

**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



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

Dekan:

1. Berichtstatter:

2. Berichtstatter:

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.

Inhaltsverzeichnis

Anhangsverzeichnis.....	xi
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Symbol- und Gleichungsverzeichnis	xix
Kurzfassung	xxiii
Abstract.....	xxv
Einleitung.....	1
Abschnitt I der Dissertation.....	5
Einleitung und Überblick Abschnitt I	7
I-1 Übersicht über das Forschungsprojekt	11
I-2. Erfassung der Untergrundeigenschaften	13
I-2.1 Geologie und Hydrogeologie	13
I-2.2 Beschreibung der thermischen Eigenschaften nach VDI 4640.....	14
I-2.2.1 Die Gesteinswärmeleitfähigkeit.....	14
I-2.2.2 Die ungestörte Bodentemperatur	16
I-2.3 Die Bestimmung der Untergrundparameter mit dem Thermal Response Test	16
I-2.3.1 Ermittlung der Gesteinswärmeleitfähigkeit	17
I-2.3.2 Ermittlung der ungestörten Bodentemperatur im Zuge eines TRT.....	18
I-2.3.3 Ablauf der Messungen	18
I-2.4 Neue Methoden zur tiefenaufgelösten Bestimmung der Untergrundparameter	19
I-2.4.1 Faseroptische Temperaturmessmethode.....	21
I-2.4.1.1 Ermittlung der ungestörten Bodentemperatur im Zuge eines eTRT	22
I-2.4.1.2 Enhanced Thermal Response Test (eTRT)	24
I-2.4.1.2.1 Ablauf der Messungen	24
I-2.4.1.2.2 Ermittlung der tiefenabhängigen Wärmeleitfähigkeit mit dem eTRT ...	25
I-2.4.2 in-situ Grundwasserströmungsmessungen	29
I-2.5 Vergleich der Ergebnisse von TRT und eTRT.....	31
I-2.6 Vergleich der eTRT-Ergebnisse mit den Grundwasserströmungsmessungen	32
I-2.7 Beeinflussung der Untergrundwärmeleitfähigkeit durch Grundwasserfluss	33

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
I-5. Zusammenfassung der Ergebnisse von Abschnitt I	67
Abschnitt II der Dissertation	71
Einleitung und Überblick Abschnitt II	73
II-1. Methodik	75
II-1.1 DTS-Messverfahren.....	75
II-1.1.1 Physikalische Grundlagen.....	75
II-1.1.2 Messdurchführung	76
II-1.2 Der enhanced Thermal Response Test (eTRT)	77
II-1.2.1 Messaufbau und -durchführung	77
II-1.2.2 Auswertung der Ergebnisse	78
II-1.2.3 Auswertung des Relaxationsverhaltens	80
II-1.2.4 Peclet-Zahl-Analyse.....	80
II-2. Vergleich zwischen LWL-Messungen und TRTs	83
II-2.1 Messdurchführung.....	83
II-2.2 Ergebnisse der Messungen	83
II-2.3 Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten	84

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: Rohdaten 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-DVD. 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-Einleitung:

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 Sondenordnung 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
------------	---	-------

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	Modellnamen 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 Temperaturentstreuung.....	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

Tab. II-3.16	Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_07-1 bis 5 am rechten, oberen Glasfaserkabel	S. 136
Tab. II-3.17	Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse, $l = r_0$	S. 138
Tab. II-3.18	Berechnete Fließgeschwindigkeiten über die Péclet-Zahl-Analyse, l nach FOWLER 2000	S. 138
Tab. II-3.19	Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c und eTRT_04-3.1c.....	S. 139
Tab. II-3.20	Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung der Kontrollmodellierungen.....	S. 143
Tab. II-3.21	Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c4 bis c12.....	S. 146

Kapitel II-4:

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

Symbol- und Gleichungsverzeichnis

Abschnitt I

Gleichung I-2.1 bis I-2.5: S. 17-18

T_f	mittlere Fluidtemperatur [°C]
\dot{Q}	Heizleistung [W]
λ	Wärmeleitfähigkeit Untergrund [W/(m K)]
H	Tiefe der EWS [m]
t	Zeit [s]
α	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]
ρc_p	volumetrische Wärmekapazität Untergrund [J/(m ³ K)]
r_0	Bohrlochradius [m]
γ	Euler-Mascheroni-Konstante (0,5772...)
R_b	thermischer Bohrlochwiderstand [(m K)/W]
T_s	Temperatur ungestörter Untergrund [°C]

Gleichung I-3.1: S. 40

\dot{Q}	Wärmeleistung [W]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
Δx	Abstand zwischen x_1 und x_2 [m]
A	wärmedurchströmte Fläche [m ²]
ΔT	Temperaturdifferenz am Punkt x_1 und x_2

Gleichung I-4.1 bis I-4.2: S. 49-50

v_a	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
v_f	Filtergeschwindigkeit [m/s]
ϕ	Porosität [-]
\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
A	Grundwasserquerschnittsfläche [m ²]
R	Retardationsfaktor [-]
$\rho_s c_s$	volumetrische Wärmekapazität Gestein [J/(m ³ K)]
$\rho_f c_f$	volumetrische Wärmekapazität Fluid [J/(m ³ K)]
l	Länge der Kältefahne [m]
t	Zeit [s]
F_L	Wärmeentnahmeleistung pro Länge [W/m]
D_t	transversaler Wärmedispersionskoeffizient [m ² /s]
ΔT_x	Differenz zur Hintergrundtemperatur [K]
λ_{total}	Wärmeleitfähigkeit Gestein & Fluid [W/(m K)]
α_t	transversale Dispersivität [m]

Abschnitt II

Gleichung 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 [-]
t_i	Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]
$\overline{\ln(t)}$	arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte im Auswertebereich [-]
T_i	Temperatur i der Glasfaser [°C]
\bar{T}	arithmetisches Mittel der Glasfaser-Temperaturwerte [°C]
r_0	Bohrlochradius [m]
α	Temperaturleitfähigkeit ($\alpha = \lambda/(\rho c_p)$) [m ² /s]
ρc_p	volumetrische Wärmekapazität [J/(m ³ K)]
r	Radius der Temperaturfront [m]
t	Dauer der konstanten Erhitzung [s]
ϕ	Porosität [-]
t_h	Dauer des Aufheizvorgangs [s]
$\overline{\ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right)}$	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 [-]
λ_{kond}	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein [W/(m K)]
λ_{total}	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein + advektiver Anteil durch Grundwasserfluss [W/(m K)]
l	charakteristische Länge [m]
v	Fließgeschwindigkeit Grundwasser [m/s]
ρ	Dichte Grundwasser [kg/m ³]
c_p	spezifische Wärmekapazität Grundwasser [J/(kg K)]

Gleichung II-2.1: S. 84

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

Gleichung II-3.1 bis II-3.10: S. 87-91

S_0	spezifischer Speicherkoeffizient (Kompressibilität) [m^{-1}]
h	Hydraulic Head [m]
t	Zeit [s]
q_i^f	Vektor der Darcy Geschwindigkeit des Fluids [m/s]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
Q_ρ	Quellen-/Senkenfunktion des Fluids für Massen (Q_C), und Wärmetransport (Q_T) (DIERSCH 2005)
Q_{EB}	Term der erweiterten Boussinesq-Approximation (DIERSCH 2005)
ϕ	Porosität [-]
ρ^f	Dichte des Fluids [kg/m^3]
ρ^s	Dichte der Festphase [kg/m^3]
c^f	spezifische Wärmekapazität des Fluids [$J/(kg K)$]
c^s	spezifische Wärmekapazität der Festphase [$J/(kg K)$]
T	Temperatur [$^{\circ}C$]
T_0	Referenztemperatur [$^{\circ}C$]
λ_{ij}	Tensor hydrodynamischer Thermodispersion [$W/(m K)$]
K_{ij}	Tensor hydraulischer Konduktivität [m/s]
k_{ij}	Tensor hydraulischer Permeabilität [m^2]
e_j	Gravitations-Einheitsvektor ($e_j = -g/g$) [-]
g	Gravitationsbeschleunigung [m/s^2]
f_μ	konstitutive Viskositäts-Verhältnisfunktion [-]
μ^f	dynamische Viskosität des Fluids [Ns/m^2]
h_i^R	fester Randbedingungswert für den Hydraulic Head [m]
q_{n_h}	normaler Darcy Fluss des Fluids [m/d]
q_h^R	fester Randbedingungswert für den Darcy Fluss in oder aus dem Modell [m/d]
Φ_h	Fluid-Transfer-Koeffizient [d^{-1}]
h_2^R	fester Randbedingungswert für den Hydraulic Head [m]
Q_ρ^w	Quellenfunktion [m^3/d]
Q_1^w	fester Randbedingungswert für den Wasserzu- oder -abstrom [m^3/d]
T_1^R	fester Randbedingungswert für die Temperatur [$^{\circ}C$]
q_{n_T}	normaler Wärmefluss [$J/m^2/d$]
q_T^R	fester Randbedingungswert für den Wärmefluss in oder aus dem Modell [$J/m^2/d$]
Φ_T	Wärme-Transfer-Koeffizient [$J/m^2/K/d$]
T_3^R	fester Randbedingungswert für die Temperatur [$^{\circ}C$]
Q_T^w	Wärmequellenfunktion [J/d]
Q_1^w	fester Randbedingungswert für den Wärmezu- oder -abstrom [J/d]
P_{total}	Gesamtparameter (λ oder ρc_p) [$W/(m K)$ oder $J/(m^3 K)$]
P_{fluid}	Fluidparameter (λ oder ρc_p) [$W/(m K)$ oder $J/(m^3 K)$]
P_{solid}	Gesteinsparameter (λ oder ρc_p) [$W/(m K)$ oder $J/(m^3 K)$]
ϕ	Porosität [-]

Gleichung II-3.11 bis II-3.13: S. 104

V	Durchflussrate [m ³ /s]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
F	durchströmte Fläche [m ²]
i	hydraulischer Gradient [-]
h	Druckhöhenunterschied [m]
l	Länge der Fließstrecke [m]
v_f	Filtergeschwindigkeit [m/s]

Gleichung II-4.1 bis II-4.7: S. 150-156

T^q	Temperatur [K]
r	Radius [m]
t	Zeit [s]
q	Wärmefluss [W/m]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
r_b	Bohrlochradius [m]
α	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]
$J_0(u)$, $J_1(u)$	Bessel Funktion erster Ordnung
$Y_0(u)$, $Y_1(u)$	Bessel-Funktion zweiter Ordnung
$K_\nu(x)$	modifizierte Bessel-, bzw. MacDonald-Funktion
$\Gamma(k)$	Gamma-Funktion, $\Gamma(k)$ entspricht $(k-1)!$ (ABRAMOWITZ & STEGUN 1964)
T_f	Temperatur Fluid [K]
q_k	konstanter Wärmefluss [W/m]
γ	Euler-Mascheroni-Konstante [-]
R_b	thermischer Bohrlochwiderstand [(m K)/W]
T_s	Temperatur ungestörter Untergrund [°C]
\dot{Q}_L	Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]
t_h	Dauer des Aufheizvorgangs [s]
T_b	ungestörte Temperatur der Glasfaser [°C]
Q_{total}	eingebrachte Gesamtwärmemenge [J/m]
t_h	Dauer des Aufheizvorgangs [s]

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 tatsächlichen 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 Wärmeeintragungsschwankungen 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 Entnahmehrinnen gefördert und nach der thermischen Nutzung durch einen zweiten Brunnen wieder in den Untergrund reinfiltiert 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.

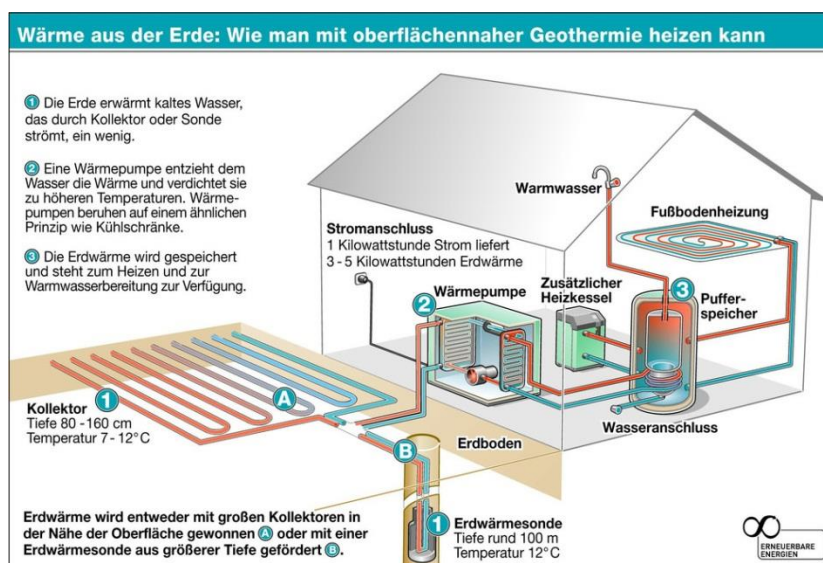


Abbildung I-0.1 Die Nutzung oberflächennaher Geothermie (Agentur für Erneuerbare Energie).

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 Wärmegegewinnung, 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

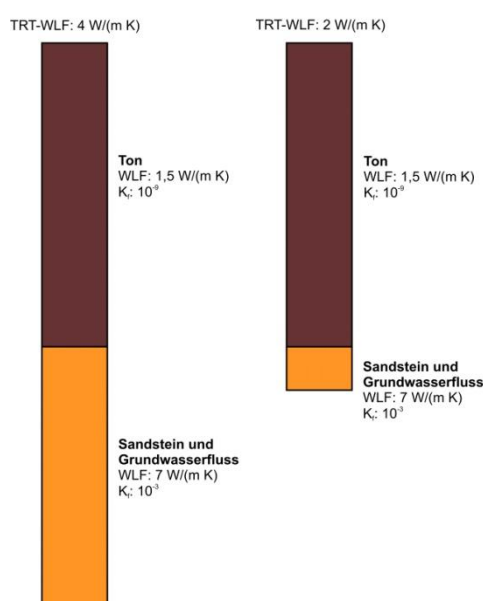
miteinander verbundenen sind. Diese Rohre werden in die Bohrlöcher abgelassen und dann mit einer Spezial-Zement-Mischung im Bohrloch verpresst. Die Verpressung ermöglicht eine gute thermische Anbindung der Rohre an den umgebenden Untergrund und ist auch für die Abdichtung der Bohrungen nötig. Sie verhindert 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 Nutzungsdauer 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 & HAENEL 2002, CERMAK & RYBACH 1979, HUBER & PAHUD 1999b, 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 man 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 Grundwasserfließigenschaften, 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	In-Situ Grundwasserfließgeschwindigkeitsmessung (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
20.06.-23.06.2008	Durchführung des ersten eTRT (igem)
29.08.-01.09.2008	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).

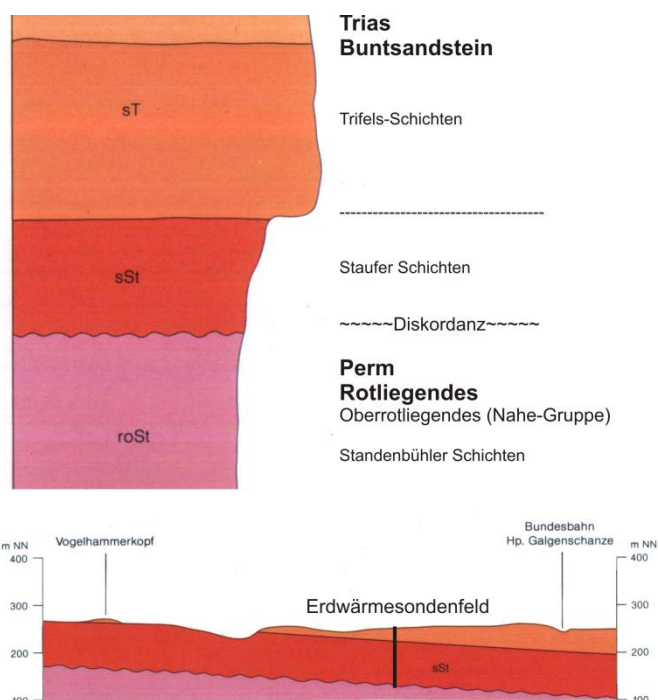


Abbildung I-2.1 Profil aus der geologischen Karte (GK25) von Rheinland-Pfalz, Blatt 6512 Kaiserslautern mit Legende und Profilschnitt (NW-SE). Die schwarze Linie im Profilschnitt zeigt die ungefähre Position und Tiefe der Erdwärmesonden im Untersuchungsgebiet.

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 Stauer 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^{-4} und 10^{-6} 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).

Abbildung I-2.2 Schichtenprofil der Erdwärmesondenbohrungen in Kaiserslautern (Terra Therm GmbH).

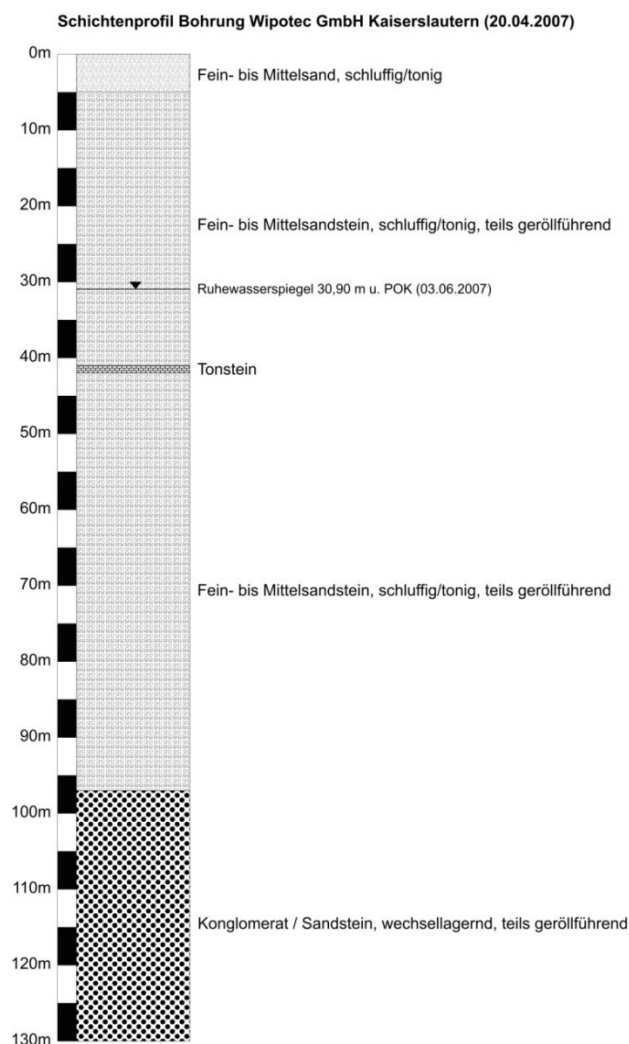


Tabelle I-2.1 Bandbreite der Wärmeleitfähigkeit und volumetrischen Wärmekapazität, sowie der theoretischen Wärmeentzugsleistung für Sandstein nach VDI 4640, Blatt 1, Wärmeentzugsleistung nach VDI 4640, Blatt 2.

	Sandstein (0-130 m)
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	1,5 – 5,1 (2,3)
Vol. Wärmekapazität [MJ/(m³ K)]	1,6 – 2,8
Wärmeentzugsleistung [W/m]	55 – 80

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 Thermal Response Test (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.

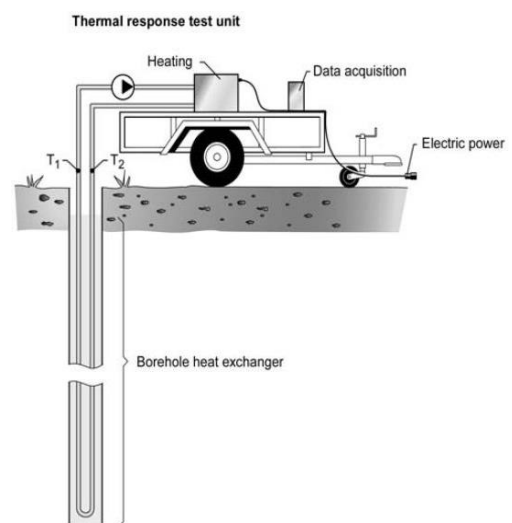


Abbildung I-2.3 Aufbauschema eines Thermal Response Test (GEHLIN 2002).

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):

$$T_f = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right) - \gamma \right] + \frac{\dot{Q}}{H} R_b + T_s = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left[\frac{\dot{Q}}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2}\right) - \gamma \right] + R_b \right) + T_s \right] \quad (I-2.1)$$

T_f	mittlere Fluidtemperatur [°C]
\dot{Q}	Heizleistung [W]
λ	Wärmeleitfähigkeit Untergrund [W/(m K)]
H	Tiefe der EWS, bzw. Länge des Messabschnitts bei eTRTs [m]
t	Zeit [s]
α	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s] mit $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$
ρc_p	volumetrische Wärmekapazität Untergrund [J/(m ³ K)]
r_0	Bohrlochradius [m]
γ	Euler-Mascheroni-Konstante (0,5772...)
R_b	thermischer Bohrlochwiderstand [(K m)/W]
T_s	Temperatur ungestörter Untergrund [°C]

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

$$T_f = m \cdot \ln(t) + b \quad (I-2.2)$$

Hieraus folgt

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

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).

$$t > \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (I-2.5)$$

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 zusammenschaltet (Abb. I-2.4). Die in Reihe geschalteten Kabel bestehen aus jeweils vier Glasfasern und vier Kupferlitzen (Abb. I-2.5).

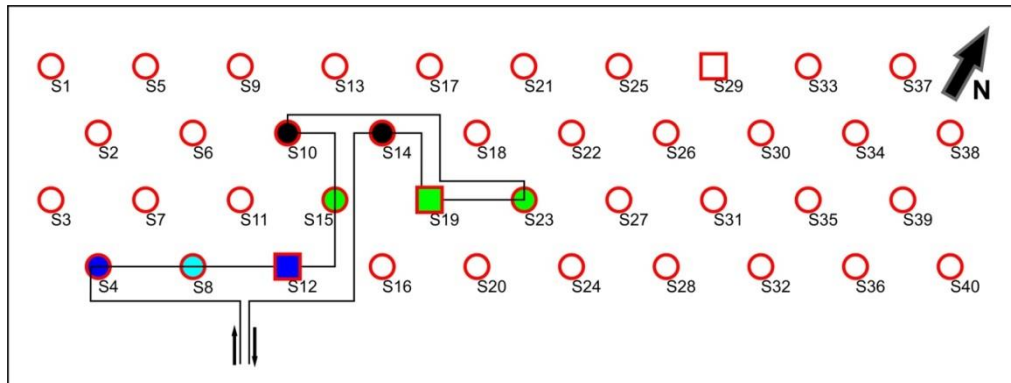


Abbildung I-2.4 Erdwärmesondenfeld der Firma Wipotec mit 40 eingebrachten Doppel-U-Sonden.

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.

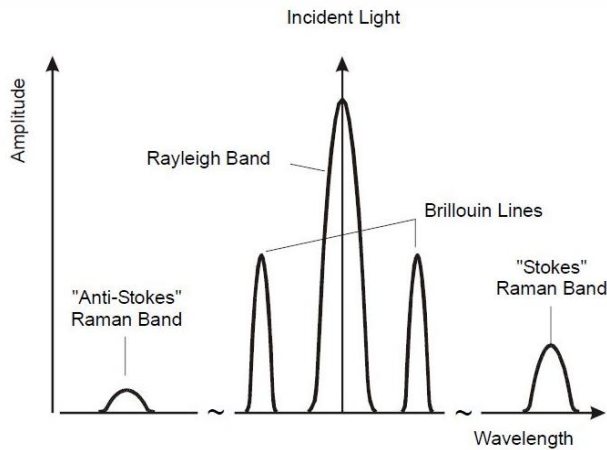


Abbildung I-2.5 Aufteilung der optischen Rückstreuung (ERBAŞ et al. 1999) und Abbildung eines Glasfaser-hybridkabels. Die grüne Kabelhülle beinhaltet die vier Glasfasern, die unteren Kabelhüllen die vier Kupferlitzen.

I-2.4.1.1 Ermittlung der ungestörten Bodentemperatur im Zuge eines eTRT

Die ungestörte Bodentemperatur T_0 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_0 wurde im Vorfeld des eTRT orts aufgelöst 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_0 gebildet. Aus diesen orts aufgelösten, ungestörten Bodentemperaturen ließ sich eine über die Sonde gemittelte, ungestörte Bodentemperatur $T_{0\text{mean}}$ bestimmen (Tab. I-2.4). Die Maximalwerte der in jedem Tiefenabschnitt der jeweiligen Sonde erhaltenen Standardabweichungen von T_0 sind ebenfalls in Tabelle I-2.4 eingetragen. Die durchschnittliche Lufttemperatur am 29.08.2008 betrug ca. $15,8^\circ\text{C}$, die Lufttemperatur zwischen 10:00 und 13:00h ca. $18,5^\circ\text{C}$ (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 $T_{0\text{mean}}$.

