tT data [K]
8
                   - n1,1-matrix of thermal conductivity values:
   tc matrix
8
                     tc matrix(1,1) = tc + tc step [W/(m K)]
8
                     tc matrix(2,1) = tc + tc step + tc step [W/(m K)]
8
                     . . .
8
                   - n2,1-matrix of thermal borehole resistance values:
   R b matrix
8
                     R b matrix(1,1) = R b + R b step [W/(m K)]
8
                     R b matrix(2,1) = R b + R b step + R b step [W/(m K)]
8
                     . . .
2
% start
ok
% building tc- and R b-matrices
tc matrix = zeros(n1,1);
R b matrix = zeros(n2,1);
mean err matrix = zeros(n1,n2);
for \overline{i} = \overline{1}:n1
    tc matrix(i, 1) = tc;
    tc = tc + tc step;
end
for i = 1:n2
    R b matrix(i, 1) = R b;
   R b = R b + R b step;
end
8 --
% calculating mean-error-matrix
% _____
count = 0;
count_end = n1*n2;
for i = 1:n1
    for j = 1:n2
       tsca = cputime;
       tc = tc matrix(i, 1);
       R_b = R_b_matrix(j,1);
         [Tt] = Num_LineSource_Laplace(r,v_heat_cap,tq_data,tc,r_b, ...
            R b,T 0);
```

```
[delta T t] = Num delta T t(tT data, Tt, comp st s, comp end s);
        mean err matrix(i,j) = sum(delta T t(:,2));
        % abs(mean(delta T t(:,2)))
        count = count + 1;
        tsce = cputime - tsca;
        rem time = tsce * (count end-count);
        hr rem = floor(rem_time/60/60);
        mn_rem = floor((rem_time-hr_rem*60*60)/60);
        sc rem = rem time-hr rem*60*60-mn rem*60;
         [start clock text] = Num LSL clock(start clock);
        TxCount01=[' ',num2str(count),' / ',num2str(count end), ...
            ' calculations, approx. ',num2str(hr_rem),' hr, ', ...
            num2str(mn_rem), ' min and ',num2str(round(sc_rem)), ...
' sec remaining, start: ',start_clock_text];
        disp(TxCount01);clear TxCount01;
    end
end
function [start clock text] = Num LSL clock(start clock)
sc DD = start clock(1,3);sc MM = start clock(1,2);
sc YYYY = start clock(1,1);sc hh = start clock(1,4);
sc mm = start clock(1,5);sc ss = round(start clock(1,6));
if sc DD < 10
    sct DD = ['0', num2str(sc DD)];
else
    sct DD = num2str(sc DD);
end
if sc MM < 10 \pm
   sct MM = ['0',num2str(sc_MM)];
else
    sct MM = num2str(sc MM);
end
sct YYYY = num2str(sc YYYY);
if sc hh < 10
   sct hh = ['0', num2str(sc hh)];
else
    sct hh = num2str(sc hh);
end
if sc mm < 10
    sct mm = ['0', num2str(sc mm)];
else
    sct mm = num2str(sc mm);
end
if sc ss < 10
    sct ss = ['0',num2str(sc ss)];
else
    sct ss = num2str(sc ss);
end
start clock text = [sct DD,'.',sct MM,'.',sct YYYY,' ',sct hh,':', ...
   sct mm,':',sct ss];
```

# Num\_plot\_output.m

```
function [plot_out] = Num_plot_output(tT_data,Tt,delta_T_t,if_num, ...
    plot_output,prec,hourtext,mintext,sectext,x_cont_a,x_cont_b, ...
    y_cont_a,y_cont_b,cont_lines,plot_lang)
% creates Output-Plot and Output-Text
%
% [plot_out] = Num_plot_output(tT_data,Tt,delta_T_t,if_num, ...
%    plot_output,prec,hourtext,mintext,sectext,x_cont_a,x_cont_b, ...
%    y_cont_a,y_cont_b)
```

```
٥،
% Input Arguments:
                - time-temperature n,2-matrix [s -- °C], given
8
  tT data
              - time-temperature n,2-matrix [s -- °C], calculated
  Tt- time-temperature n,2-matrix [s -- °C], calcdelta_T_t- time-delta-temperature n,2-matrix [s -- °C]if_num- grid search mode on = 1, else = 0plot_output- Output Fileprec- precision in digits after dot
  Τt
9
8
8
8
8

computing time hour
computing time minute
computing time second
zoom in X-left contour-plot
zoom in X-right contour-plot