	S4	S8	S10	S12
Max. Standardabweichung von T_0 [$^\circ\text{C}$]	0,07	0,07	0,09	0,07
Durchschnittliche, ungestörte Bodentemperatur $T_{0\text{mean}}$ [$^\circ\text{C}$]	11,89	11,92	11,23	11,65

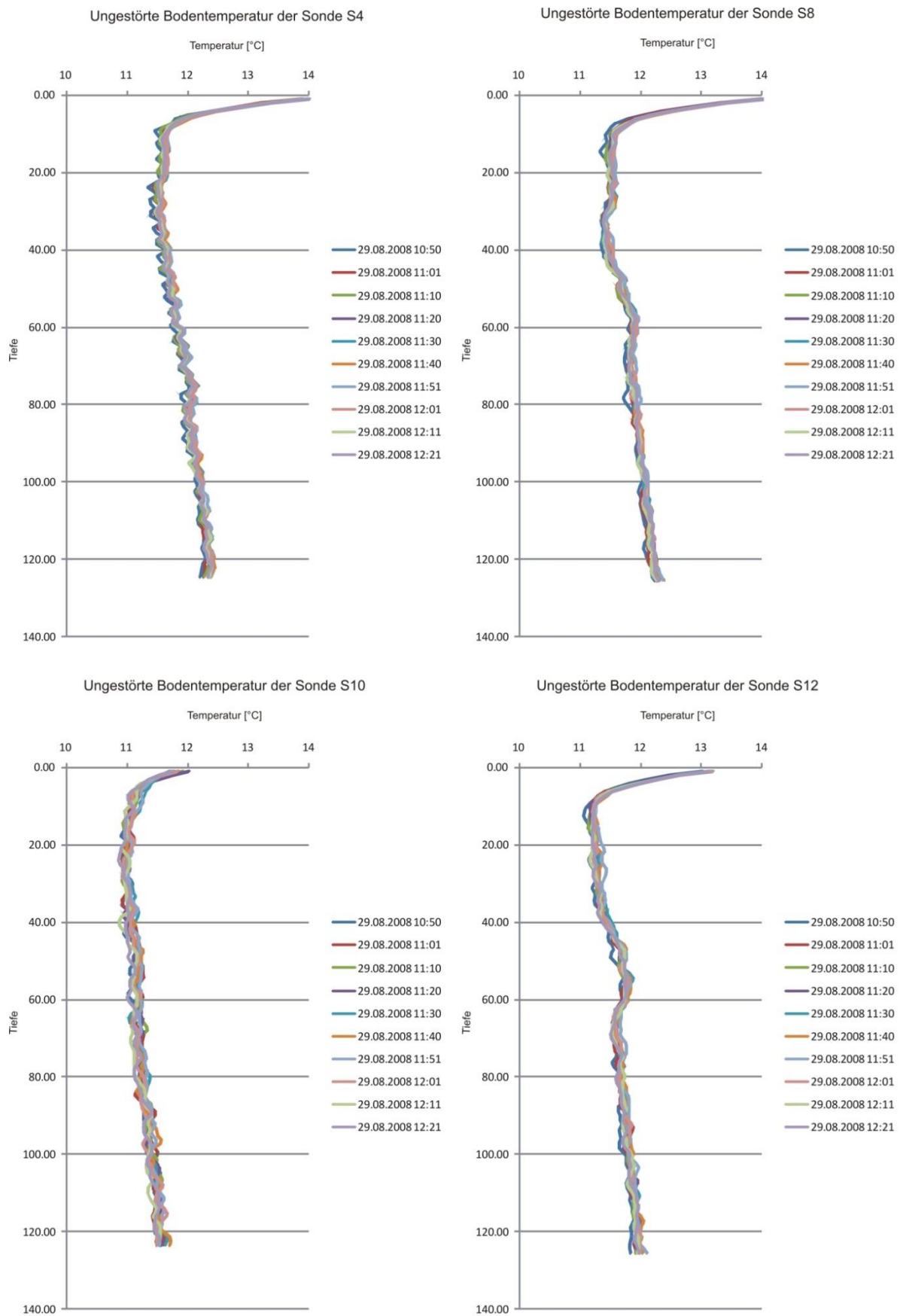


Abbildung I-2.6 Tiefenprofil der ungestörten Bodentemperatur der Sonden S4, S8, S10 & S12 aufgelöst in 10 Zeitschritten.

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).

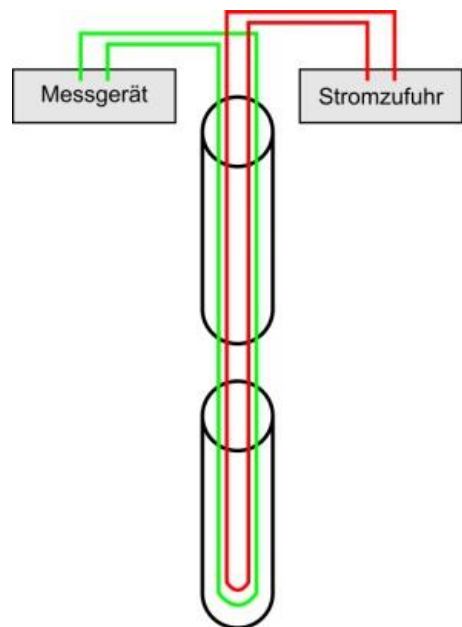


Abbildung I-2.7 Messaufbau des eTRT.

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 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.

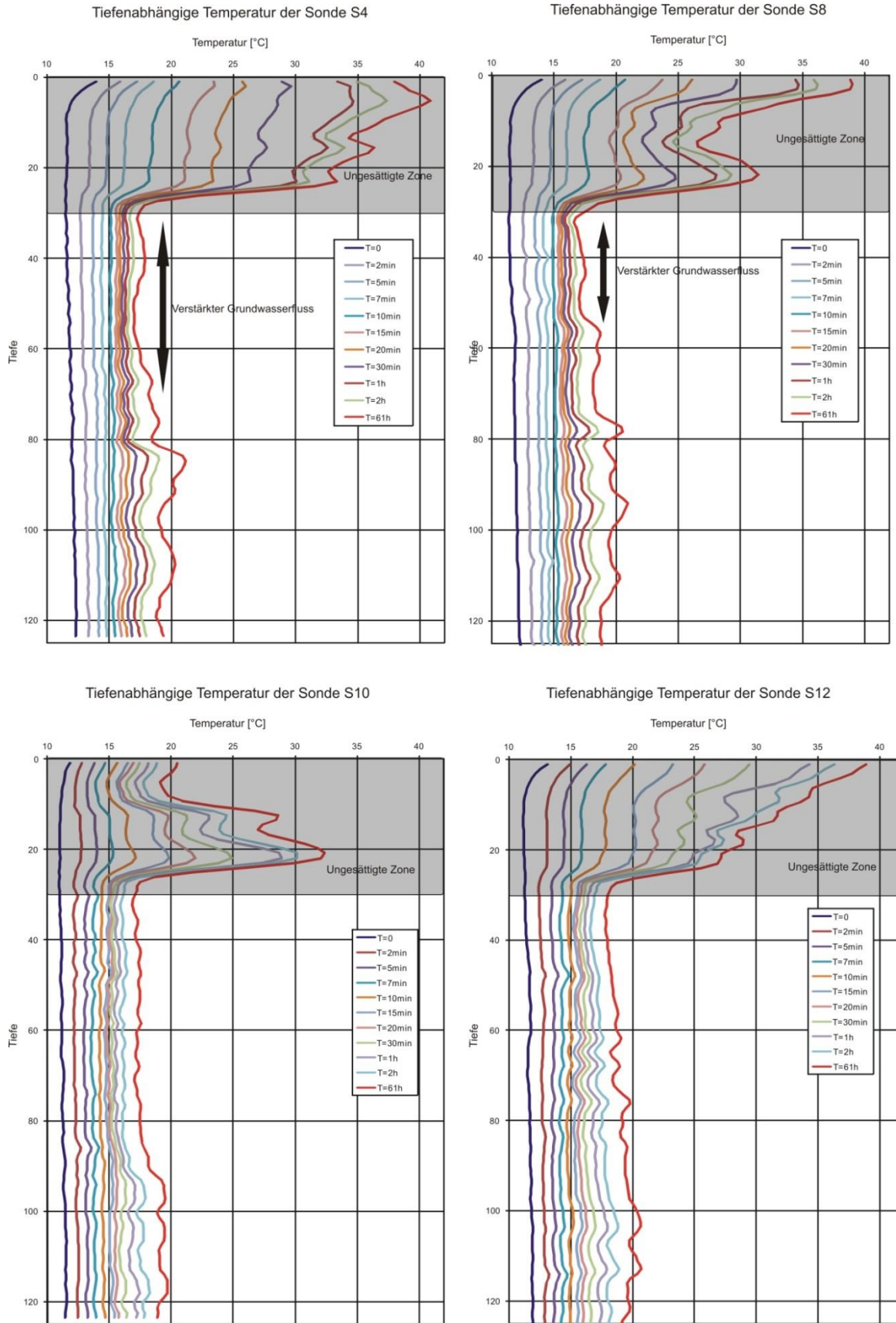


Abbildung I-2.8 Tiefenabhängige, absolute Temperaturen der Sonden S4, S8, S10 & S12.

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.

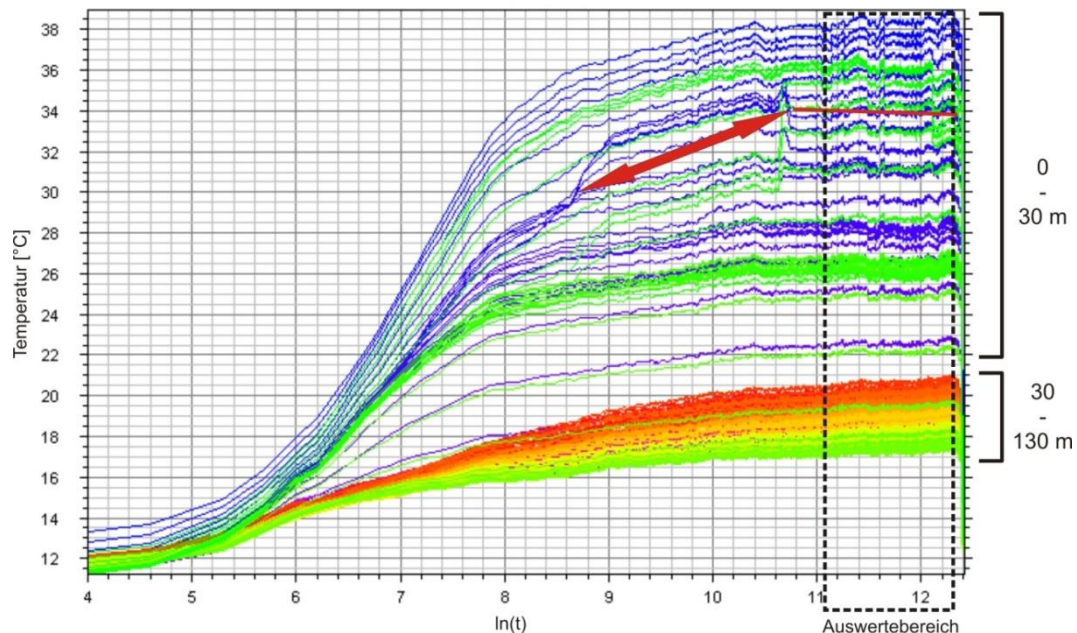


Abbildung I-2.9 Temperaturverlauf [°C] der einzelnen Tiefenabschnitte über die logarithmische Zeit (Abbildung GTC Kappelmeyer). Die Farbcodierung beschreibt die unterschiedlichen Messpunkte des Kabels. Der Farbverlauf ist von blau (entspricht dem Kabelanfang) über gelb und rot zu grün (entspricht dem 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.

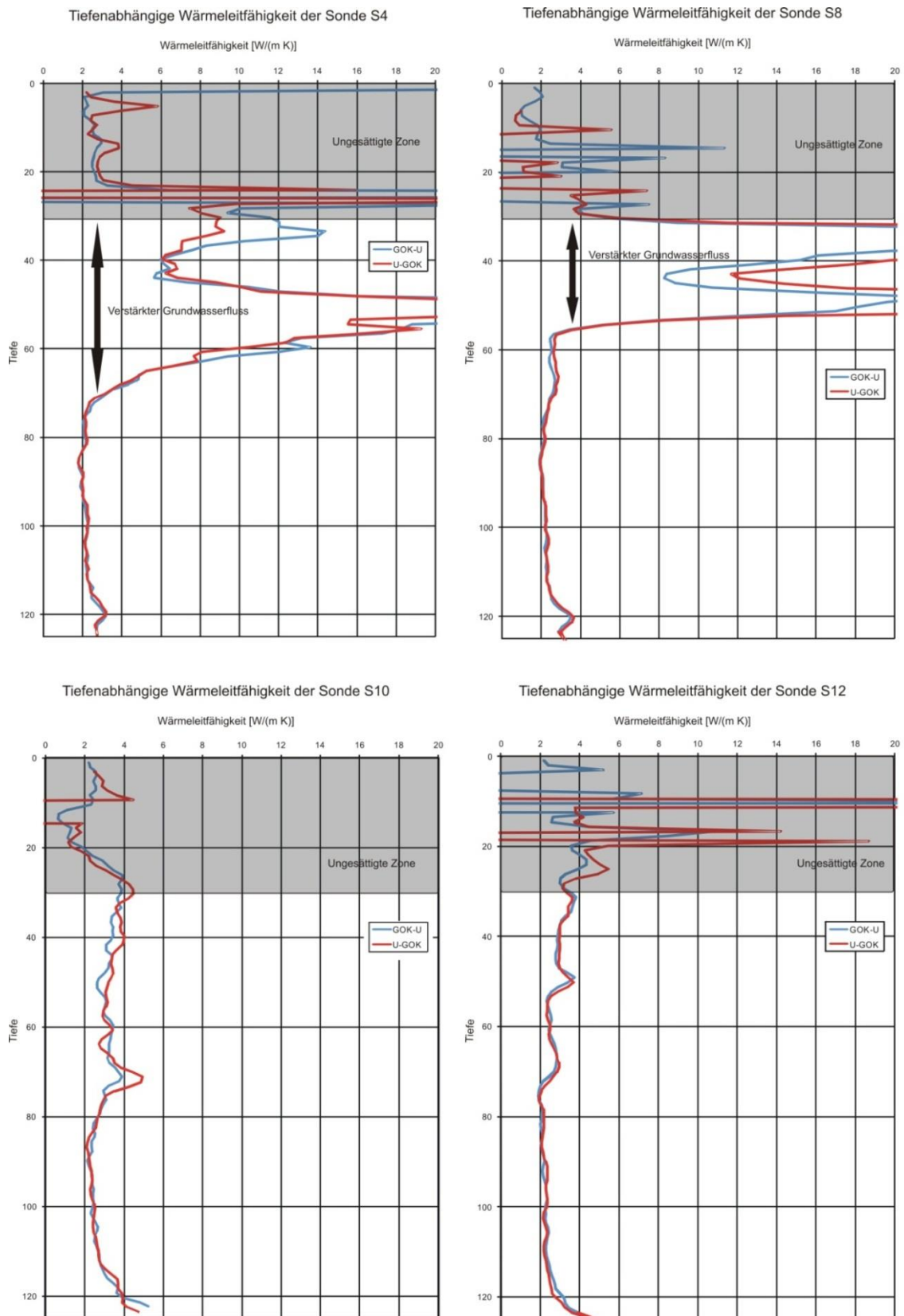


Abbildung I-2.10 Tiefenabhängige Wärmeleitfähigkeiten der Sonden S4, S8, S10 & S12.

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_f -Wert) des Gesteins ermittelt werden. Sind beide Werte bekannt (k_f -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 Transportgeschwindigkeit 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).

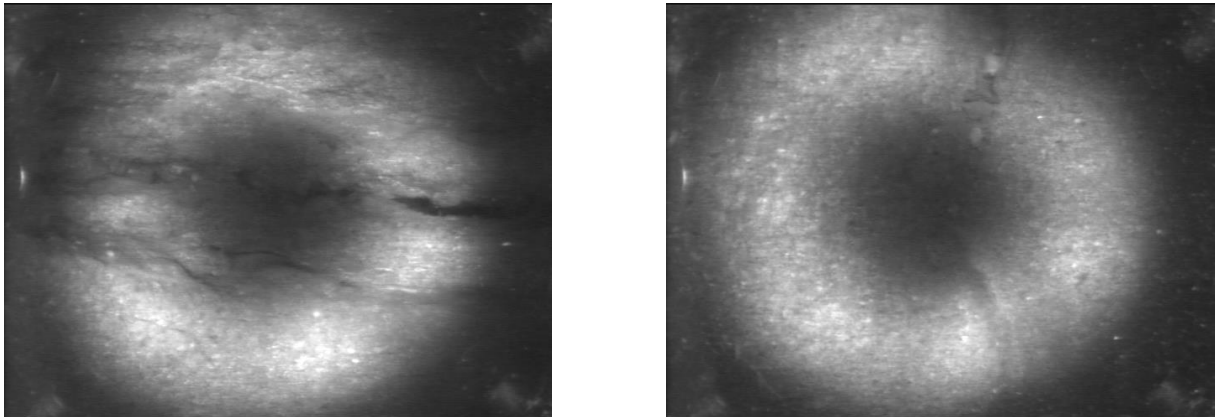


Abbildung I-2.11 Geklüfteter (links) und ungeklüfteter (rechts) Bereich im Bohrloch der Sonde S12. Die Aufnahmen wurden jeweils in einer Tiefe von 50,52 m (links) und 47,40 m (rechts) gemacht.

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 47m generell Richtung N	
Fließgeschwindigkeit Formation:	$\sim 2,4 \cdot 10^{-6}$ m/s	
Fließgeschwindigkeit Klüfte:	$\sim 2,7 \cdot 10^{-5}$ m/s – $1,4 \cdot 10^{-4}$ 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 m generell Richtung N	
Fließgeschwindigkeit Formation:	$\sim 2,8 \cdot 10^{-6}$ m/s	
Fließgeschwindigkeit Klüfte:	$\sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ 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 Formation:	$\sim 2,4 \cdot 10^{-6}$ m/s	
Fließgeschwindigkeit Klüfte:	$\sim 4,7 \cdot 10^{-5}$ 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 obersten 30 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 des Untergrundes.

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 $2,8 \cdot 10^{-6}$ m/s), während die Fließgeschwindigkeiten der geklüfteten Bereiche je nach Kluftöffnungsweite und generellem Fließverhalten stärker variieren (meist $2,7 \cdot 10^{-5}$ bis $1,4 \cdot 10^{-4}$ m/s, in einem Fall bis $6 \cdot 10^{-3}$ 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. $6 \cdot 10^{-3}$ 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 $\geq 7 \text{ W/(M K)}$) 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.

Bohrung S12
Darstellung der Untersuchungsergebnisse im Profil der Bohrung

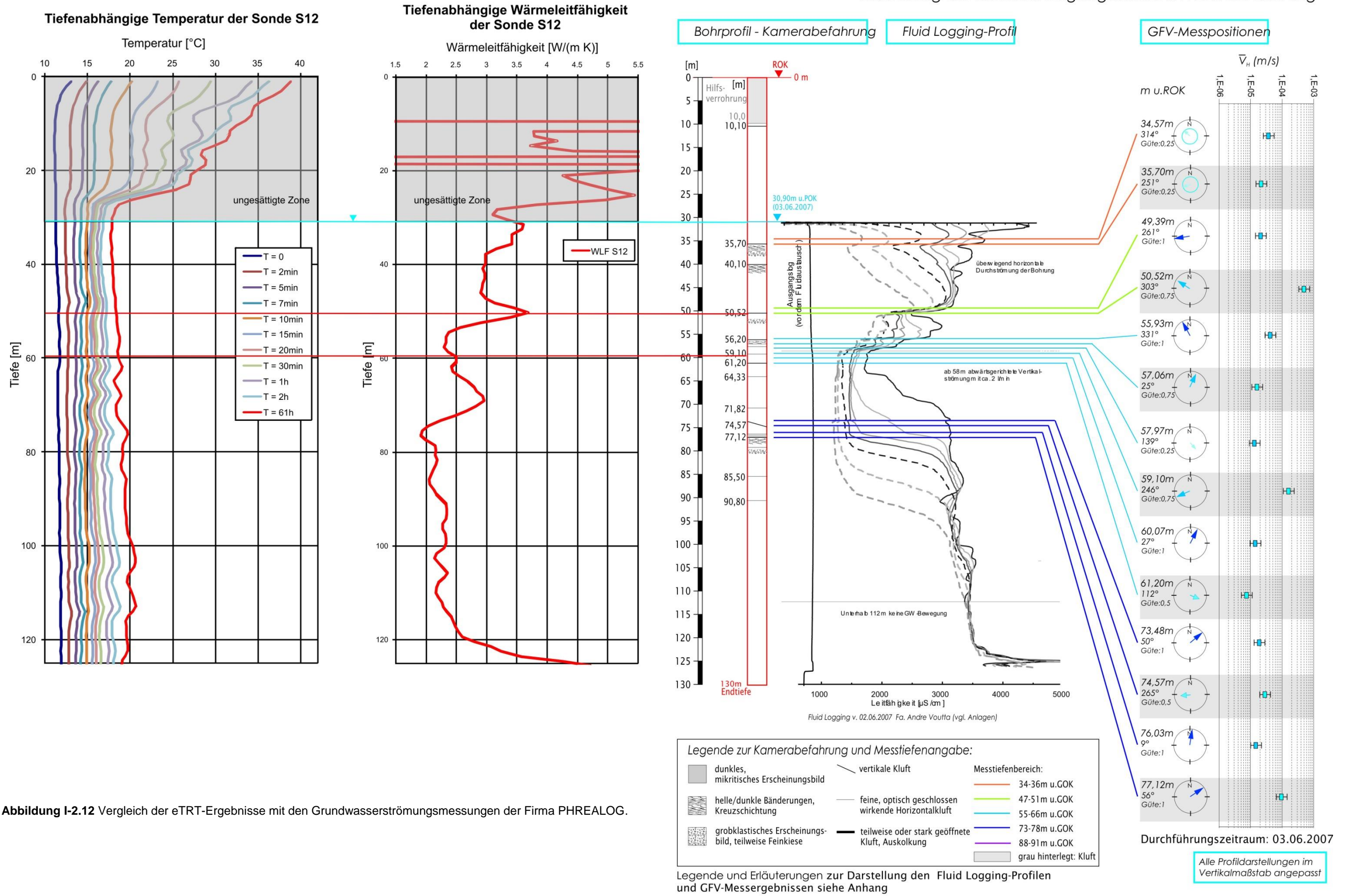


Abbildung I-2.12 Vergleich der eTRT-Ergebnisse mit den Grundwasserströmungsmessungen der Firma PHREALOG.

Legende und Erläuterungen zur Darstellung den Fluid Logging-Profilen und GFV-Messergebnissen siehe Anhang

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 diene 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	x		x					
Eingeschaltet am 06.07.2009 08:00h	x		x					
Permanent eingeschaltet				x		x	x	

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.

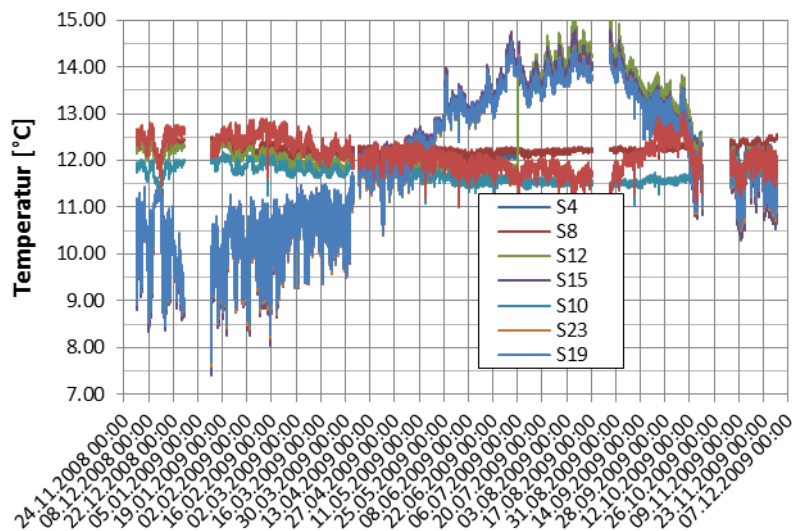


Abbildung I-3.1 Jahresuntergrundtemperaturverlauf aller Sonden vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

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.

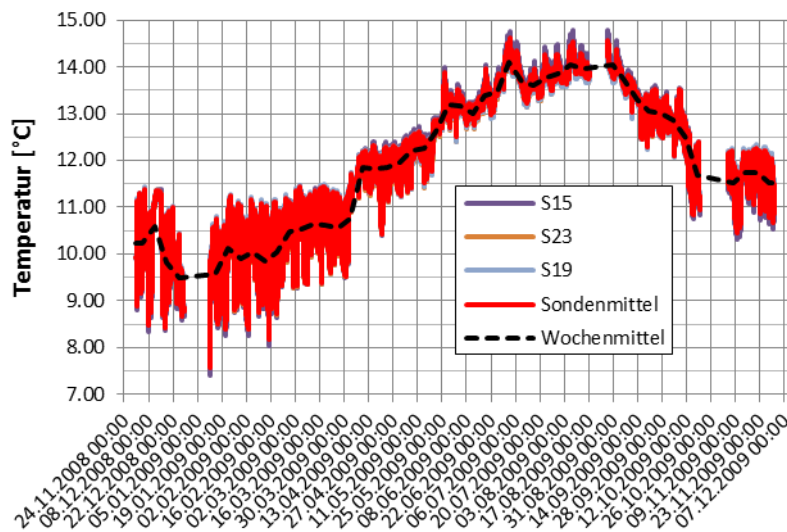


Abbildung I-3.2 Jahresuntergrundtemperaturverlauf der Sonden in Gebrauch vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

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.

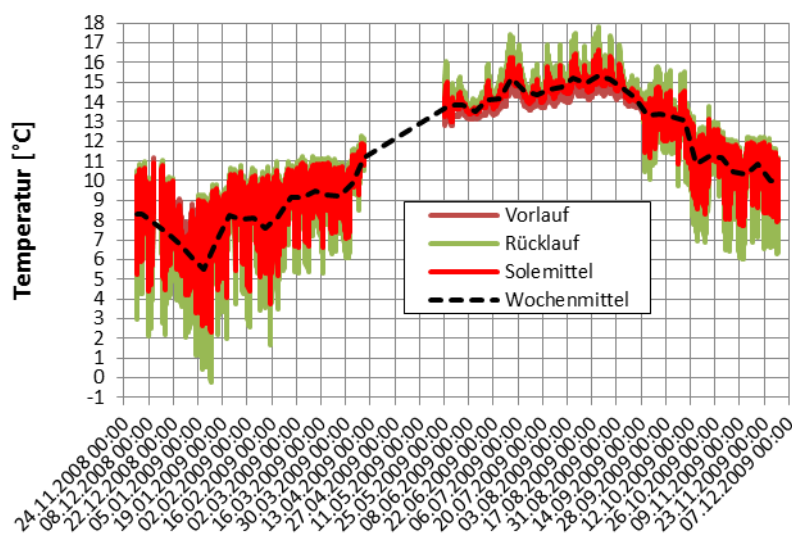


Abbildung I-3.3 Jahressoletemperaturverlauf gemessen am Vor- und Rücklauf des Sondenfeldes vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

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).

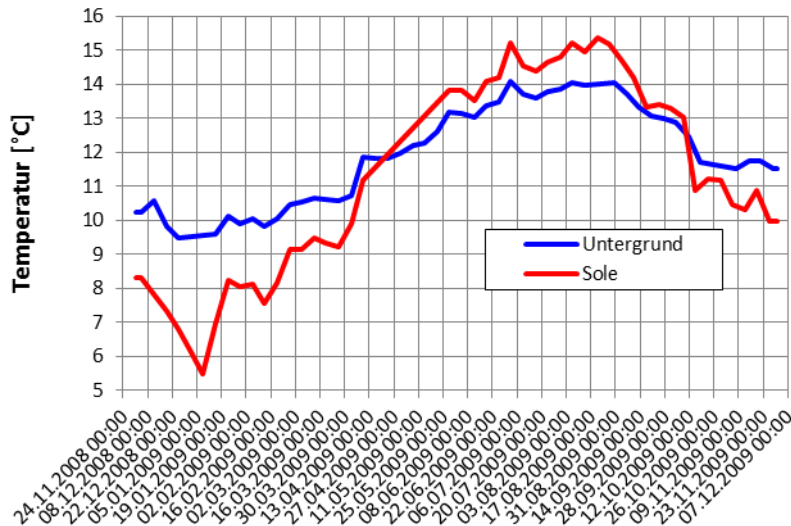


Abbildung I-3.4 Vergleich der Wochenmittel von Jahresuntergrund- und Jahressoletemperatur vom 01.12.2008 bis zum 30.11.2009.

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

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{I-3.1})$$

\dot{Q}	Wärmeleistung [W]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
Δx	Abstand zwischen x_1 und x_2 [m]
A	wärmedurchströmte Fläche [m ²]
ΔT	Temperaturdifferenz am Punkt x_1 und x_2

Bei einer konstanten Wärmeleistung \dot{Q} und einer konstanten Wärmeleitfähigkeit λ des durchflossenen Gesteins ist die Temperatur T_2 direkt abhängig von der Entfernung Δx zwischen der Rohrwand x_1 der Erdwärmesonde und dem Glasfaserkabel x_2 (Abb. I-3.5). Vergrößert sich die Entfernung Δx zwischen Rohrwand und Glasfaserkabel, so erhöht sich in gleichem Maße die Temperaturdifferenz ΔT . Dies führt zu einer im Vergleich zu T_1 (Sondenrohrwand) geringeren Temperatur T_2 (Glasfaserkabel) bei vergrößertem Abstand zwischen x_1 (Sondenrohr) und x_2 (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^{-1} 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).

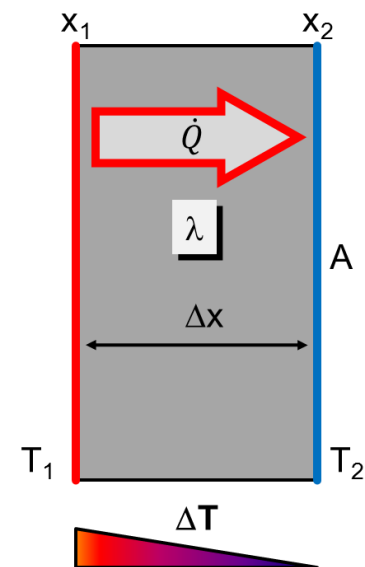


Abbildung I-3.5 Skizze eines wärmedurchströmten Körpers.

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 Füllmaterials 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.

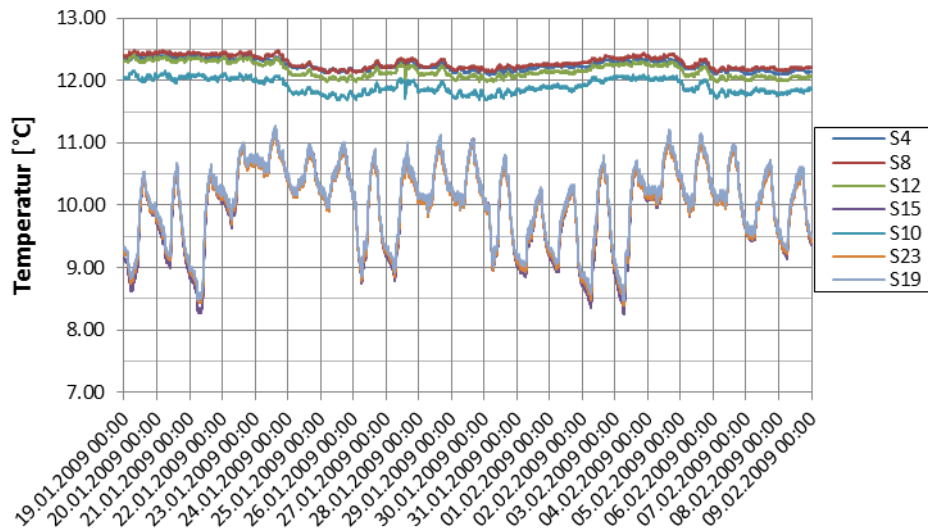


Abbildung I-3.6 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden während der Heizphase vom 19.01.2009 bis zum 09.02.2009.

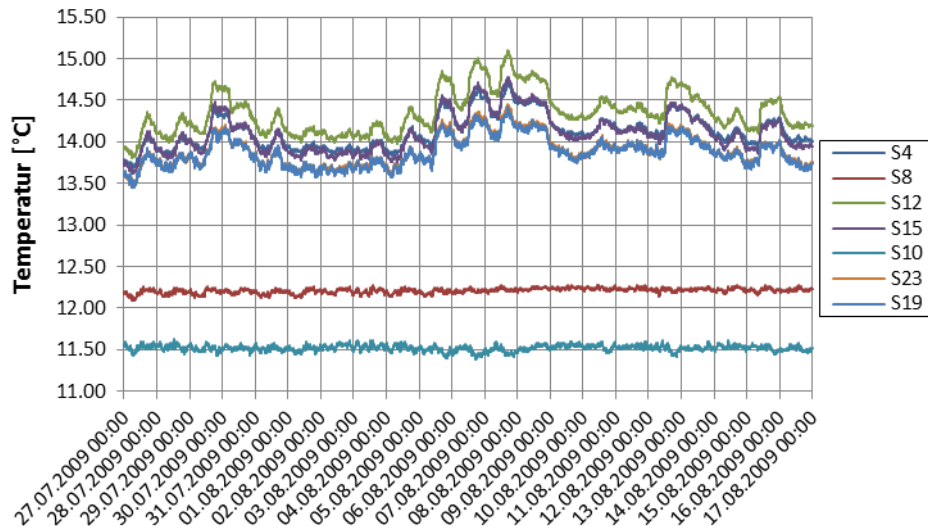


Abbildung I-3.7 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden während der Kühlphase vom 27.07.2009 bis zum 17.08.2009.

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.

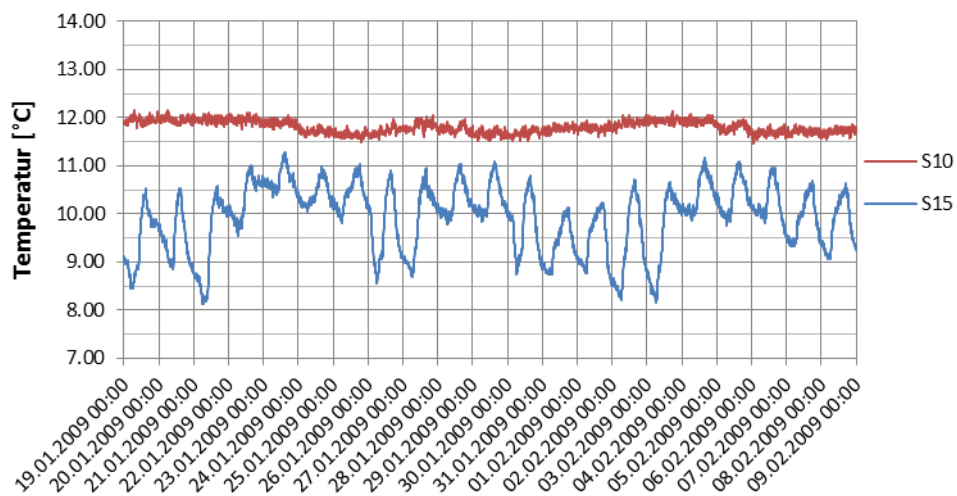


Abbildung I-3.8 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S10 und S15 in einer Tiefe von 50 Metern während der Heizphase vom 19.01.2009 bis zum 09.02.2009.

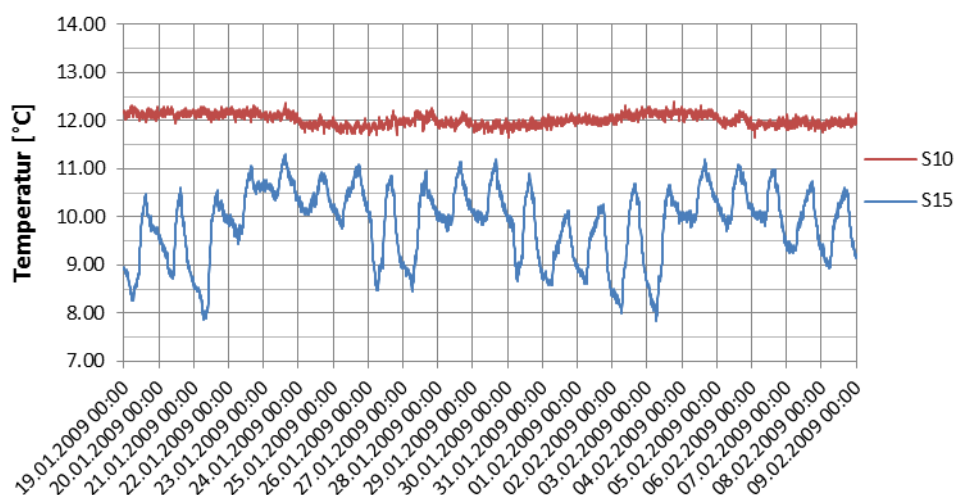


Abbildung I-3.9 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S10 und S15 in einer Tiefe von 100 Metern während der Heizphase vom 19.01.2009 bis zum 09.02.2009.

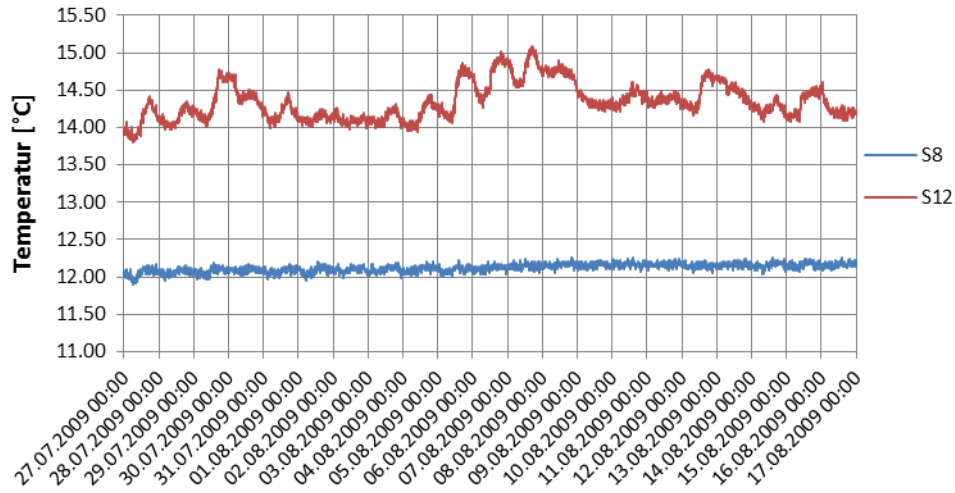


Abbildung I-3.10 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S8 und S12 in einer Tiefe von 50 Metern während der Kühlphase vom 27.07.2009 bis zum 17.08.2009.

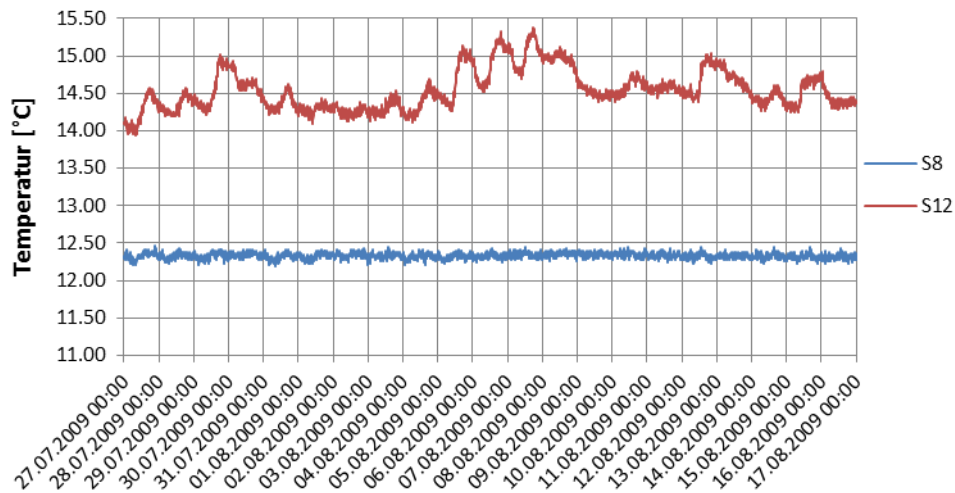


Abbildung I-3.11 Temperaturverlauf im Umfeld der Sonden S8 und S12 in einer Tiefe von 100 Metern während der Kühlphase vom 27.07.2009 bis zum 17.08.2009.

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.

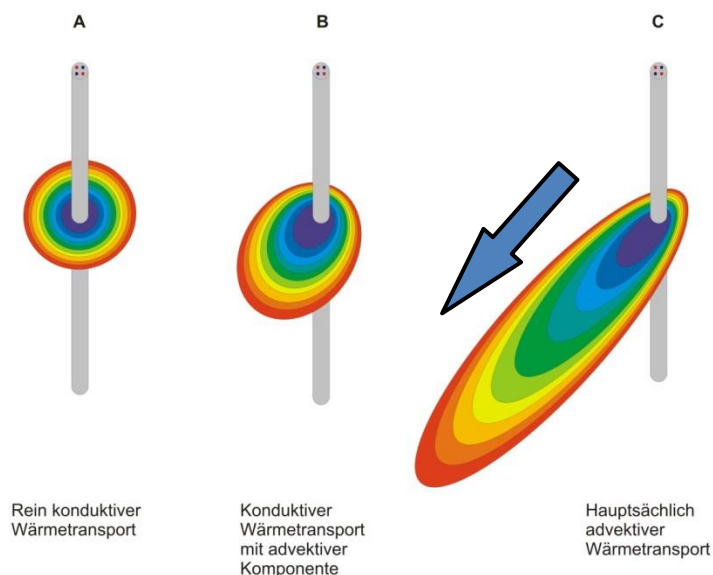


Abbildung I-4.1 Ausprägung von Kältefahnen einer Erdwärmesonde bei unterschiedlichen Grundwasser-Fließgeschwindigkeiten (Grundwasserfließrichtung entlang des blauen Pfeils).

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 Temperaturreandbedingung 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. $4 \cdot 10^{-4}$ m/s bildeten sich deutliche Kältefahnen in Fließrichtung des Grundwassers (Abb. I-4.4).

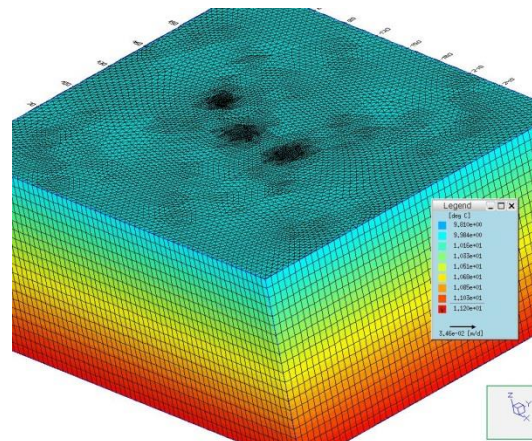


Abbildung I-4.2 Numerisches, dreidimensionales Temperaturmodell mit drei Erdwärmesonden und Grundwasserfluss (Legende: 9,8°C bis 12,2°C).

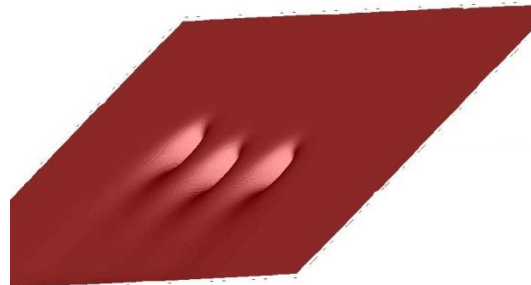


Abbildung I-4.3 Temperaturisolinie bei 10,3°C. Kältetrichter der drei modellierten Erdwärmesonden. Schrägansicht.

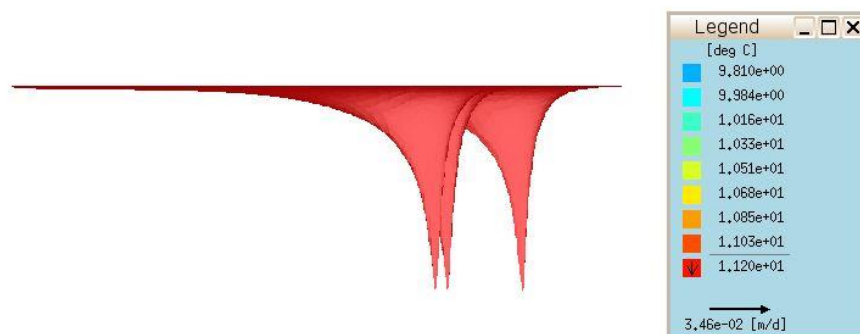


Abbildung I-4.4 Temperaturisolinie bei 10,3°C. Kältetrichter der drei modellierten Erdwärmesonden. Seitenansicht.

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 Wärmeentnahmeleistung 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.

Tabelle I-4.2 Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden im alternierenden Modellierungsmodus.

	Wärmeentzugsleistung Planung [W/m]	Wärmeentzugsleistung Realität 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

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:

$$l = \frac{v_a t}{R} \quad \text{mit} \quad v_a = \frac{v_f}{\phi}, \quad v_f = \frac{\dot{V}}{A} \quad \text{und} \quad R = 1 + \frac{\rho_s c_s}{\phi \rho_f c_f} \quad (\text{I-4.1})$$

v_a	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
v_f	Filter- oder Darcygeschwindigkeit [m/s]
ϕ	Porosität [-]
\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
A	Grundwasserquerschnittsfläche [m ²]
R	Retardationsfaktor [-]
$\rho_s c_s$	volumetrische Wärmekapazität Gestein [J/(m ³ K)]
$\rho_f c_f$	volumetrische Wärmekapazität Fluid [J/(m ³ K)]
l	Länge der Kältefahne [m]
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.

Tabelle I-4.3 Abschätzung der Kältefahnenlänge von Modell 1 bis 6. Porosität des Gesteins $\phi = 0,25$; vol. Wärmekapazität Gestein $\rho_s c_s = 2,1 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$; volumetrische Wärmekapazität Gestein Fluid $\rho_f c_f = 4,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$.

Modellnr.	Filtergeschwindigkeit v_f [m/s - m/d]	Dauer der Erhitzung t [d]	Länge der Kältefahne l [m]
1	$1,41 \cdot 10^{-6} - 0,12$	365	59,29
2	$1,41 \cdot 10^{-6} - 0,12$	608	98,76
3	$1,41 \cdot 10^{-6} - 0,12$	1825	296,44
4	$1,41 \cdot 10^{-6} - 0,12$	18250	2964,38
5	$1,41 \cdot 10^{-5} - 1,21$	365	592,88
6	$1,41 \cdot 10^{-4} - 12,10$	365	5928,77

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:

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

F_L	Wärmeentnahmeleistung pro Länge [W/m]
v_a	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
ϕ	Porosität [-]
$\rho_f c_f$	volumetrische Wärmekapazität Fluid [J/(m ³ K)]
D_t	transversaler Wärmedispersionskoeffizient [m ² /s]
ΔT_x	Differenz zur Hintergrundtemperatur [K]
λ_{total}	Wärmeleitfähigkeit Gestein & Fluid [W/(m K)]
α_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 $FL = 15 \text{ W/m}$; Porosität des Gesteins $\phi = 0,25$; volumetrische Wärmekapazität Gestein $\rho_s c_s = 2,1 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$; volumetrische Wärmekapazität Gestein Fluid $\rho_f c_f = 4,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$; Wärmeleitfähigkeit Gestein & Fluid $\lambda_{\text{total}} = 2,17 \text{ W}/(\text{m K})$; abgeschätzte transversale Dispersivität $\alpha_t = 0,1 \text{ [m]}$.

Filtergeschwindigkeit $v_f \text{ [m/s - m/d]}$	Temperatur- differenz $\Delta T_x \text{ [K]}$	Länge der Kältefahne $x \text{ [m]}$
$1,41 \cdot 10^{-6} - 0,12$	1	1,09
$1,41 \cdot 10^{-5} - 1,21$	1	$3,7 \cdot 10^{-2}$
$1,41 \cdot 10^{-4} - 12,10$	1	$4,9 \cdot 10^{-4}$
$1,41 \cdot 10^{-6} - 0,12$	0,1	109,36
$1,41 \cdot 10^{-5} - 1,21$	0,1	3,74
$1,41 \cdot 10^{-4} - 12,10$	0,1	$4,9 \cdot 10^{-2}$
$1,41 \cdot 10^{-6} - 0,12$	0,01	10935,94
$1,41 \cdot 10^{-5} - 1,21$	0,01	373,52
$1,41 \cdot 10^{-4} - 12,10$	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 ($l_{\text{max}} = v_a t$) gebildet wird.

Vergleicht man die Ergebnisse von Modell 1 miteinander (Tab. I-4.5), so kann man erkennen, dass die Temperaturisolinie bei einer 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.

Tabelle I-4.5 Kältefahnenlängen im Vergleich.