  hourtext
8
  mintext
8
8
   sectext
8
   x cont a
8
   x cont b
  y_cont_a - zoom in Y-down contour-plo
y_cont_b - zoom in Y-up contour-plot
                - zoom in Y-down contour-plot
8
8
8 -----
% Output:
8
  plot out
                - Output value 1
% start
% -----
% Result Plots
% _____
                _____
% T-t-plot
plot out = 1;
fs=12;
                         % font size
ps=10;
                        % point size
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
h b fig = [scrsz(3)/1.2 scrsz(4)/1.2];
pos fig = [abs((scrsz(3)-h_b_fig(1))/2) abs((scrsz(4)-h_b_fig(2))/2)];
figure('Position', [pos_fig(1) pos_fig(2) h_b_fig(1) h_b_fig(2)])
subplot(2,3,1);
plot(Tt(1:end,1)/60/60/24,Tt(1:end,2),'.',tT data(1:end,1)/60/60/24, ...
   tT data(1:end,2),'-');
grid on;
if plot lang == 0
   title('t-T Plot Linienquelle','fontsize',fs);
   hleq1 = legend('Temperatur berechnet [°C]','Temperatur real [°C]');
else
   title('t-T plot line source', 'fontsize', fs);
   hleg1 = legend('temperature calculated [°C]', 'temperature real [°C]');
end
set(hleg1, 'Location', 'NorthEast');
xlabel('t [d]','fontsize',fs);
ylabel('T [°C]','fontsize',fs);
y \min = \min(Tt(:,2));
y_max = max(Tt(:,2))+10;
axis([0 max(Tt(:,1))/60/60/24 round(min(y min))-2 round(max(y max))+2]);
set(gca, 'YTick', -100:2:100)
set(gca, 'fontsize',fs);
e _____.
                      % delta-T-t-plot
8 _____
                _____
subplot(2,3,4);
plot(delta_T_t(1:end, 1)/60/60/24, delta_T_t(1:end, 2));
grid on;
if plot_lang == 0
   title('t-\DeltaT^2 Plot', 'fontsize', fs);
else
```

2

```
title('t-\DeltaT^2 plot', 'fontsize', fs);
end
hleg2 = legend('\DeltaT^2');
set(hleg2,'Location','NorthEast');
xlabel('t [d]','fontsize',fs);
ylabel('\DeltaT^2 [K^2]','fontsize',fs);
set(gca, 'fontsize', fs);
% _____
                     _____
if if num == 1
   ofo
   % contour-plot mean-error-matrix
   subplot(2,3,[2 3 5 6]);
   contourf(plot output(4,2+x cont a:end-x cont b),plot output(5+ ...
      y cont a:end-y cont_b,1),plot_output(5+y_cont_a:end-y_cont_b, ...
      2+x cont a:end-x cont b), cont lines); % contourf(X,Y,Z(Y,X), #lines);
   grid on;
   grid (gca, 'minor');
   if plot lang == 0
      title('Kontur-Plot Summe der kleinsten Quadrate', 'fontsize', fs);
      hleq3 = legend('summierte Temperaturabweichung [K^2]');
      set(hleg3, 'Location', 'SouthEast');
      xlabel('thermischer Bohrlochwiderstand R b [(m
K)/W]','fontsize',fs);
      ylabel('Wärmeleitfähigkeit \lambda [W/(m K)]','fontsize',fs);
   else
      title('contour-plot mean-error-matrix','fontsize',fs);
      hleg3 = legend('sum of temperature deviation [K^2]');
      set(hleg3,'Location','SouthEast');
      xlabel('thermal borehole resistance R b [(m K)/W]','fontsize',fs);
      ylabel('thermal conductivity \lambda [W/(m K)]','fontsize',fs);
   end
   set(gca,'fontsize',fs);
   colorbar('location', 'eastoutside')
   hold on
   plot(plot output(3,2),plot output(3,1),'or','MarkerEdgeColor','k', ...
      'MarkerFaceColor', 'r', 'MarkerSize',ps);
   set(gca, 'fontsize', fs);
                             _____
   § _____
end
%
%
% text output
§ _____
prec calc = ['%10.',num2str(round(prec)),'f'];
Tx01=' ';
Tx02=' ';
if plot lang == 0
   Tx03=['Ergebnisse der numerischen Wärmeleitfähigkeitsberechnung', ...
       (Num LSL): '];
else
   Tx03=['Results of numerical thermal conductivity calculation', ...
       ' (Num LSL): '];
end
Tx05=' ';
if plot_lang == 0
   Tx06=['Berechnungszeit: ',num2str(plot_output(2,1)),' ',hourtext, ...
      ', ',num2str(plot_output(2,2)),' ',mintext,' und ', ...
      num2str(plot_output(2,3),prec_calc),' ',sectext,'.'];
else
```

```
Tx06=['calculation time: ',num2str(plot_output(2,1)),' ',hourtext, ...
        ', ',num2str(plot output(2,2)),' ',mintext,' and ', ...
        num2str(plot output(2,3),prec calc),' ',sectext,'.'];
end
Tx07=' ';
if plot lang == 0
                                                     ', ...
    Tx08=['Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:
       num2str(plot_output(3,1))];
    Tx09=['Thermischer Bohrlochwiderstand [(m K)/W]: ', ...
       num2str(plot output(3,2))];
    if if num == 1
        Tx10=['Summe der kleinsten Quadrate [K^2]:
                                                     ', ...
          num2str(plot output(4,1))];
    else
        Tx10=' ';
    end
else
    Tx08=['thermal conductivity [W/(m K)]: ', ...
       num2str(plot output(3,1))];
    Tx09=['thermal borehole resistance [(m K)/W]: ', ...
       num2str(plot output(3,2))];
    if if num == 1
        Tx10=['least square sum [K^2]:
                                                      ', ...
           num2str(plot output(4,1))];
    else
        Tx10=' ';
    end
end
Tx11=' ';
disp(Tx01);disp(Tx02);disp(Tx03);disp(Tx04);disp(Tx05);disp(Tx06);
disp(Tx07);disp(Tx08);disp(Tx09);disp(Tx10);disp(Tx11);
clear Tx01 Tx02 Tx03 Tx04 Tx05 Tx06 Tx07 Tx08 Tx09 Tx10 Tx11;
% -
                                                             _____
```