Filtergeschwindigkeit v_f [m/s - m/d]	$1,41 \cdot 10^{-6}$ - 0,12
Abstandsgeschwindigkeit v_a [m/s - m/d]	$5,64 \cdot 10^{-6}$ - 0,49
Länge der Kältefahne maximal l_{max} nach 365 d [m]	177,86
Länge der Kältefahne mit Retardation l nach 365 d [m]	59,29
stationäre Kältefahnenlänge x bei $\Delta T_x = 1$ K [m]	1,09
stationäre Kältefahnenlänge x bei $\Delta T_x = 0,1$ K [m]	109,36
stationäre Kältefahnenlänge x bei $\Delta T_x = 0,01$ K [m]	10935,94

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).

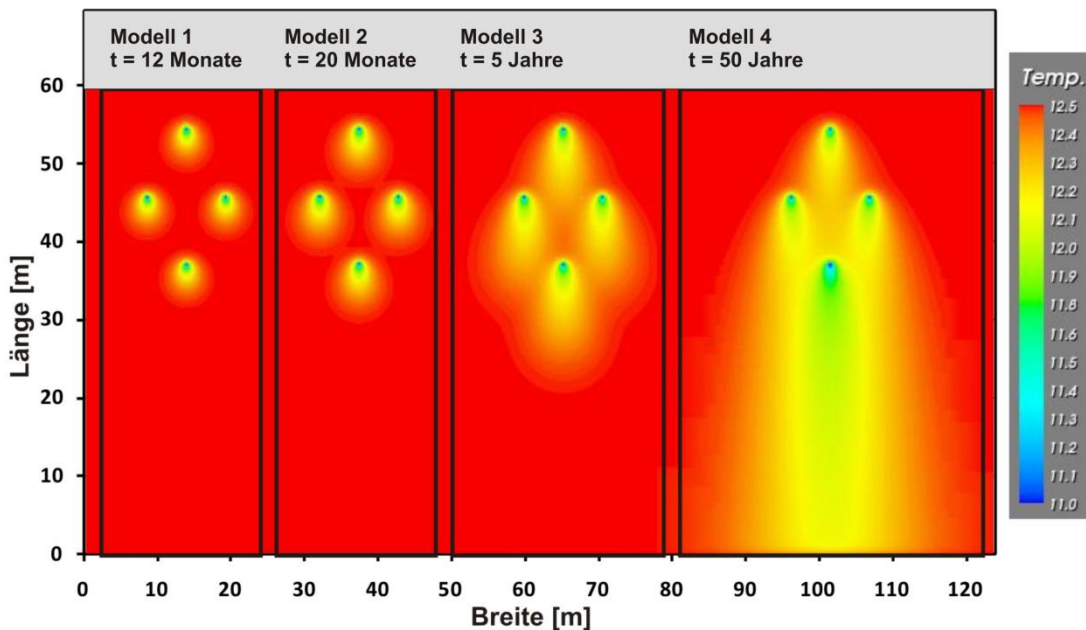


Abbildung I-4.5 Ausschnitte aus vier verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei von in der Abbildung oben nach unten gerichteter Fließbewegung (Fließgeschwindigkeit ca. $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s; Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 8,9 W pro Meter 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 $3 \cdot 10^{-6}$ m/s für die Gesteinsmatrix und von 0,5 bis $1,5 \cdot 10^{-4}$ 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, $1,4 \cdot 10^{-6}$ 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, $1,4 \cdot 10^{-4}$ 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, $1,4 \cdot 10^{-5}$ 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.

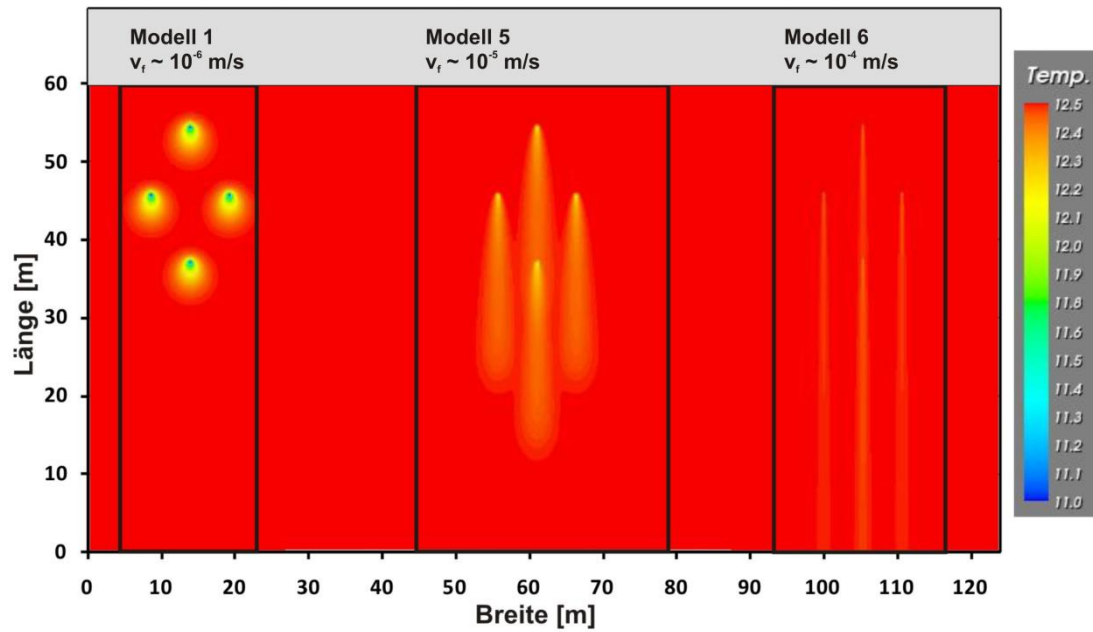


Abbildung I-4.6 Ausschnitte aus drei verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei drei Fließgeschwindigkeiten (Fließrichtung in der Abbildung von oben nach unten; Fließgeschwindigkeit ca. $1,4 \cdot 10^{-4}$ (Modell 6), $1,4 \cdot 10^{-5}$ (Modell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

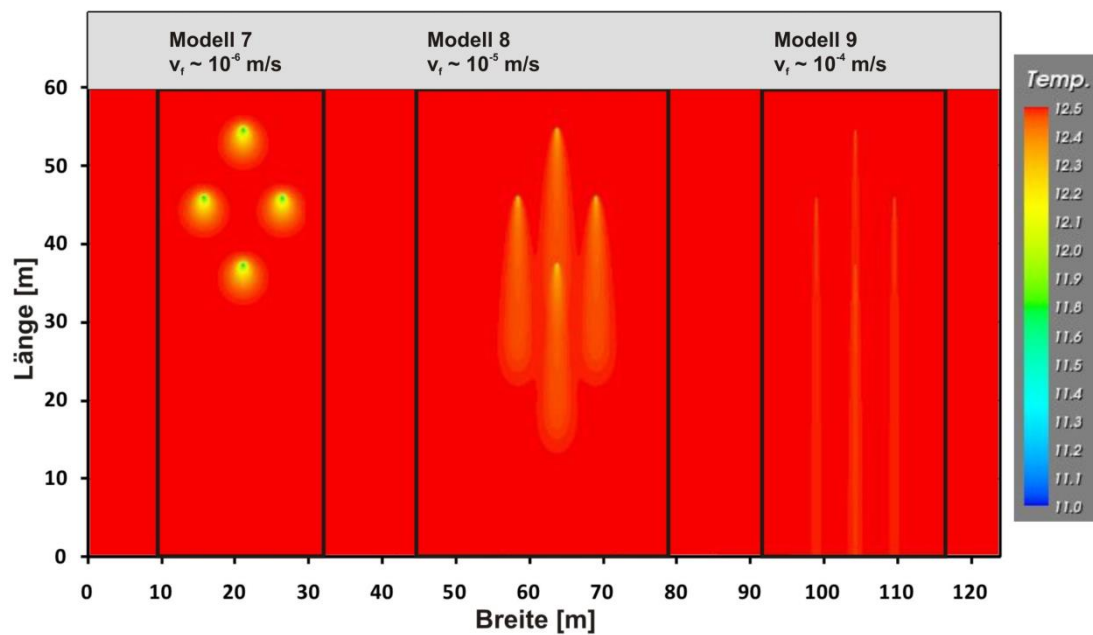


Abbildung I-4.7 Ausschnitte aus drei verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei drei Fließgeschwindigkeiten (Fließrichtung in der Abbildung von oben nach unten; Fließgeschwindigkeit ca. $1,4 \cdot 10^{-4}$ (Modell 9), $1,4 \cdot 10^{-5}$ (Modell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

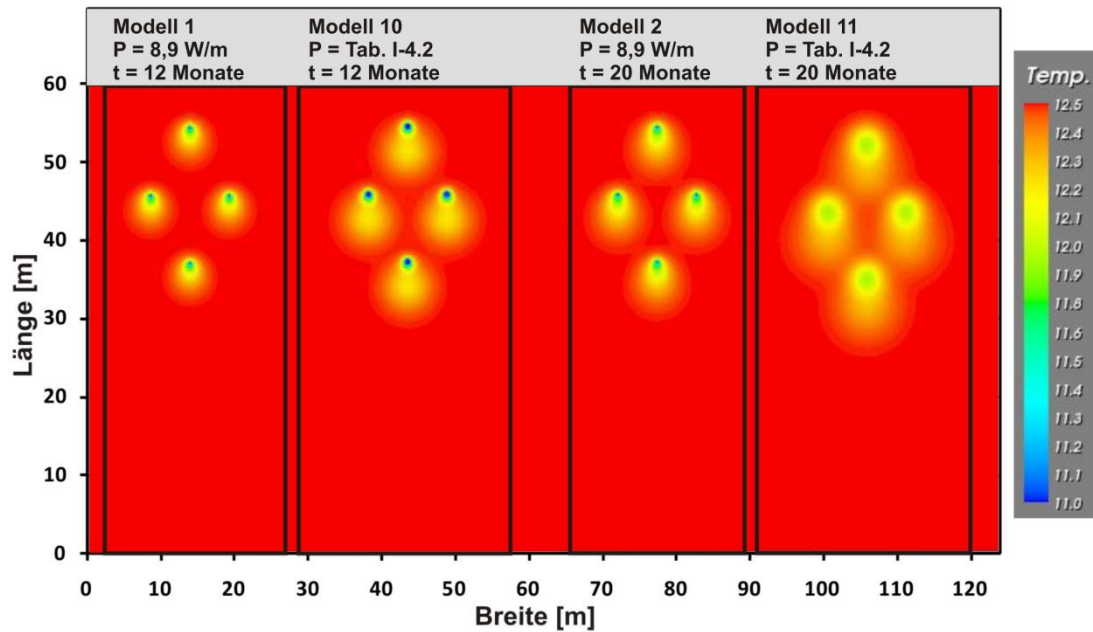


Abbildung I-4.8 Ausschnitte aus vier verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei von in der Abbildung oben nach unten gerichteter Fließbewegung (Fließgeschwindigkeit ca. $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s; Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 8,9 W pro Meter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

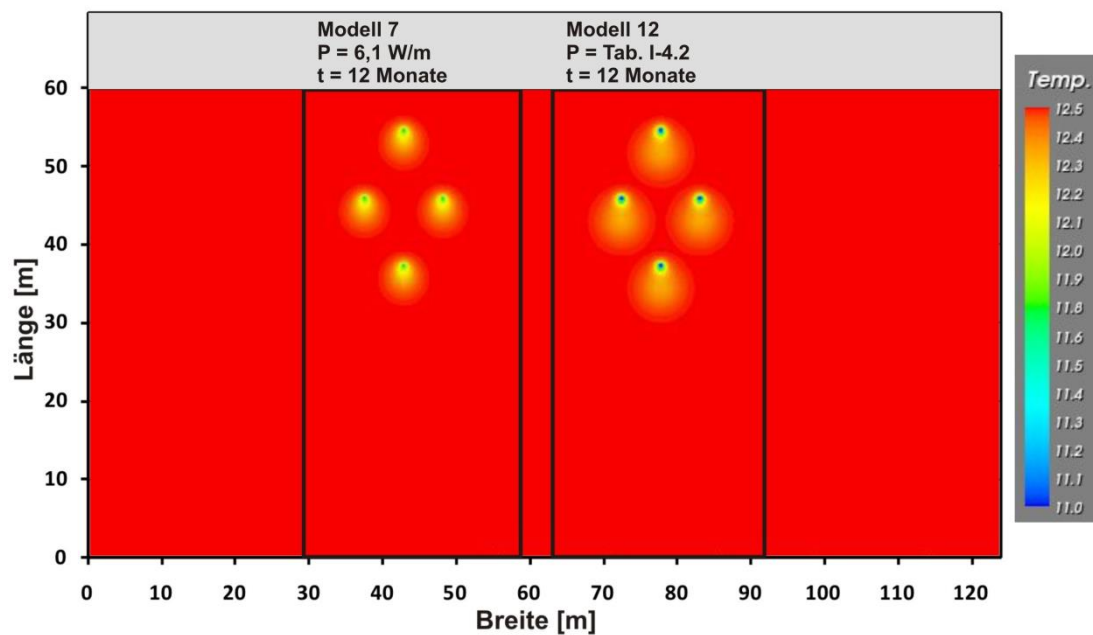


Abbildung I-4.9 Ausschnitte aus zwei verschiedenen Simulationen des Temperaturfeldes in der Umgebung von jeweils vier Erdwärmesonden bei von in der Abbildung oben nach unten gerichteter Fließbewegung (Fließgeschwindigkeit ca. $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s; Wärmeentzugsleistung der Sonden ca. 6,1 W pro Meter 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/(m ³ K)]:	2,0
Bodentemperatur [°C]:	10
Geothermischer Wärmefluss [W/m ²]:	0,07

Erdwärmesonde:

Typ:	Doppel-U
Sondenanzahl:	40
Feldgeometrie:	4x10 (rechteckig, Abb. 4-10)
Sondentiefe [m]:	130
Sondenabstand [m]:	10
Bohrlochdurchmesser [m]:	0,137
Durchflussrate [m³/s]:	0,00061
Wärmeleitfähigkeit Füllmaterial [W/(m K)]:	2,0

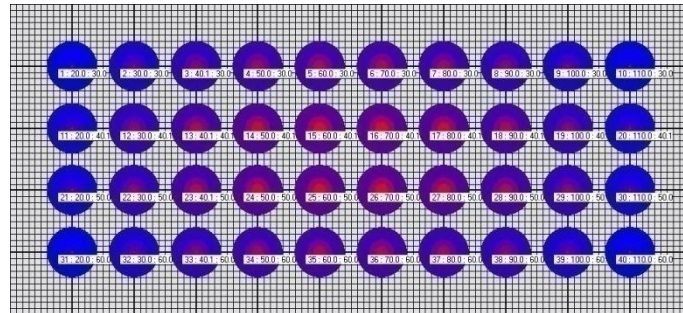


Abbildung I-4.10 Rechteckanordnung des EWS-Feldes.

Wärmeträgerfluid:

Fluid:	Monoethylenglykol (25%) & Wasser
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:	0,48
Wärmekapazität [MJ/(m³ K)]:	3,795
Dichte [kg/m³]:	1052,0
Viskosität [kg/(m s)]:	0,0052
Gefrierpunkt [°C]:	-14

Grundlast:

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.

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

	Heizen		Kühlen		Heizen & Kühlen Entzug [kWh]
	%	Bedarf [kWh]	%	Bedarf [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

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 ³ K))
Bodentemperatur [°C]:	10
Geothermischer Gradient [K/m]:	0,026 (entspricht ca. 0,07 W/m ²)

Erdwärmesonde:

Typ:	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

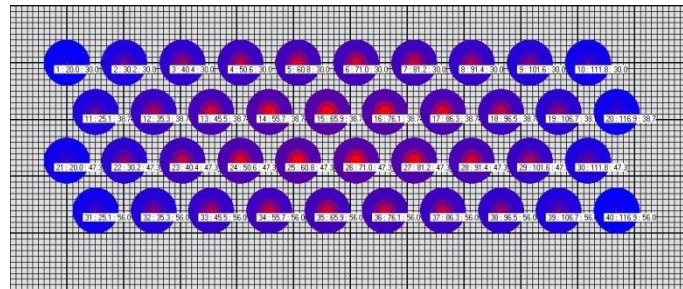


Abbildung I-4.11 Versetzte Sondenanordnung des EWS-Feldes.

Wärmeträgerfluid:

Fluid:	Monoethylenglykol (25%) & Wasser
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:	0,49
Wärmekapazität [J/(kg K)]:	3,800
Dichte [kg/m ³]:	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 Sondenordnung ist hierbei ein rechteckiges 4·10-Sonden-Feld (Abb. I-4.10), da in EED die Sondenordnung 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 Sondenordnung 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 Sondenordnung (versetzte Sondenordnung 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.

Tabelle I-4.7 Durchschnittliche monatliche Soletemperatur.

Vergleich EED und EWS				
Durchschnittl. monatl. Soletemperatur				
	1.Jahr Tmax	50.Jahr Tmax	1.Jahr Tmin	50.Jahr 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

Vergleich EWS und EWS-II				
Durchschnittl. monatl. Soletemperatur				
	1.Jahr Tmax	50.Jahr Tmax	1.Jahr Tmin	50.Jahr 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

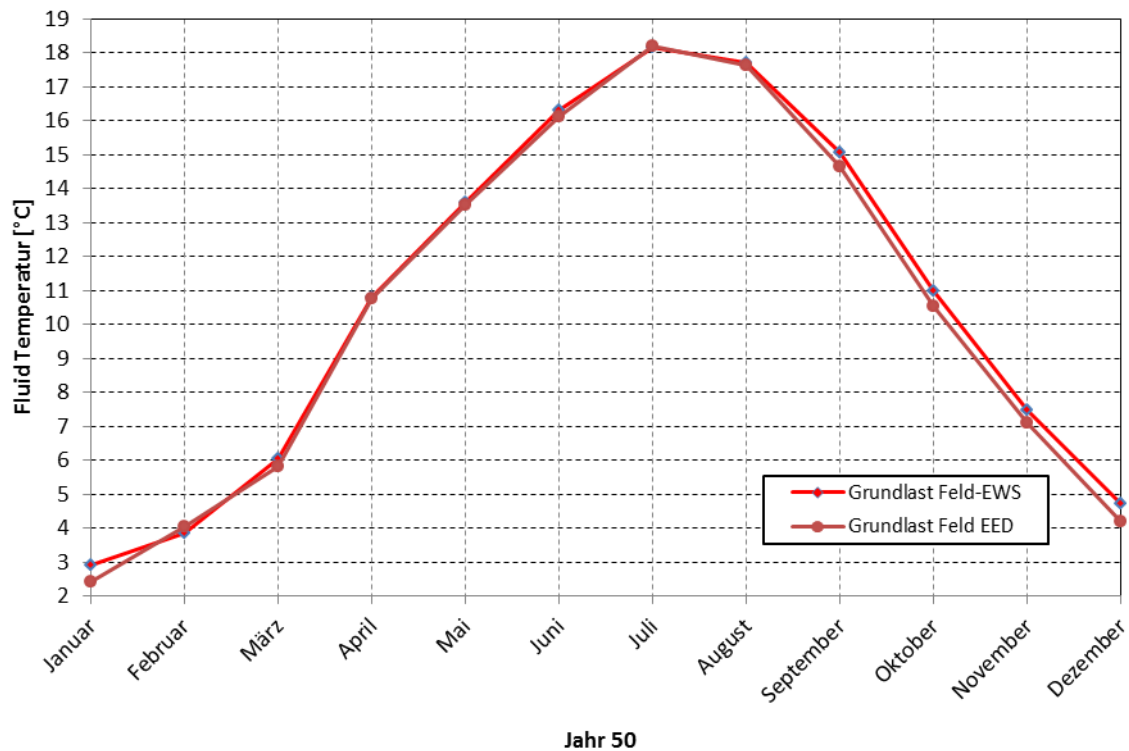


Abbildung I-4.12 Monatliche durchschnittliche Temperaturentwicklung des Trägerfluids in den Sonden im Jahr 50 nach Inbetriebnahme der EWS-Felder bei kontinuierlichem Betrieb; Modell Feld-EED und Feld-EWS.

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 Mindesttemperaturen 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.

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

	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) [$^{\circ}\text{C}$]	-5,18	-0,16
Max. Soletemp. (EED) [$^{\circ}\text{C}$]	23,92	20,46

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.

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

	Wärmeentzug Planung [kWh]	Wärmeentzug Realität [kWh]	Differenz [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 über April & Mai	-
Mai	1.620		-
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-4.10 Kälteentzug der Planungsgrundlage und der real benötigte Kälteentzug.

	Kälteentzug Planung [kWh]	Kälteentzug Realität [kWh]	Differenz [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 über April & Mai	-
Mai	45.432		-
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.

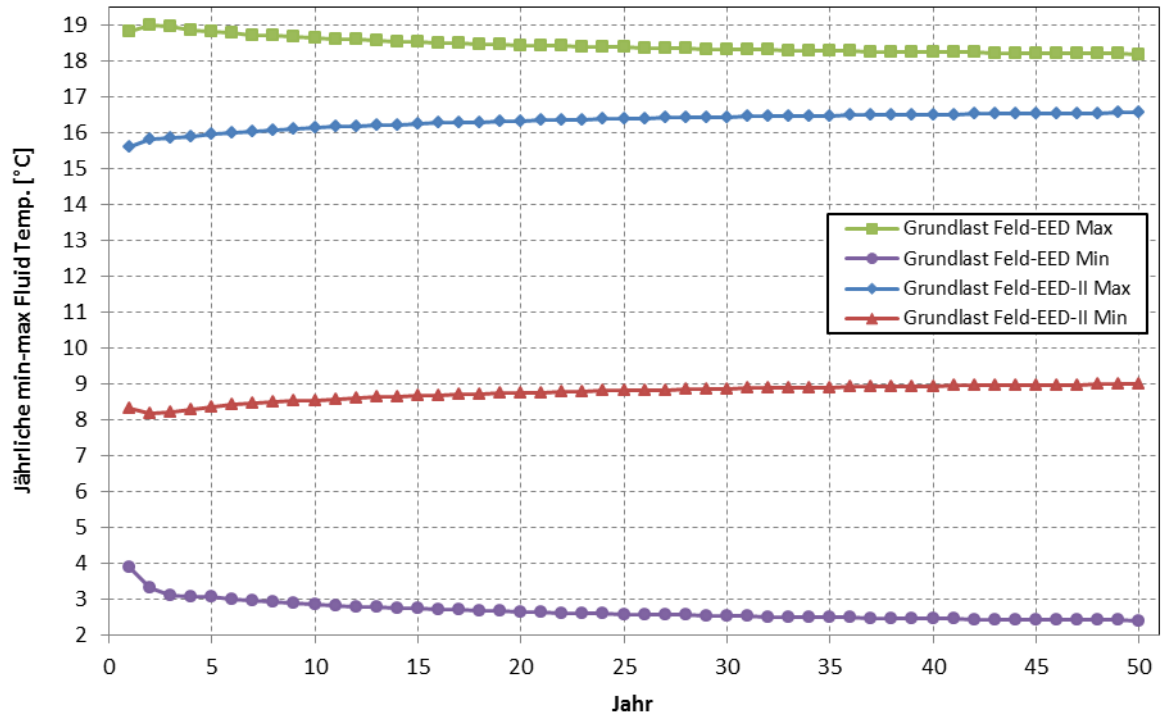


Abbildung I-4.13 Entwicklung der jährlichen minimalen und maximalen Monats-Durchschnittstemperaturen des Trägerfluids in den Sonden über 50 Jahre; Modell Feld-EED und Feld-EED-II.

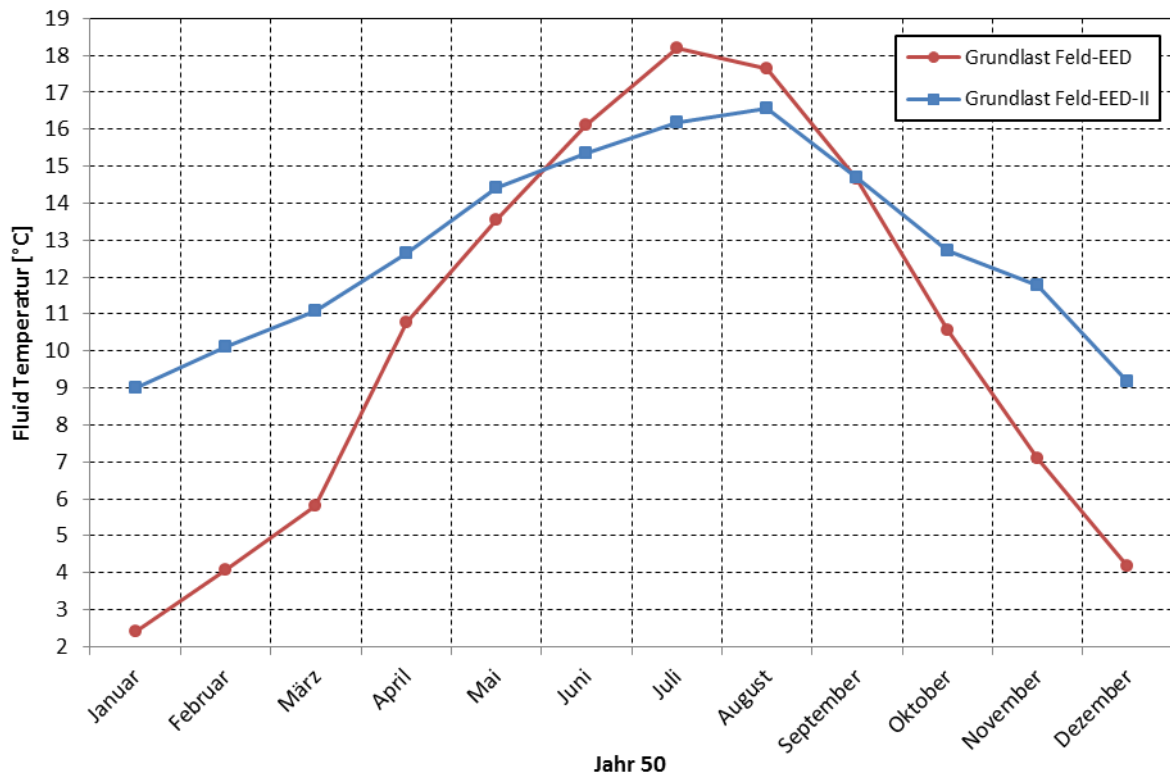


Abbildung I-4.14 Monatliche durchschnittliche Temperaturentwicklung des Trägerfluids in den Sonden im Jahr 50 nach Inbetriebnahme der EWS-Felder bei kontinuierlichem Betrieb; Modell Feld-EED und Feld-EED-II.

I-5. Zusammenfassung der Ergebnisse von Abschnitt I

Im Zuge des Forschungsprojekts „Qualitätssicherung bei Erdwärmesondenfeldern für Heiz- und 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 hydrogeologischen 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 Geothermie (MALM 2009, MALM & DECKERT 2013, GEHLIN 1998, 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 (ERBAŞ 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).

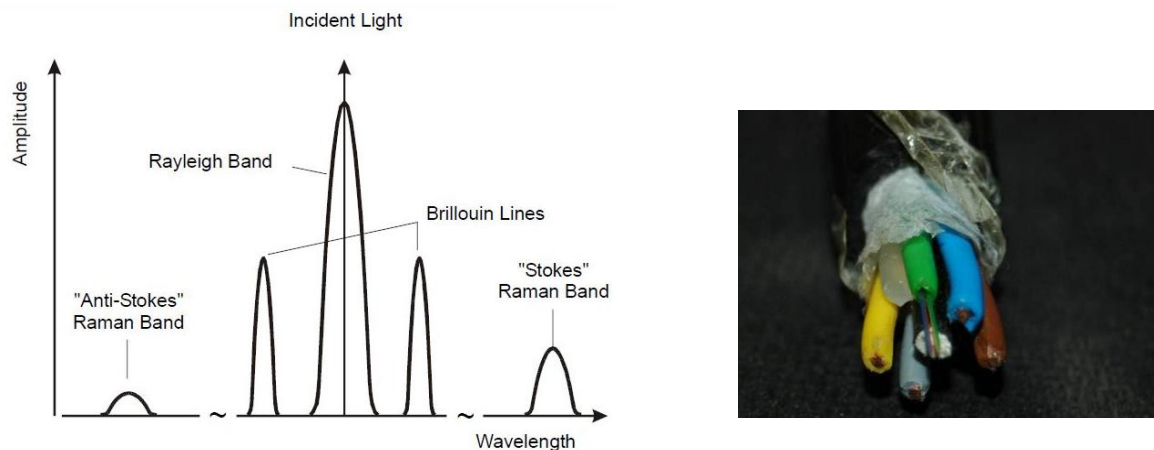


Abbildung II-1.1 Aufteilung der optischen Rückstreuung (ERBAŞ et al. 1999) und Abbildung eines Glasfaser-hybridkabels. Die grüne Kabelhülle beinhaltet die vier Glasfasern, die unteren Kabelhüllen die vier Kupferlitzen.

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) wiedergeben. 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 qualitative 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 Kabelaufbau 2-4 Kupferadern (Querschnittsfläche 0,5 bis 1,5 mm²), 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.

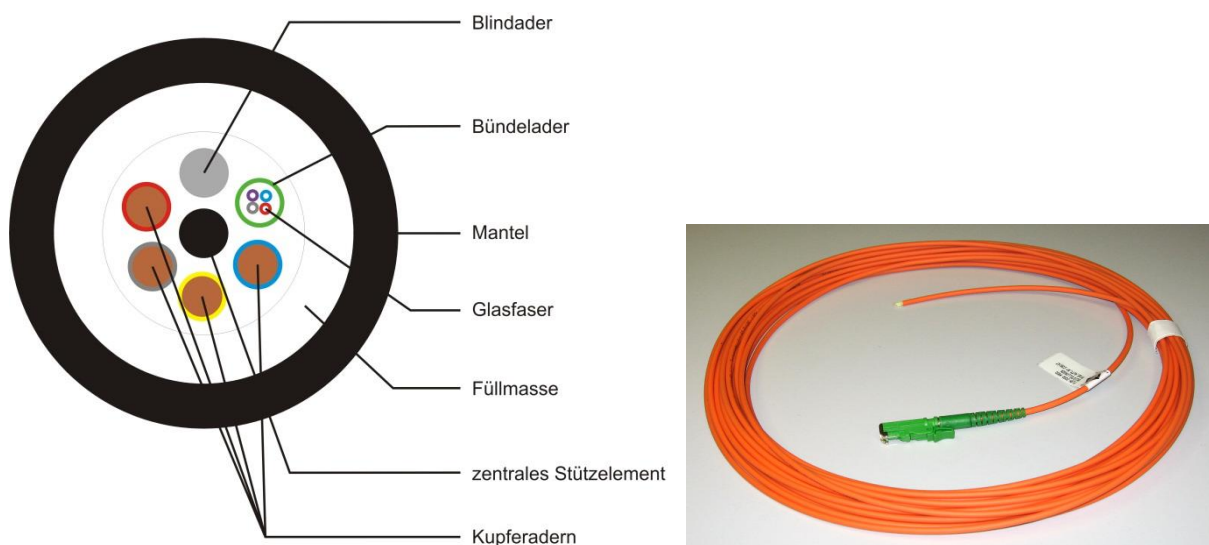


Abbildung II-1.2 Schematischer Aufbau eines handelsüblichen LWL-Hybridkabels mit 4 Kupferadern im Querschnitt (links). Spezial-Pig-Tail für DTS-Messungen (rechts, LIOS Technology 2011).

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 der DTS-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.

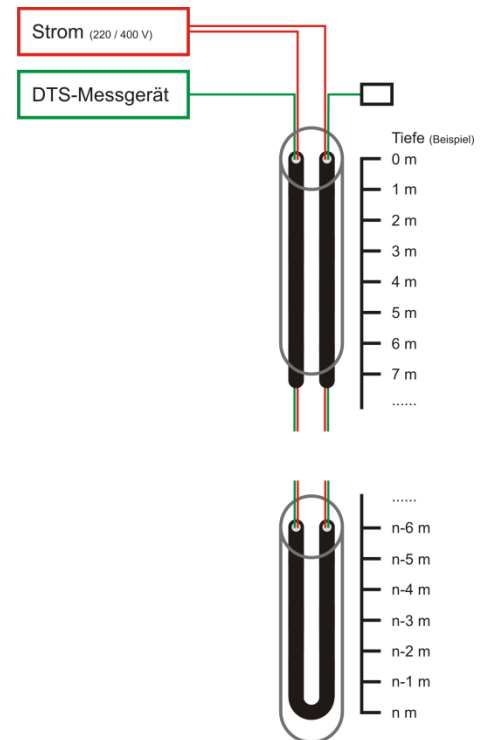


Abbildung II-1.3 Messaufbau des eTRT.

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):

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

λ	Wärmeleitfähigkeit des Messabschnitts [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 [-]
t_i	Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]
$\overline{\ln(t)}$	arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte im Auswertebereich [-]
T_i	Temperatur i der Glasfaser [°C]
\bar{T}	arithmetisches Mittel der Glasfaser-Temperaturwerte [°C]
r_0	Bohrlochradius [m]
ρc_p	volumetrische Wärmekapazität Untergrund [J/(m ³ K)]
α	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s] mit $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$

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):

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

r	Radius der Temperaturfront [m]
α	Temperaturleitfähigkeit ($\alpha = \lambda/(\rho c_p)$) [m ² /s]
t	Dauer der konstanten Erhitzung [s]
λ	Wärmeleitfähigkeit Fluid/Gestein [W/(m K)]
ρc_p	volumetrische Wärmekapazität Fluid/Gestein [J/(m ³ 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:

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

λ	Wärmeleitfähigkeit des Messabschnitts [W/(m K)]
\dot{Q}_L	Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]
n	Anzahl Temperaturdaten im Auswertebereich [-]
t_i	Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]
t_h	Dauer des Aufheizvorgangs [s]
m_{relax}	Steigung der Relaxationsgeraden [K]
$\overline{\ln\left(\frac{t}{t - t_h}\right)}$	arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte im Auswertebereich [-]
T_i	Temperatur i der Glasfaser [°C]
\bar{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 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 Peclet-Zahl ist das Produkt aus der Reynolds- und der Prandtl-Zahl. Mit der Peclet-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 Peclet-Zahl größer eins überwiegt der advektive den konduktiven Wärmetransport.

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{\lambda_{total} - \lambda_{kond}}{\lambda_{kond}} = \frac{\lambda_{total}}{\lambda_{kond}} - 1 = \frac{l v \rho c_p}{\lambda_{kond}} \quad (II-1.4)$$

Pe	Péclet-Zahl [-]
Re	Reynolds-Zahl [-]
Pr	Prandtl-Zahl [-]
λ_{kond}	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein [W/(m K)]
λ_{total}	konduktive Wärmeleitfähigkeit Gestein + advektiver Anteil durch Grundwasserfluss [W/(m K)]
l	charakteristische Länge [m]
v	Fließgeschwindigkeit Grundwasser [m/s]
ρ	Dichte Grundwasser [kg/m ³]
c_p	spezifische Wärmekapazität Grundwasser [J/(kg K)]

Hieraus folgt

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

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.

$$\lambda_{kond} = \lambda_{total} - l v \rho c_p \quad (II-1.6)$$

Die Peclet-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 Peclet-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 (MESCHÉDE 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 Messstrecke (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 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 $\ln(t_i)$ die logarithmischen Zeitwerte (natürlicher Logarithmus der kumulierten Sekunden nach Beginn der Aufheizung des Untergrundes) und T die den Zeitwerten zugeordneten Temperaturwerte beschreibt.

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

m	Steigung der Regressionsgeraden durch die Werte im Auswertebereich [K]
t_i	Zeitpunkt i des Auswertebereichs [s]
$\overline{\ln(t)}$	arithmetisches Mittel der logarithmischen Zeitwerte [-]
T_i	Temperatur i der Glasfaser [°C]
\overline{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):

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

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

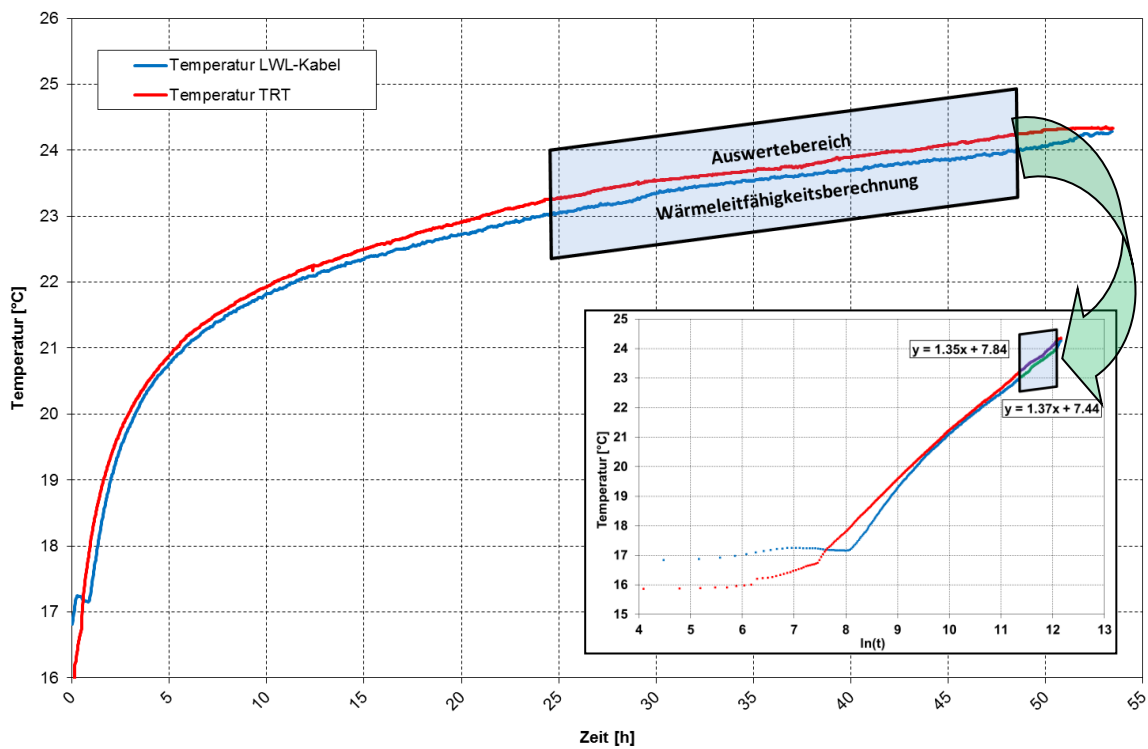


Abb. II-2.1 Temperaturanstiegskurven der LWL-Messungen und der TRT-Messungen.

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 tiefe aufgelösten 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 verschiedene Modellreihen entwickelt, die die angesprochenen Problemfelder numerisch simulieren. Zur Modellierung wurde das Programm Feflow[®] 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):

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

mit

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

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

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

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

S_0	spezifischer Speicherkoeffizient (Kompressibilität) [m^{-1}]
h	Hydraulic Head [m]
t	Zeit [s]
q_i^f	Vektor der Darcy Geschwindigkeit des Fluids [m/s]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
Q_p	Quellen-/Senkenfunktion des Fluids für Massen (Q_C), und Wärmetransport (Q_T) (DIERSCH 2005)
Q_{EB}	Term der erweiterten Boussinesq-Approximation (DIERSCH 2005)
ϕ	Porosität [-]
ρ^f	Dichte des Fluids [kg/m^3]
ρ^s	Dichte der Festphase [kg/m^3]
c^f	spezifische Wärmekapazität des Fluids [$\text{J}/(\text{kg K})$]
c^s	spezifische Wärmekapazität der Festphase [$\text{J}/(\text{kg K})$]
T	Temperatur [$^\circ\text{C}$]
T_0	Referenztemperatur [$^\circ\text{C}$]
λ_{ij}	Tensor hydrodynamischer Thermodispersion [$\text{W}/(\text{m K})$]
K_{ij}	Tensor hydraulischer Konduktivität [m/s]
k_{ij}	Tensor hydraulischer Permeabilität [m^2]
e_j	Gravitations-Einheitsvektor ($e_j = -g_j/g$) [-]
g	Gravitationsbeschleunigung [m/s^2]
f_μ	konstitutive Viskositäts-Verhältnissfunktion [-]
μ^f	dynamische Viskosität des Fluids [Ns/m^2]

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).

Flow-Randbedingungen

- 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.

$$h(x_i, t) = h_1^R(t) \quad (\text{II-3.2})$$

h	Hydraulic Head [m]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
h_1^R	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.

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

q_{n_h}	normaler Darcy Fluss des Fluids [m/d]
x_i	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.

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

q_{n_h}	normaler Darcy Fluss des Fluids [m/d]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
Φ_h	Fluid-Transfer-Koeffizient [d ⁻¹]
h_2^R	fester Randbedingungswert für den Hydraulic Head [m]

- 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.

$$Q_p^w(x_i, t) = Q_1^w(x_i, t) \quad (\text{II-3.5})$$

Q_p^w	Quellenfunktion [m ³ /d]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
Q_1^w	fester Randbedingungswert für den Wasserzu- oder -abstrom [m ³ /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.

$$T(x_i, t) = T_1^R(t) \quad (\text{II-3.6})$$

T	Temperatur [°C]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
T_1^R	fester Randbedingungswert für die Temperatur [°C]

- Randbedingung zweiter Art (Neumann):

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

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

q_{n_T}	normaler Wärmefluss [J/m ² /d]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
q_T^R	fester Randbedingungswert für den Wärmefluss in oder aus dem Modell [J/m ² /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.

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

q_{n_T}	normaler Wärmefluss [J/m ² /d]
x_i	Raumkoordinate in einem kartesischen System [m]
t	Zeit [d]
Φ_T	Wärme-Transfer-Koeffizient [J/m ² /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.

$$Q_T^W(x_i, t) = Q_1^W(x_i, t) \quad (\text{II-3.9})$$

Q_T^W	Wärmequellenfunktion [J/d]
x_i	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):

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

P_{total}	Gesamtparameter (λ oder ρc_p) [W/(m K) oder J/(m ³ K)]
P_{fluid}	Fluidparameter (λ oder ρc_p) [W/(m K) oder J/(m ³ K)]
P_{solid}	Gesteinsparameter (λ oder ρc_p) [W/(m K) oder J/(m ³ K)]
ϕ	Porosität [-]

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 $\alpha \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$) 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.

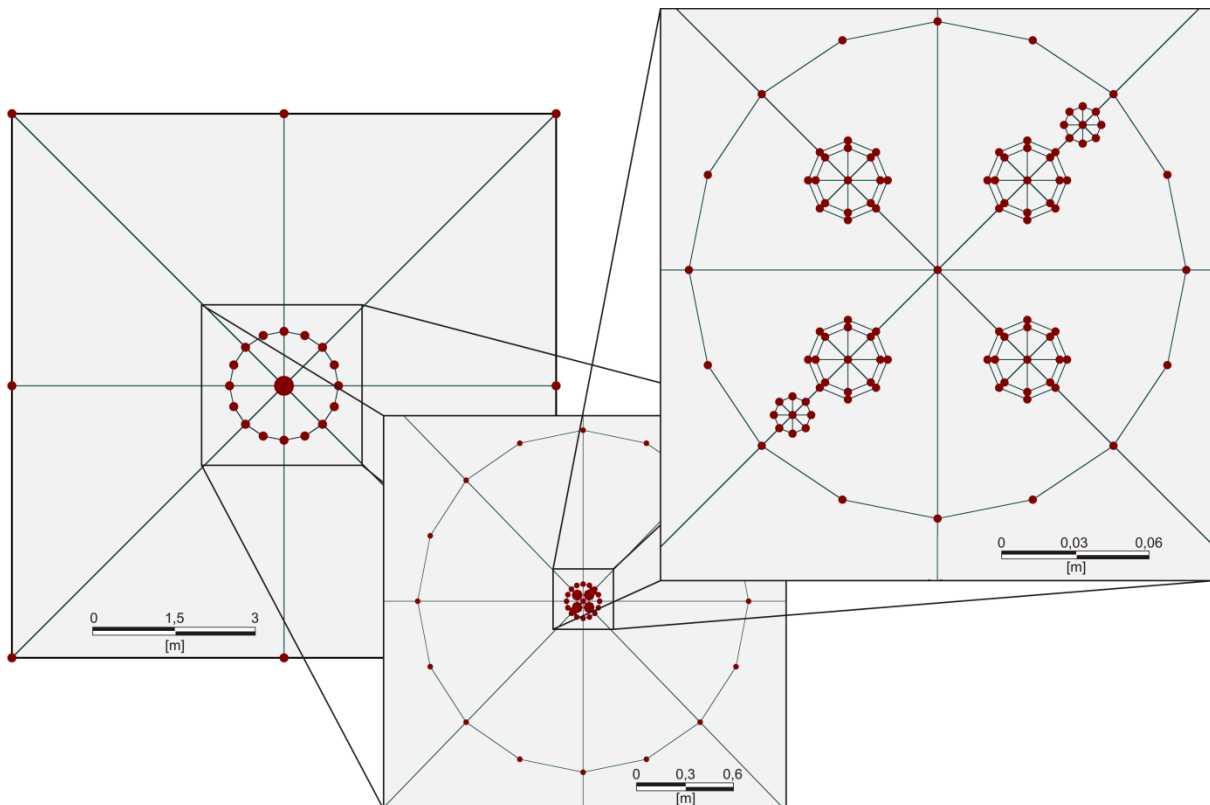


Abbildung II-3.1 Modellgeometrie des Gesamtmodells, des Sondennahfeldes und der Sondenquerschnitts für Modellposition 1 (v.l.n.r., Abmessungen in Tab. II-3.1, Modellpositionen in Abb. II-3.3). Die Superelemente des Modells sind grau und schwarz umrandet, die Punkte sind rot und begrenzen die Superelemente.

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).

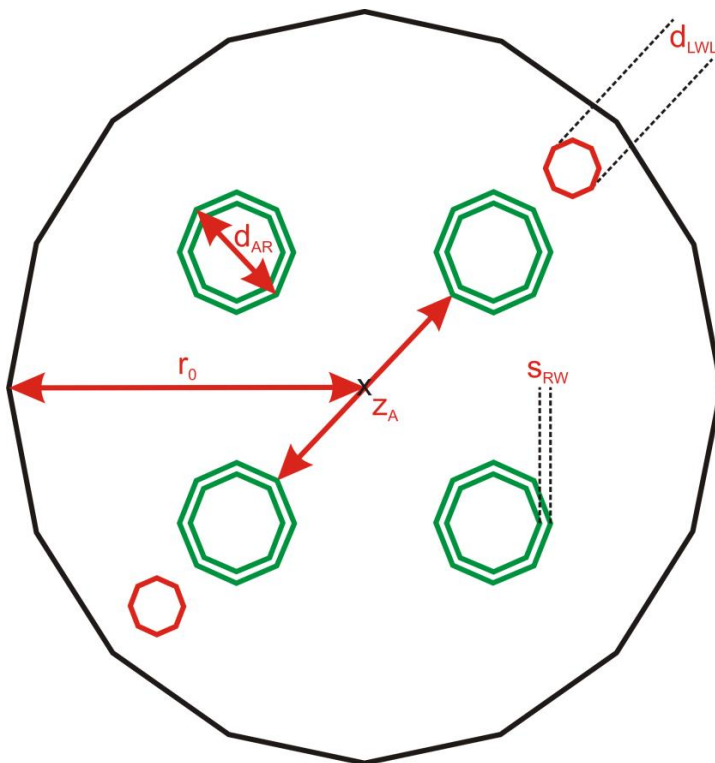
Das modellierte LWL-Kabel besitzt einen Durchmesser von 15 mm (Tab. II-3.1) und ist je nach Modell unterschiedlich im Bohrloch positioniert (Abb. II-3.2). Die Temperaturzuführung als auch die Temperaturaufzeichnung über die Messzeit erfolgte jeweils immer im Mittelpunkt der LWL-Kabel. Tabelle II-3.1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

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

Bezeichnung	Wert
Modellbreite & -höhe x, y [m]	10
Radius Sondennahfeld r_{SNF} [m]	1
Bohrradius r_0 [m]	0,1
Rohrabstand z_A [m]	0,07
Außenrohrdurchmesser d_{AR} [m]	0,032
Stärke Rohrwand s_{RW} [m]	0,003
Durchmesser LWL-Kabel d_{LWL} [m]	0,015

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).

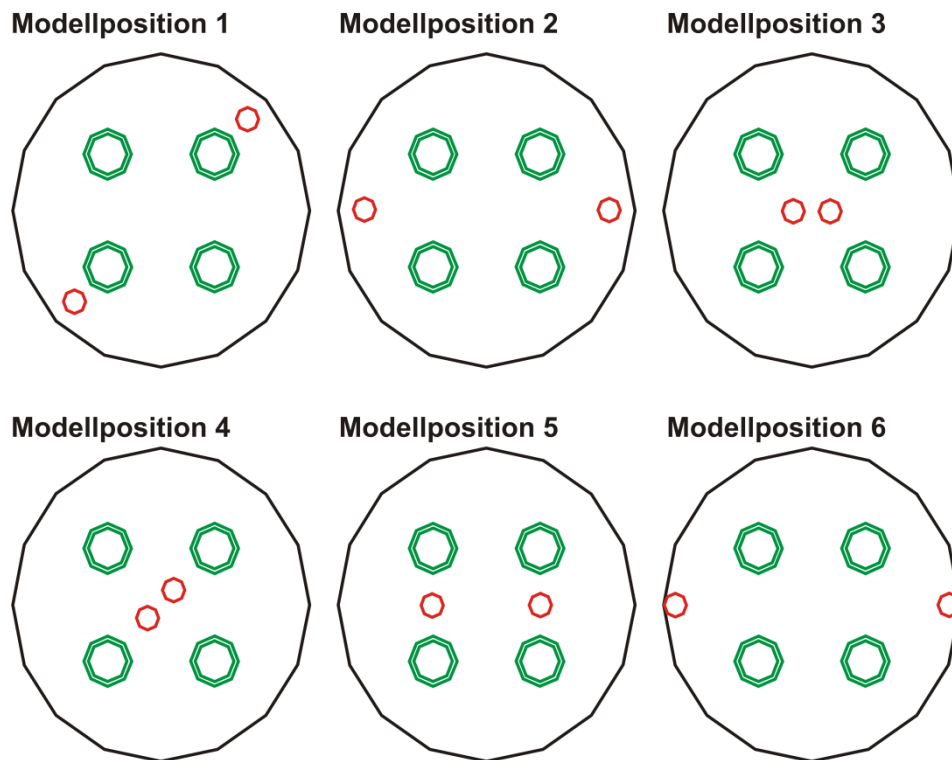


Abbildung II-3.3 Modellpositionen des LWL-Kabels innerhalb des Bohrlochs der eTRT-Modelle.

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.

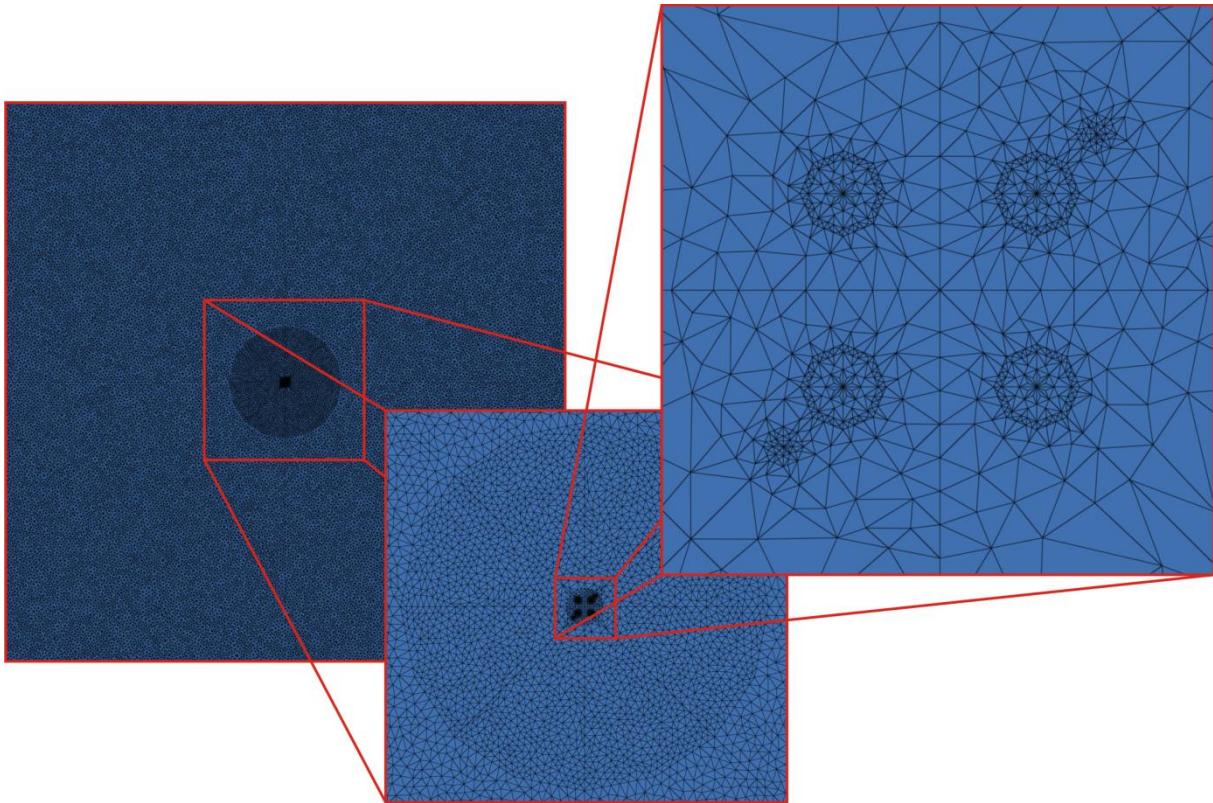


Abbildung II-3.4 Meshing für Modellposition 1 (Abmessungen in Tab. II-3.1, Modellpositionen in Abb. II-3.3).

II-3.2.3 3D-Einstellungen

In Feflow sind die Modelle 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).

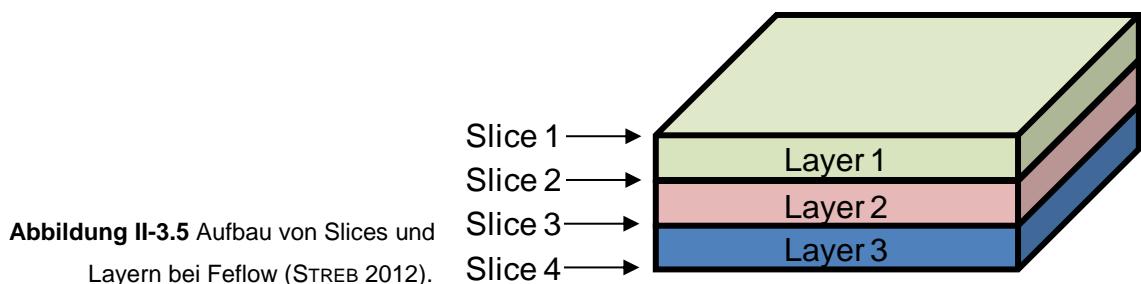


Abbildung II-3.5 Aufbau von Slices und Layern bei Feflow (STREB 2012).

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 angegebenen 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.

Tabelle II-3.2 Globale Modellparameter.

	Initialer Hydraulic Head [m]	Initiale Temperatur T_0 [°C]	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	Porosität ϕ [-]	Volumetrische Wärmekapazität Feststoff ρc_p [MJ/(m ³ K)]	Wärmeleitfähigkeit Feststoff λ [W/(m K)]
Gestein	1	10	$1 \cdot 10^{-4}$	variabel	2	variabel
Bohrlochverfüllung	1	10	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	2	variabel
Rohrwand	1	10	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-5}$	2,016	0,42
Rohrfüllung	1	10	0,1	0,5	4,2	0,59
LWL-Kabel	1	10	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-5}$	2	2

Wärmeleitfähigkeit Fluid: 0,59 W/(m K)

Volumetrische Wärmekapazität Fluid: 4,2 MJ/(m³ K)

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:	$1,296 \cdot 10^6$ J/d entspricht 15 W/m
Oberster und unterster Slice LWL-Kabel-Mittelpunkt:	$0,648 \cdot 10^6$ 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: $2 \text{ d} \leq \text{Auswertebereich} \leq 3 \text{ d}$ ($t_1 = 2 \text{ d}$, $t_n = 3 \text{ d}$). 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 $1 \cdot 10^{-5}$ 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.

Tabelle II-3.3 Wärmeleitfähigkeitskombinationen des Gesteins und des Verpressmaterials.

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

Tabelle II-3.4 Modellnamen der Modellreihe eTRT_04 (Einzelnamen bestehend aus „Name der Modellreihe“-„Nr. Modell“-„Modellposition“).

Modellname	Wärmeleitfähigkeit λ		Modellposition (Abb. II-3.3)
	Gestein [W/(m K)]	Verpressung [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 Schichtwechselln 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 $1 \cdot 10^{-5}$ 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 (Einzelnamen bestehend aus „Name der Modellreihe“-„Nr. Modell“).

Modellname	Wärmeleitfähigkeit Gestein		
	Layer 1 bis 6 [W/(m K)]	Layer 7 bis 9 [W/(m K)]	Layer 10 bis 15 [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: $1,296 \cdot 10^6$ J/d entspricht 15 W/m
 Oberster und unterster Slice LWL-Kabel-Mittelpunkt: $0,648 \cdot 10^6$ J/d entspricht 15 W/m

Tabelle II-3.6 Änderung des Wärmeeintrags mit Bezug zum Ausgangsmodell „FEFLOW eTRT_04-1.1“.

Modellname	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“)

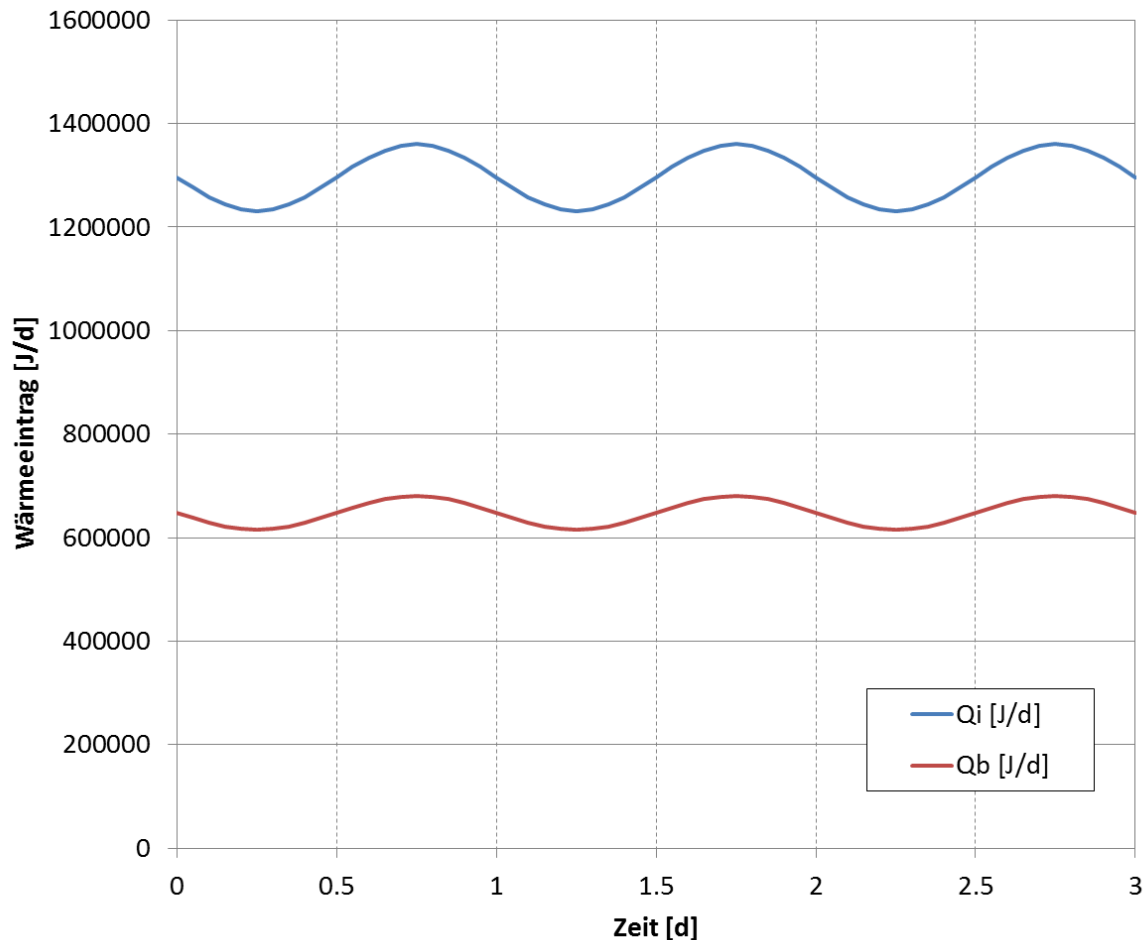


Abbildung II-3.6 Sinusförmige Variation ($\pm 5\%$ in Bezug auf den Bezugswärmeeintrag) des Wärmeeintrags von Modells „eTRT_06-7“ (Q_i bezeichnet den Wärmeeintrag an den Knoten der mittleren Slices, Q_b den Wärmeeintrag an den Knoten der äußeren Slices).

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):

$$V = k_f F i \quad (\text{II-3.11})$$

mit

$$i = \frac{h}{l} \quad (\text{II-3.12})$$

Hieraus ergibt sich für die Filter- oder Darcygeschwindigkeit v_f (HÖLTING & COLDEWEY 2009):

$$v_f = \frac{V}{F} = k_f i \quad (\text{II-3.13})$$

V	Durchflussrate [m ³ /s]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
F	durchströmte Fläche [m ²]
i	hydraulischer Gradient [-]
h	Druckhöhenunterschied [m]
l	Länge der Fließstrecke [m]
v_f	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.

Tabelle II-3.7 Hydraulic Head Boundary Condition-Verteilung der Modellreihe eTRT_07.

Modellname	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

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 von $1 \cdot 10^{-4}$ 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).

Modellname	Druckhöhenunterschied h [m]	Länge der Fließstrecke l [m]	Hydraulischer Gradient i [-]	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	resultierende Filtergeschwindigkeit v_f [m/s (m/d)]
eTRT_07-1	1	10	0,1	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$ (0,864)
eTRT_07-2	0,5	10	0,05	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$ (0,432)
eTRT_07-3	0,1	10	0,01	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$ (0,0864)
eTRT_07-4	0,05	10	0,005	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$ (0,0432)
eTRT_07-5	0,01	10	0,001	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$ (0,00864)

Da in dem vorliegenden Modell der advective 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 λ_{solid} so erhöht, dass die Gesamtwärmeleitfähigkeit λ_{total} einen Wert von 2 W/(m K) annimmt ($\lambda_{\text{solid}} = 2,157 \text{ W/(m K)}$). 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).

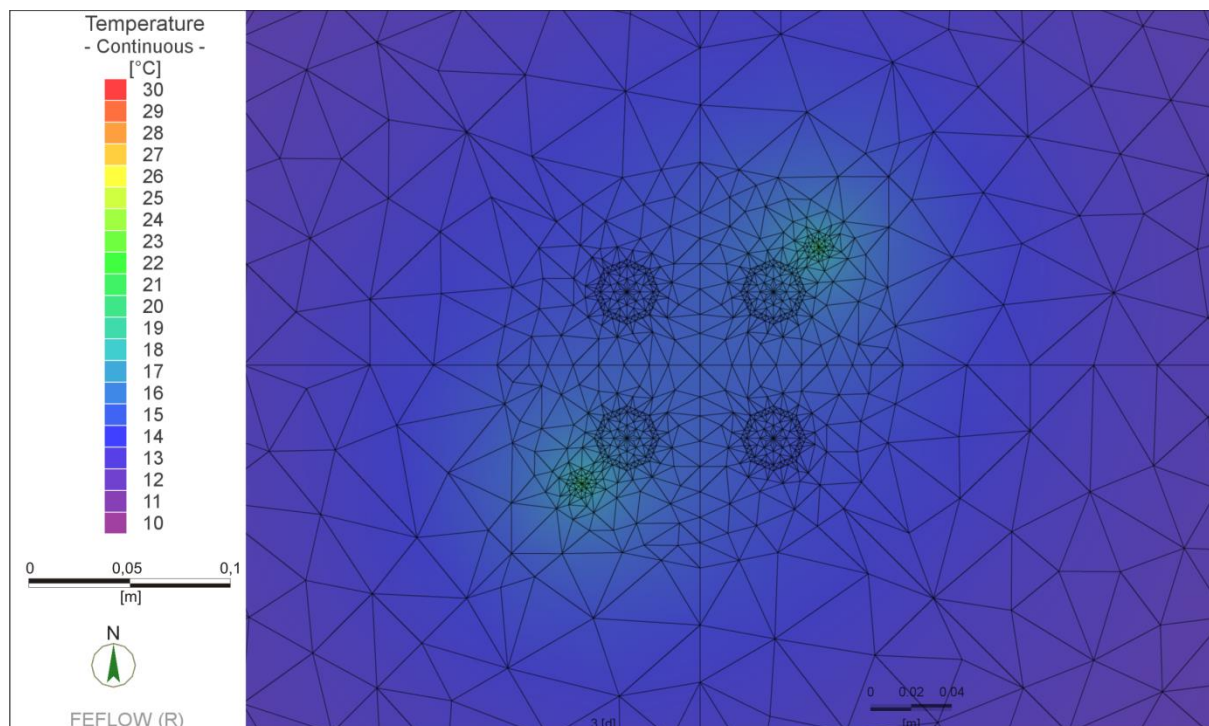


Abbildung II-3.7 Ausbreitung der Temperatur von Modell „eTRT_04-1.1“ nach 3 Tagen Erhitzung.

Legt man zur groben Abschätzung der Reichweite der Temperatureausbreitung 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 Temperatureausbreitung nach Gleichung II-1.2 ($t = 3d$).

Wärmeleitfähigkeit des umliegenden Materials [W/(m K)]	Volumetrische Wärmekapazität [MJ/(m ³ K)]	Reichweite der Temperatureausbreitung [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.

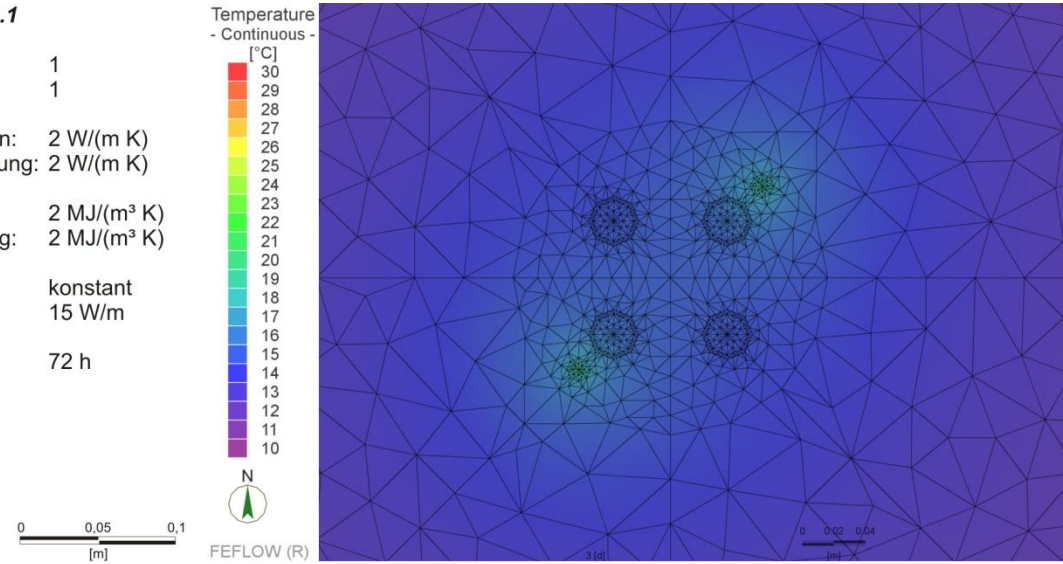
Allgemein kann man in den Abbildungen II-3.8 bis II-3.12 erkennen, dass die Temperatur erwartungsgemäß dann am stärksten ansteigt, wenn sowohl die Kabel nah beieinander liegen (Modellpositionen 3 bis 5), sowie wenn die Wärmeleitfähigkeit der Verpressung, als auch in geringerem Maße die Wärmeleitfähigkeit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

Tabelle II-3.10 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung Modellreihe eTRT_04 (nach Gleichung II-1.1).

Modellname	Wärmeleitfähigkeit λ			Abweichung von Gesteinswärmeleitfähigkeit [%]	Maximale, nach 3 Tagen erreichte Endtemperatur [°C]
	Gestein [W/(m K)]	Verpressung [W/(m K)]	Berechnet [W/(m K)]		
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

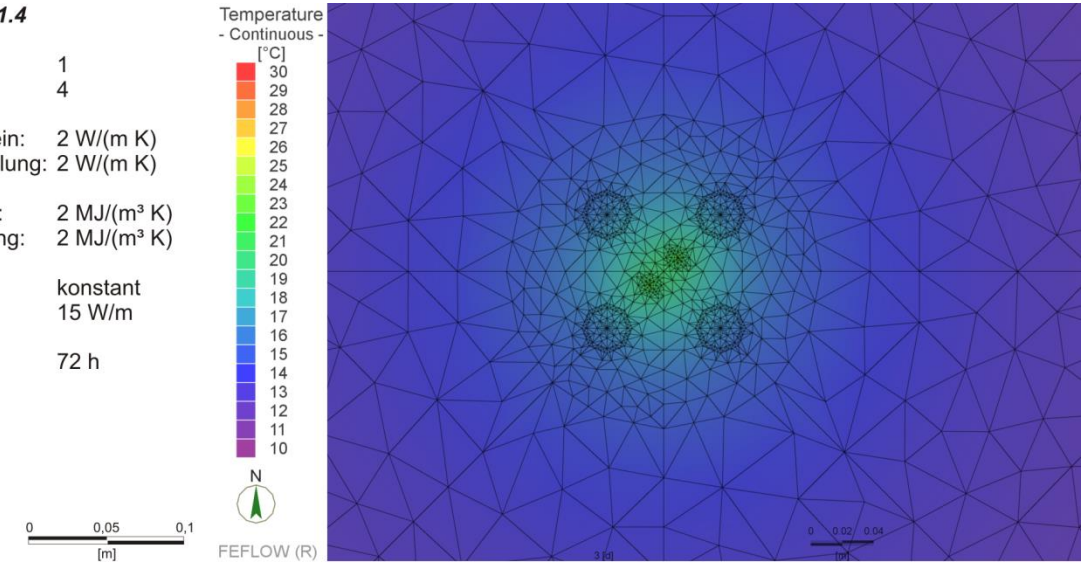
Modellname: eTRT_04-1.1

Modellnr.: 1
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



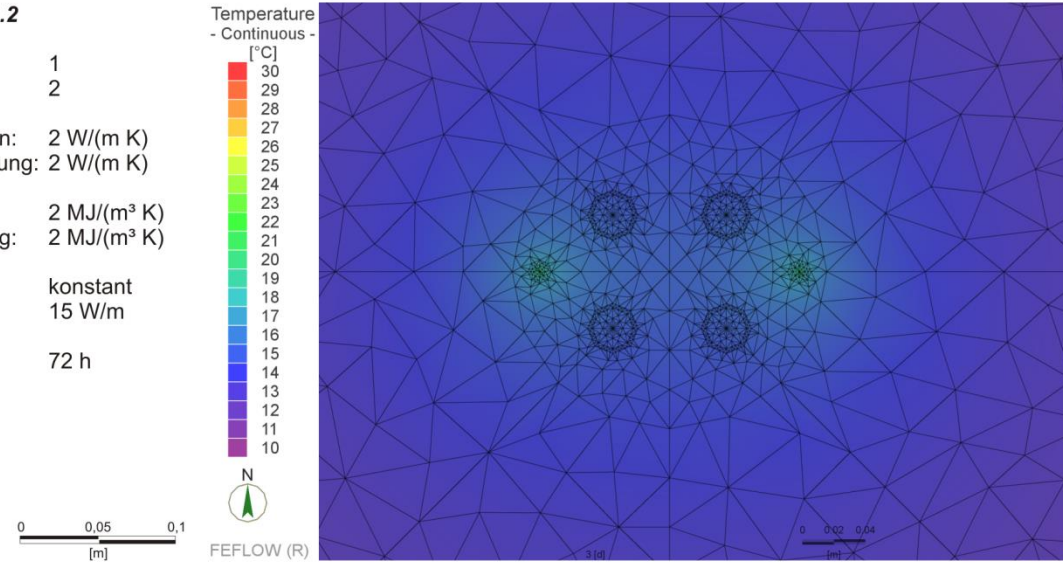
Modellname: eTRT_04-1.4

Modellnr.: 1
 Modellposition: 4
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



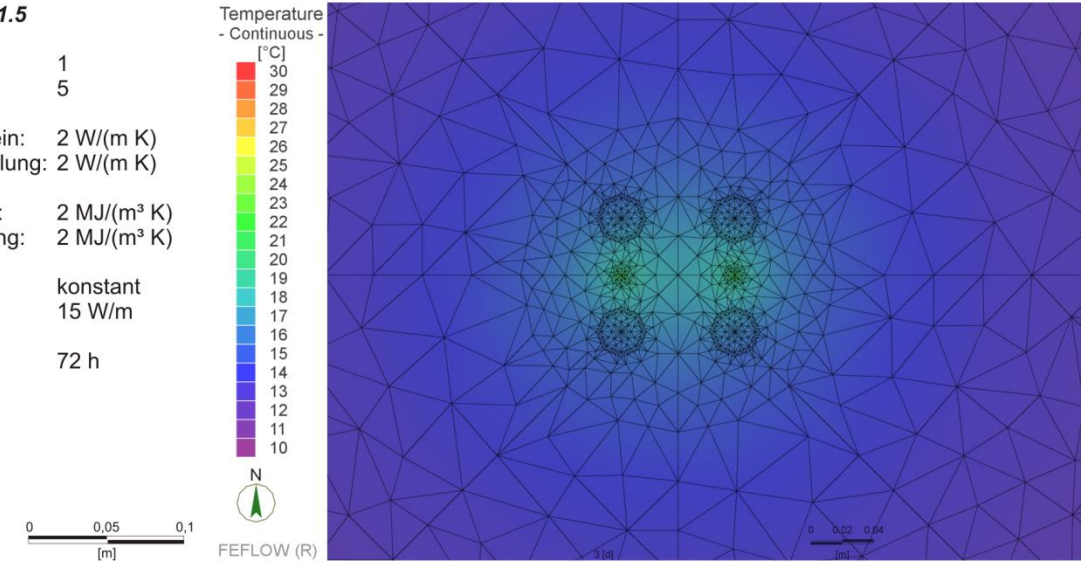
Modellname: eTRT_04-1.2

Modellnr.: 1
 Modellposition: 2
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



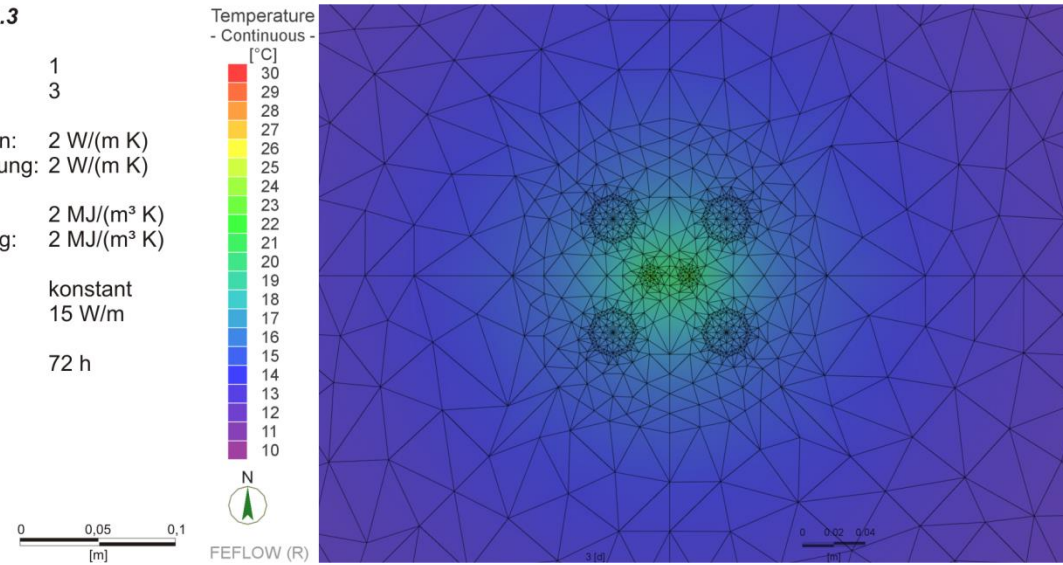
Modellname: eTRT_04-1.5

Modellnr.: 1
 Modellposition: 5
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-1.3

Modellnr.: 1
 Modellposition: 3
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-1.6

Modellnr.: 1
 Modellposition: 6
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

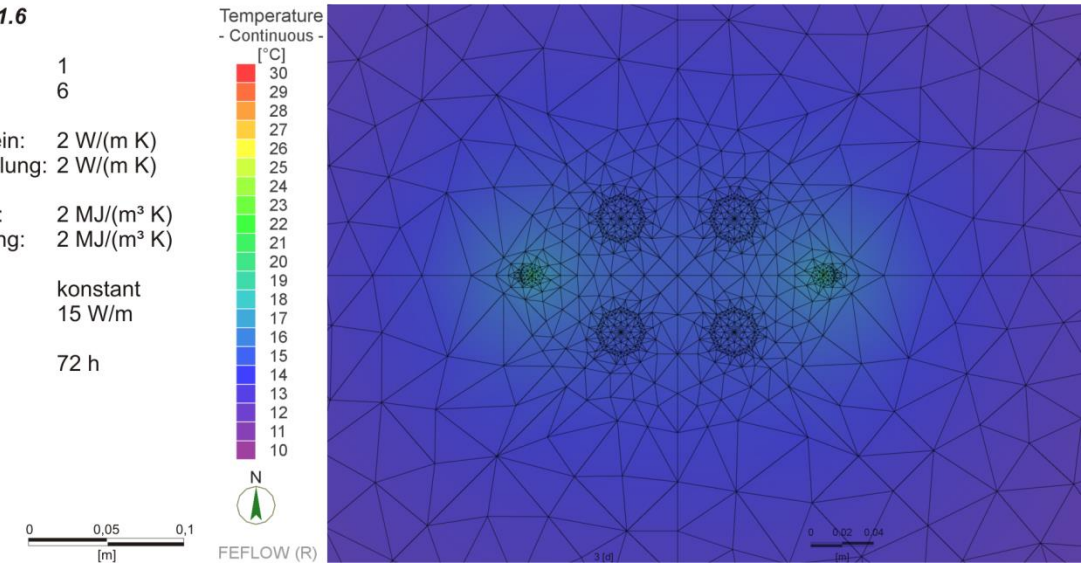
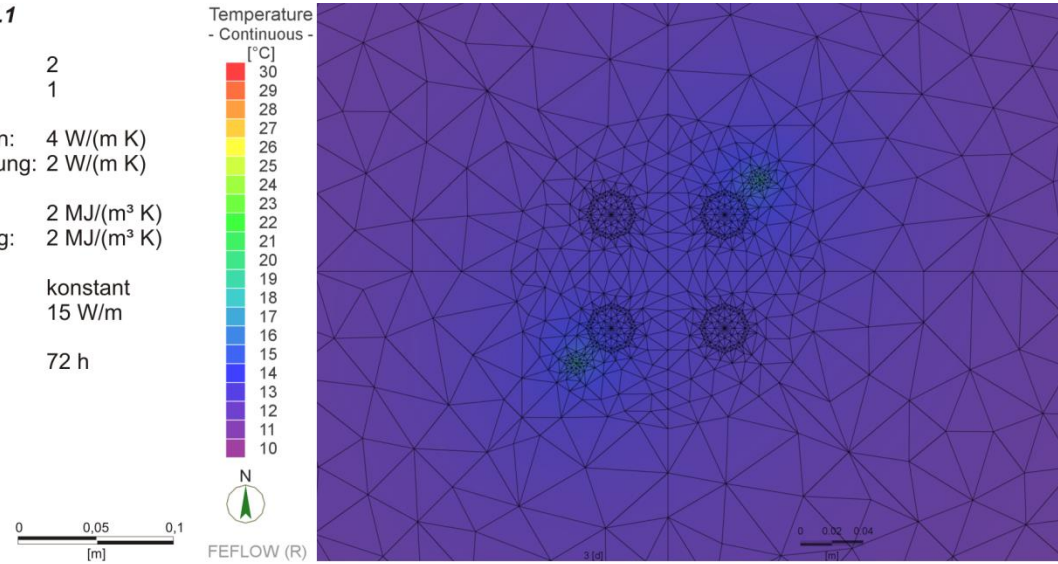


Abbildung II-3.8 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-1.1 bis 1.6.

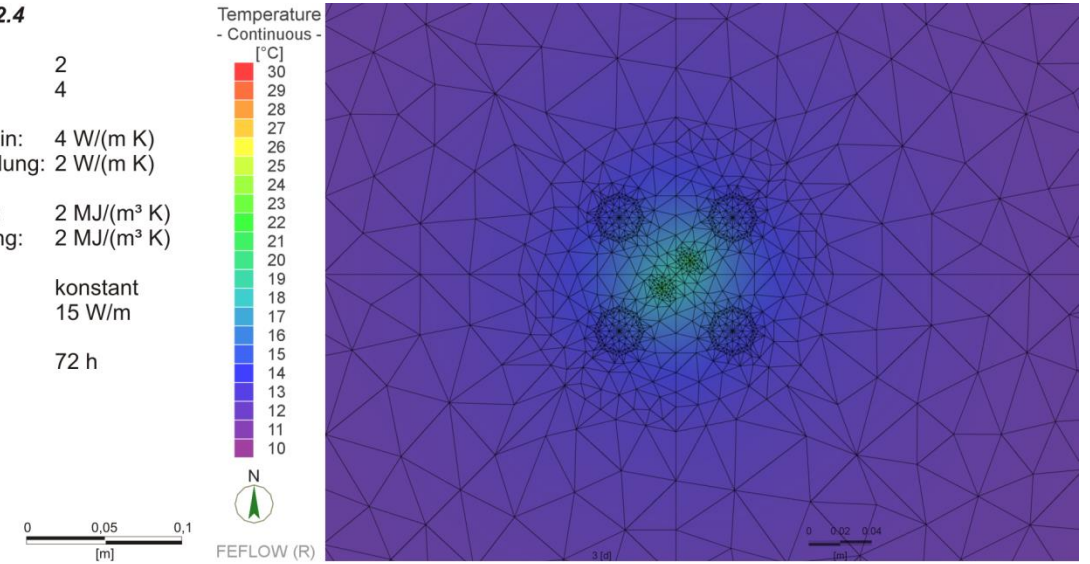
Modellname: eTRT_04-2.1

Modellnr.: 2
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



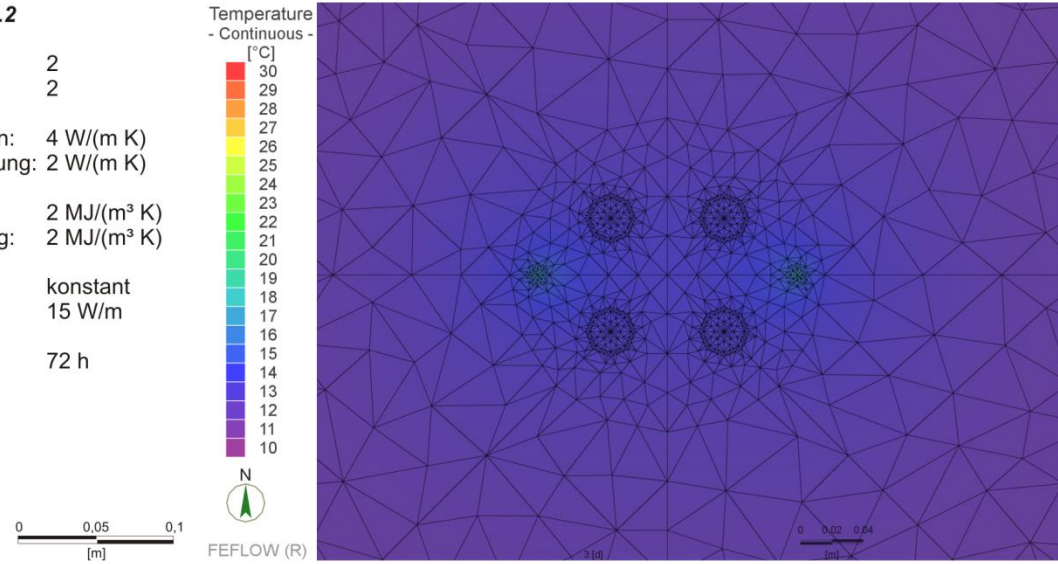
Modellname: eTRT_04-2.4

Modellnr.: 2
 Modellposition: 4
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



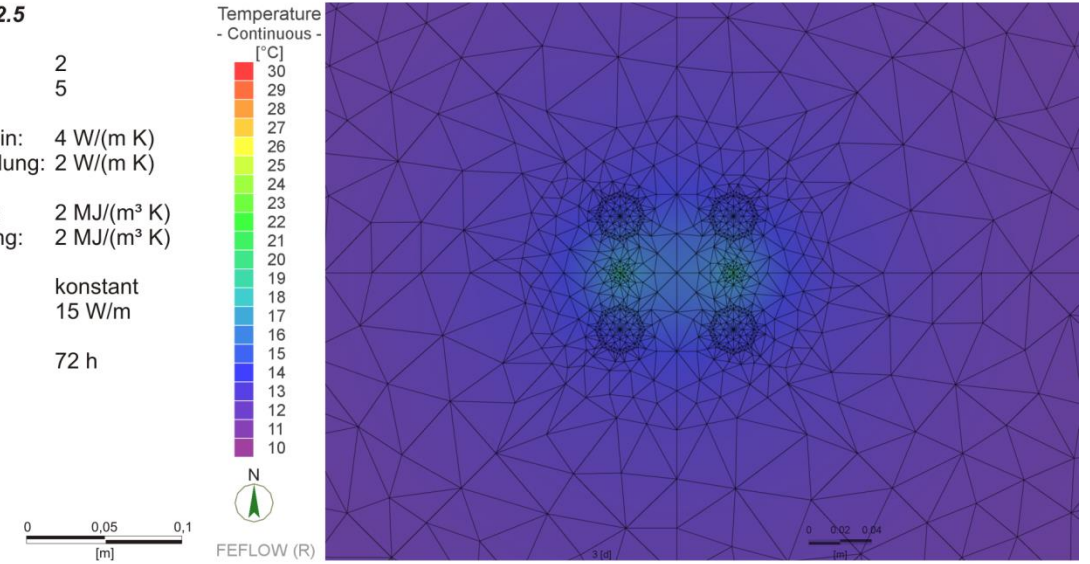
Modellname: eTRT_04-2.2

Modellnr.: 2
 Modellposition: 2
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



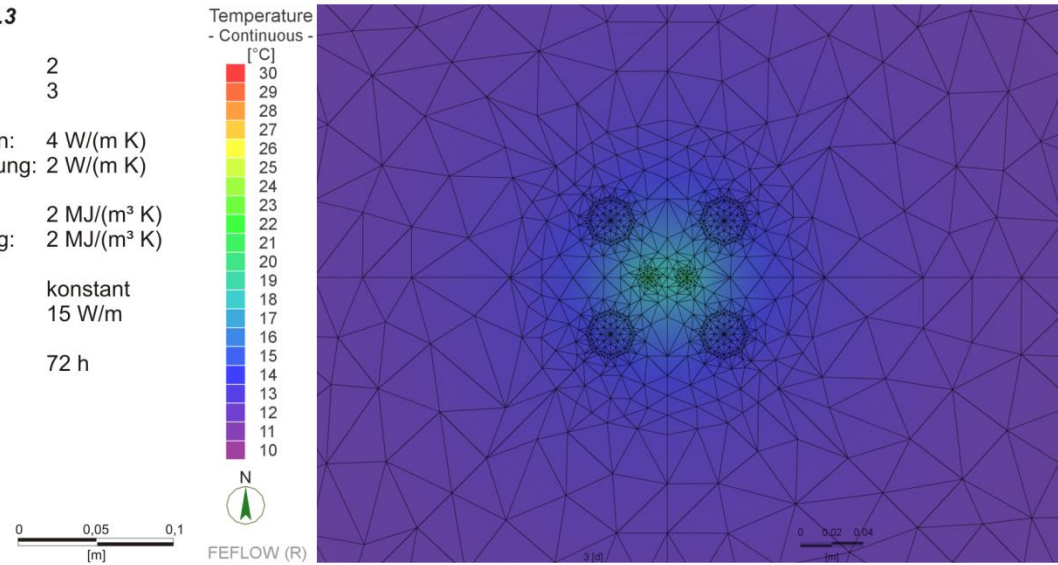
Modellname: eTRT_04-2.5

Modellnr.: 2
 Modellposition: 5
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-2.3

Modellnr.: 2
 Modellposition: 3
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-2.6

Modellnr.: 2
 Modellposition: 6
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

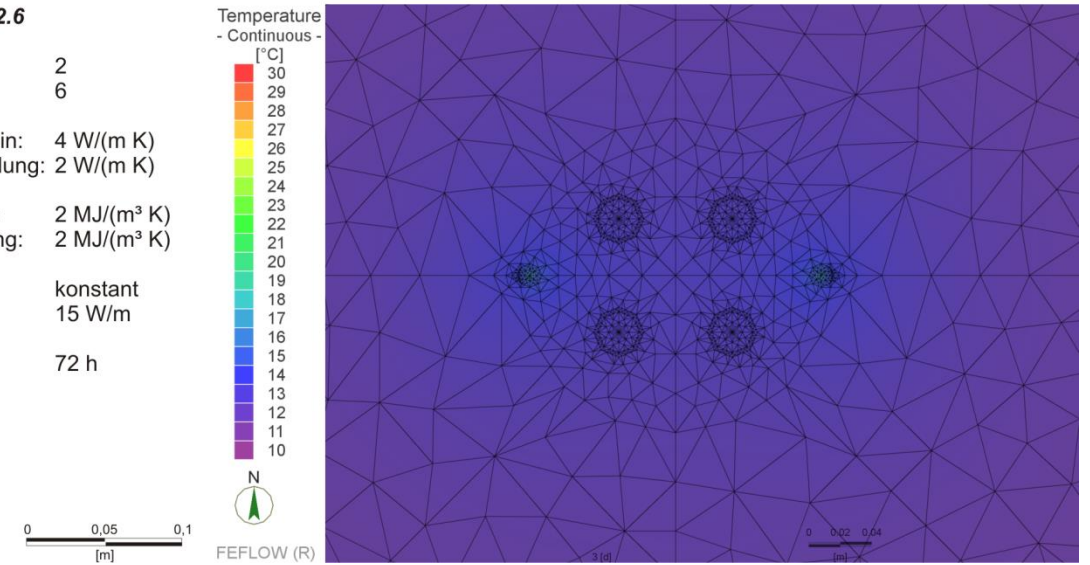
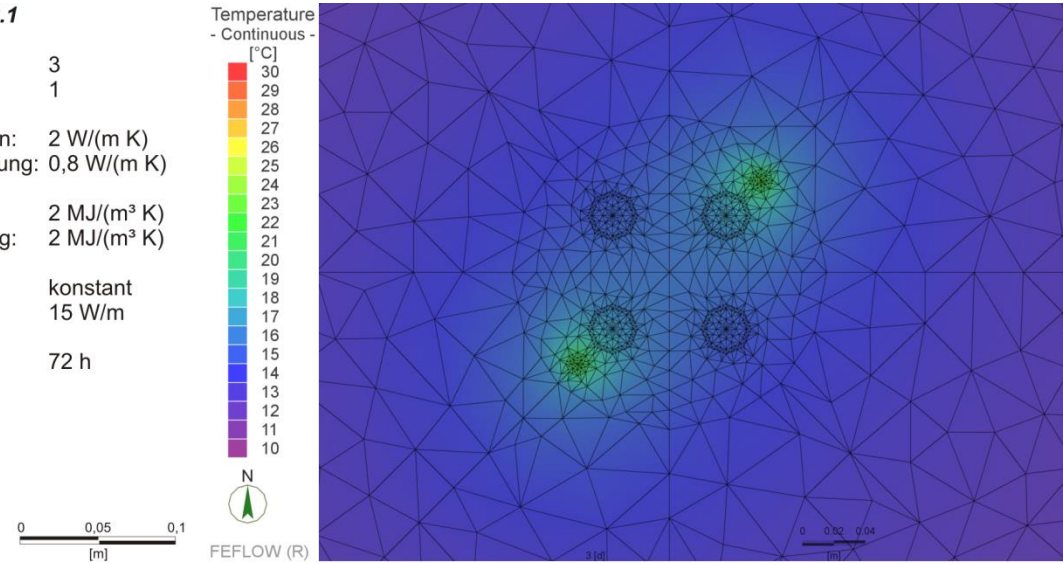


Abbildung II-3.9 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-2.1 bis 2.6.

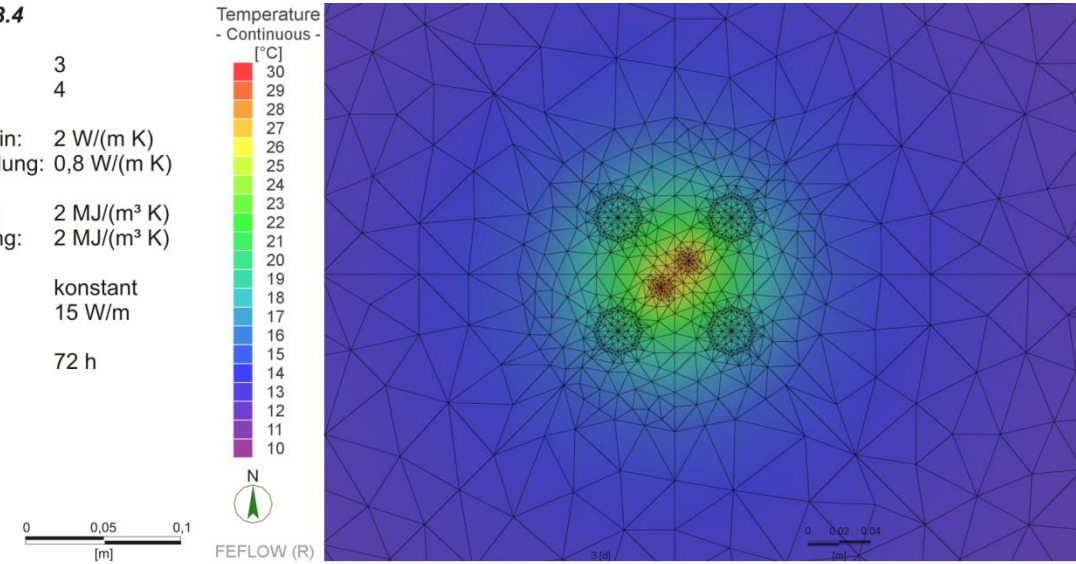
Modellname: eTRT_04-3.1

Modellnr.: 3
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



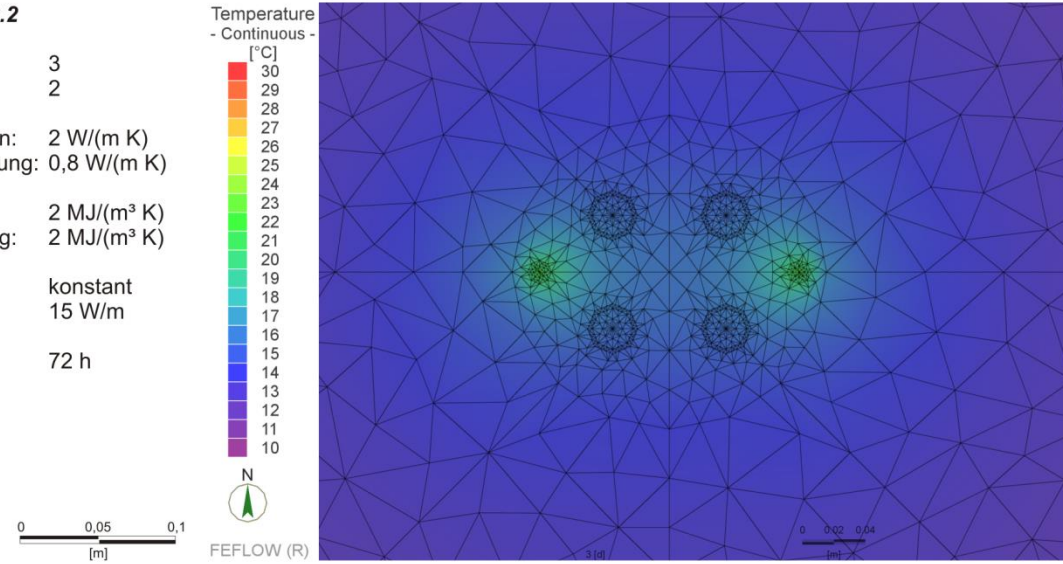
Modellname: eTRT_04-3.4

Modellnr.: 3
 Modellposition: 4
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



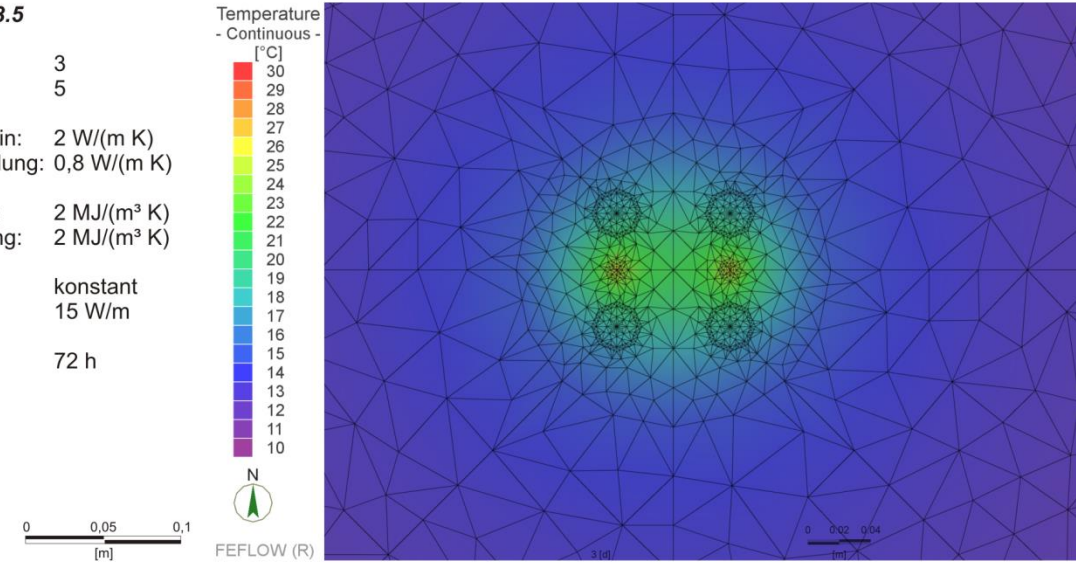
Modellname: eTRT_04-3.2

Modellnr.: 3
 Modellposition: 2
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



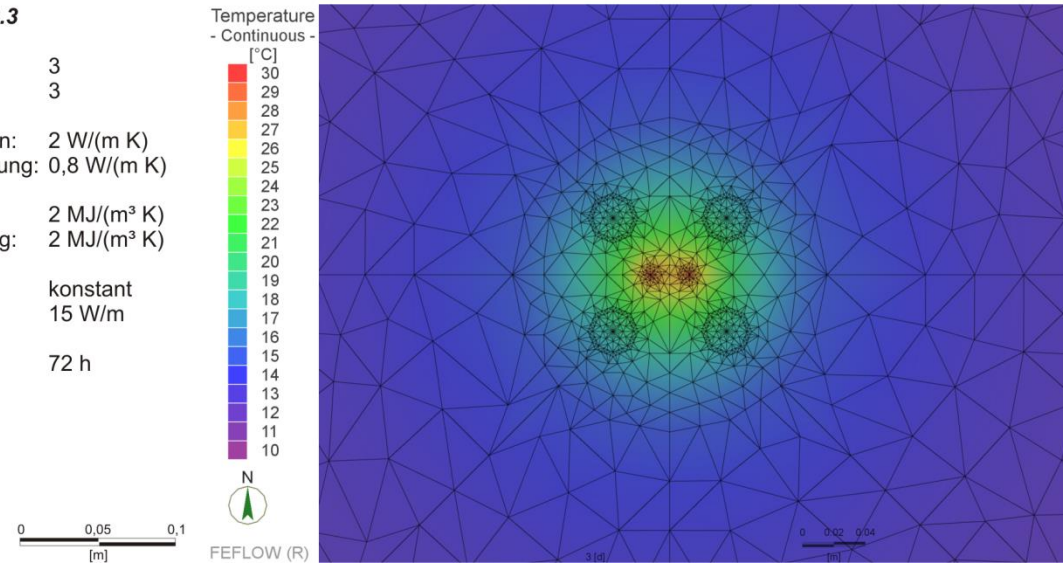
Modellname: eTRT_04-3.5

Modellnr.: 3
 Modellposition: 5
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-3.3

Modellnr.: 3
 Modellposition: 3
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-3.6

Modellnr.: 3
 Modellposition: 6
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

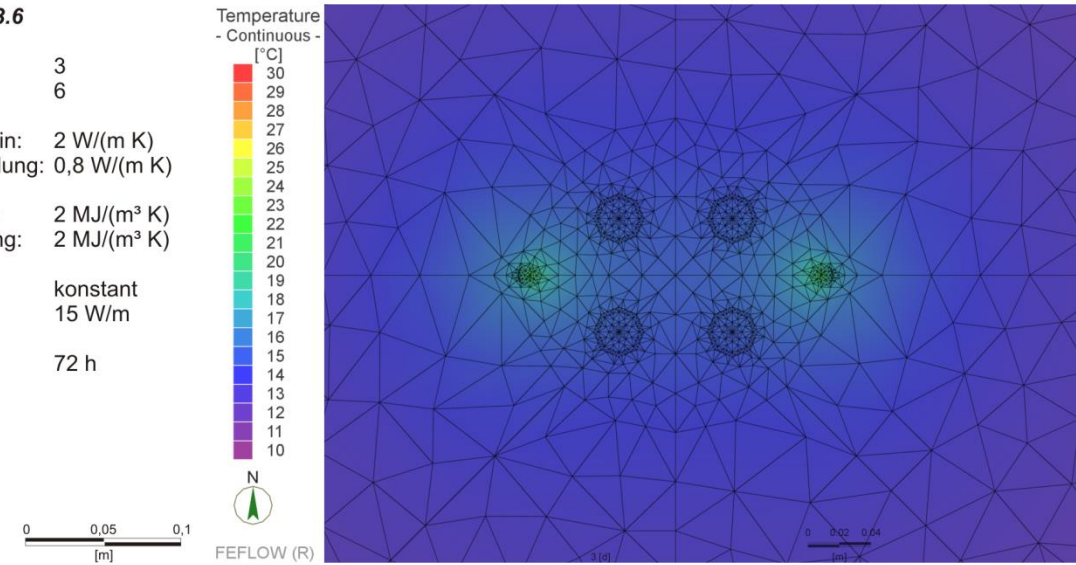
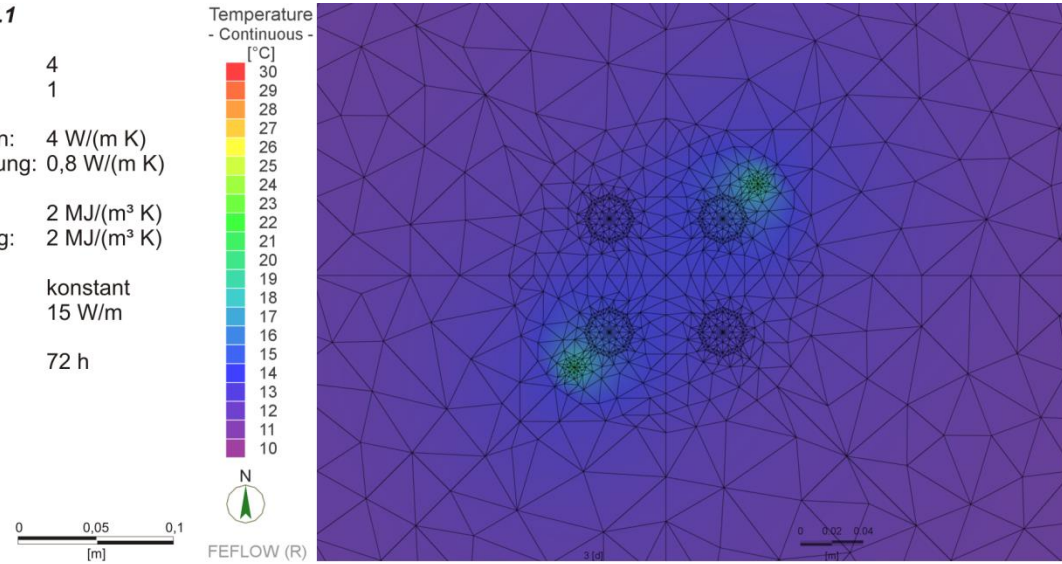


Abbildung II-3.10 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-3.1 bis 3.6.

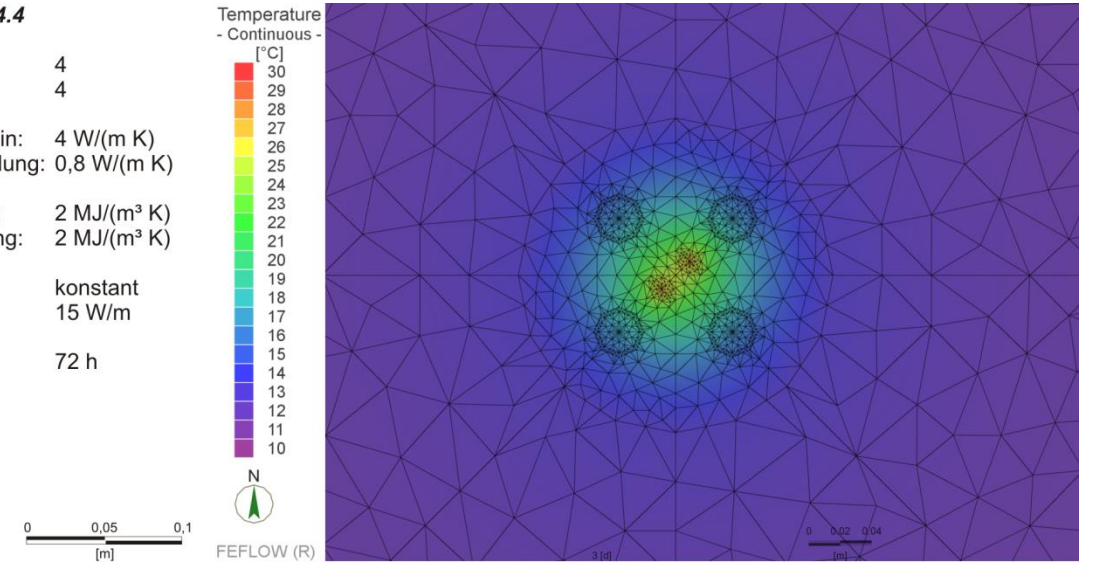
Modellname: eTRT_04-4.1

Modellnr.: 4
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



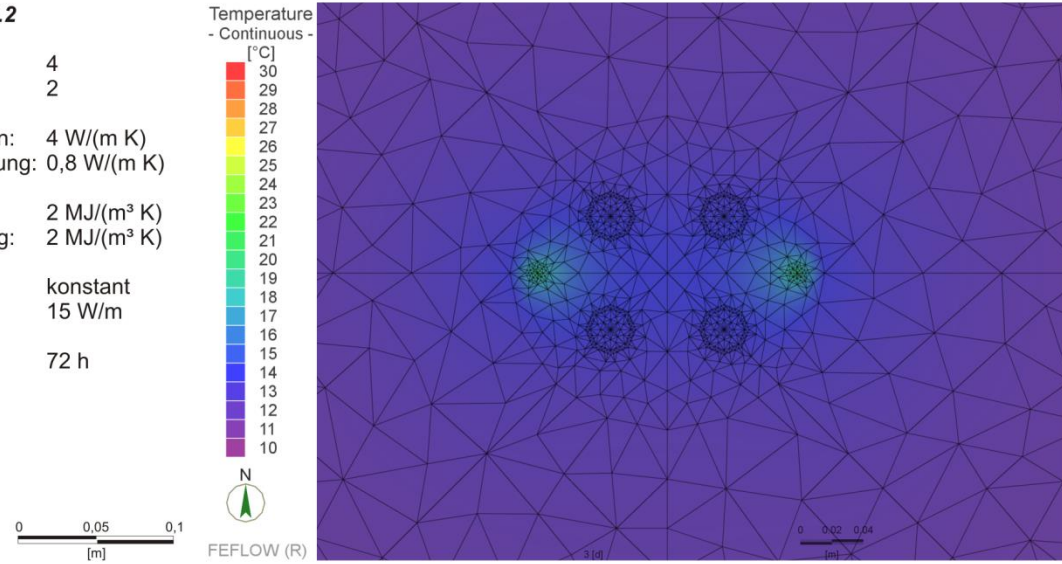
Modellname: eTRT_04-4.4

Modellnr.: 4
 Modellposition: 4
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



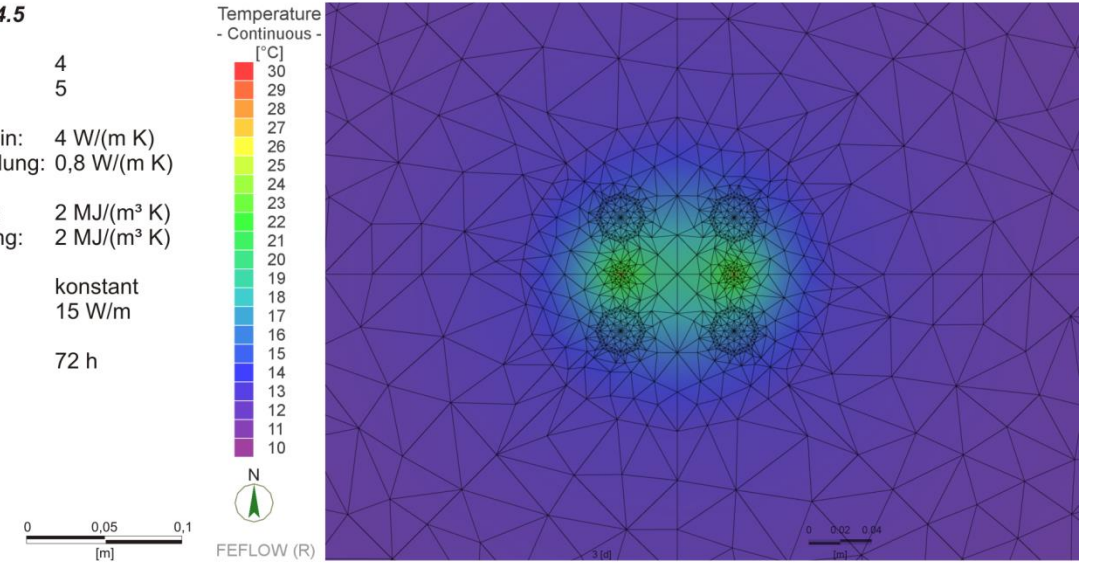
Modellname: eTRT_04-4.2

Modellnr.: 4
 Modellposition: 2
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



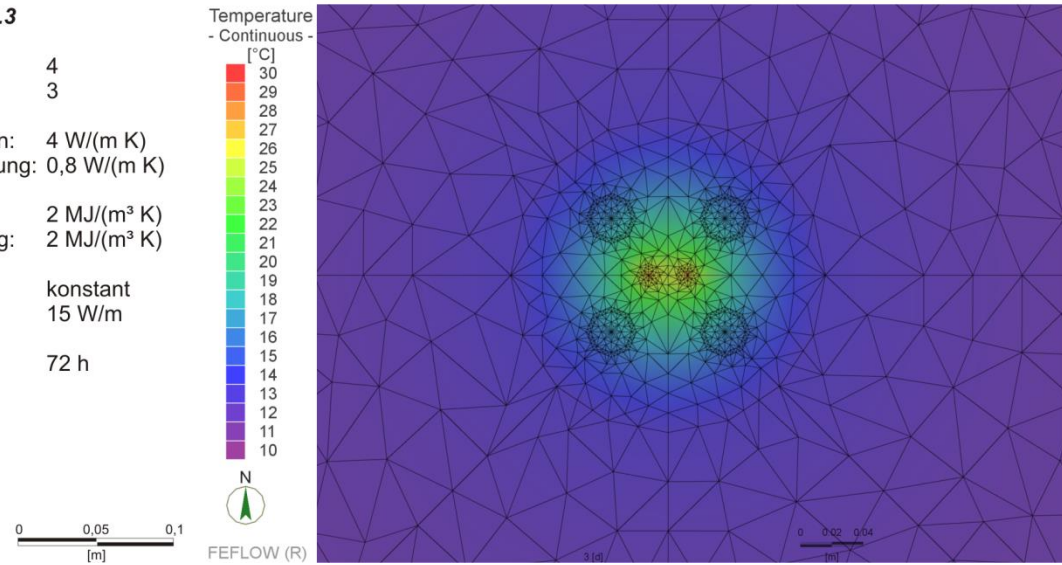
Modellname: eTRT_04-4.5

Modellnr.: 4
 Modellposition: 5
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-4.3

Modellnr.: 4
 Modellposition: 3
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-4.6

Modellnr.: 4
 Modellposition: 6
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 4 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 0,8 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

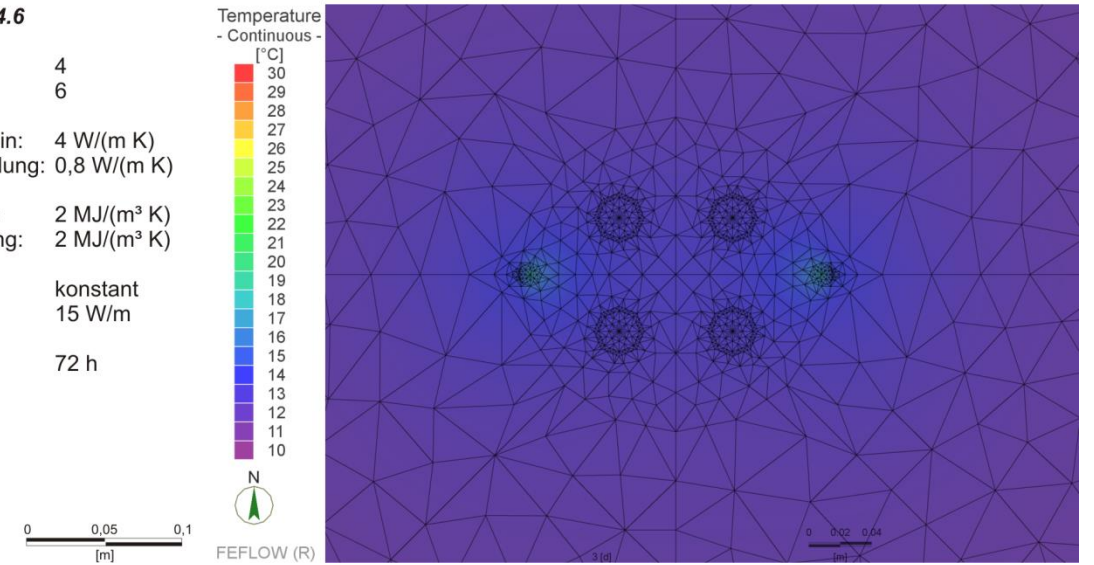
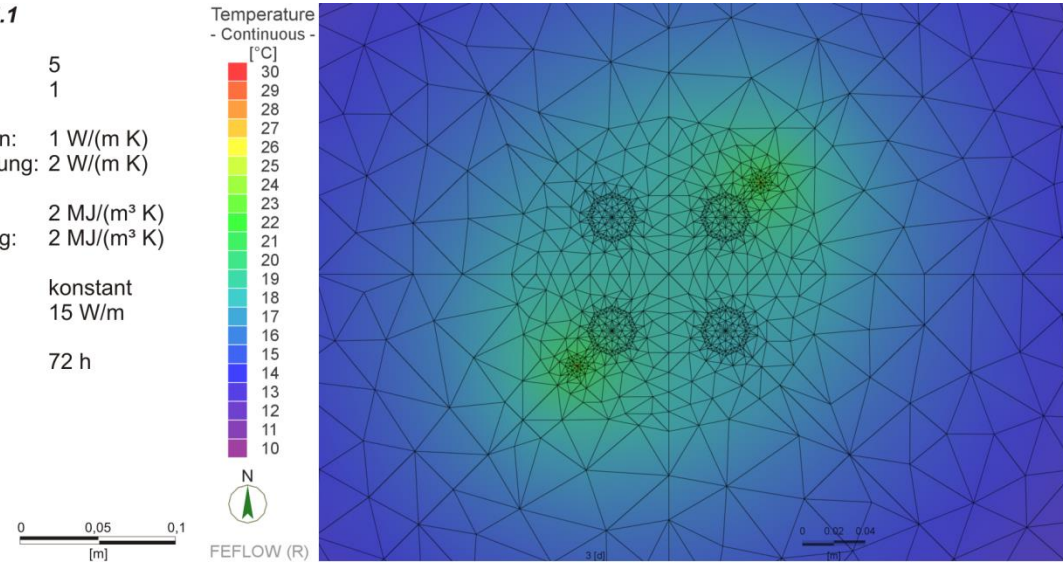


Abbildung II-3.11 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-4.1 bis 4.6.

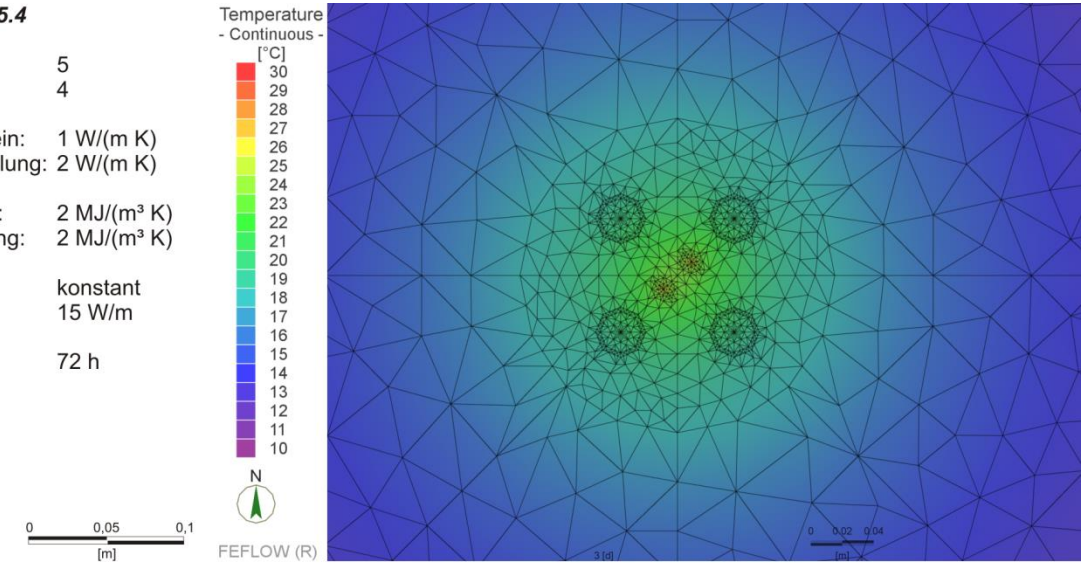
Modellname: eTRT_04-5.1

Modellnr.: 5
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



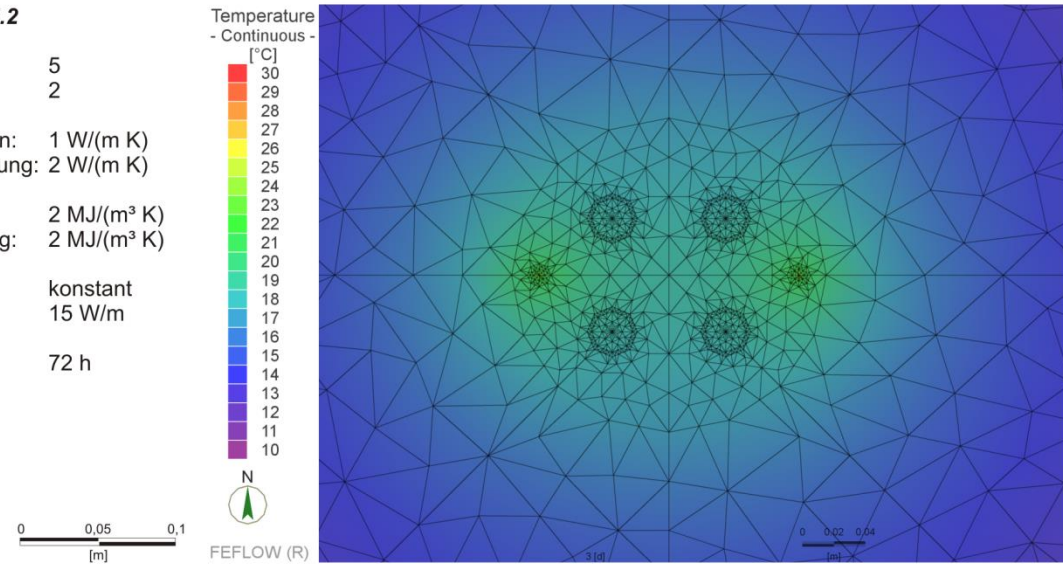
Modellname: eTRT_04-5.4

Modellnr.: 5
 Modellposition: 4
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



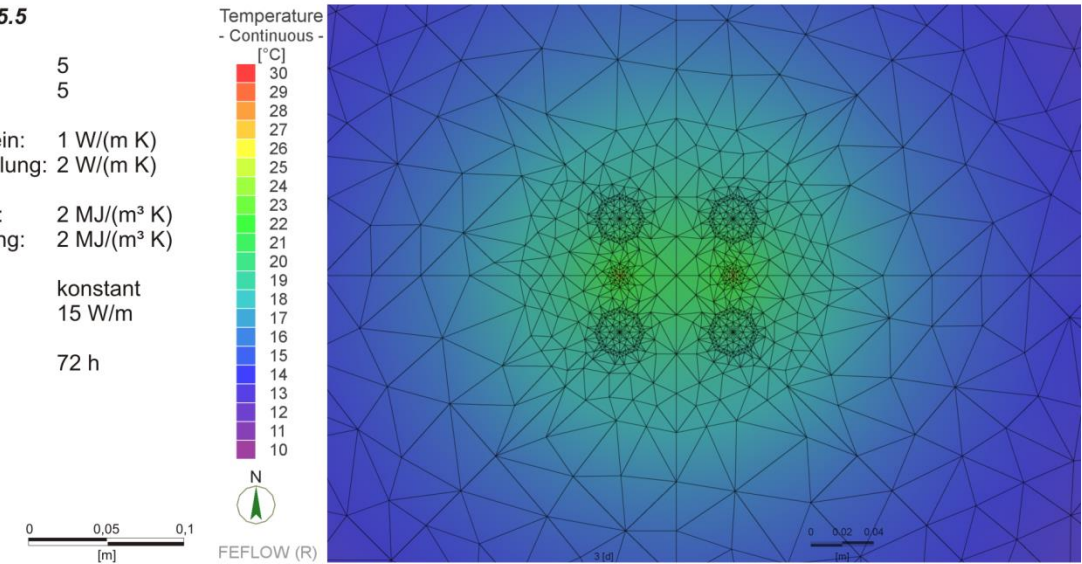
Modellname: eTRT_04-5.2

Modellnr.: 5
 Modellposition: 2
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



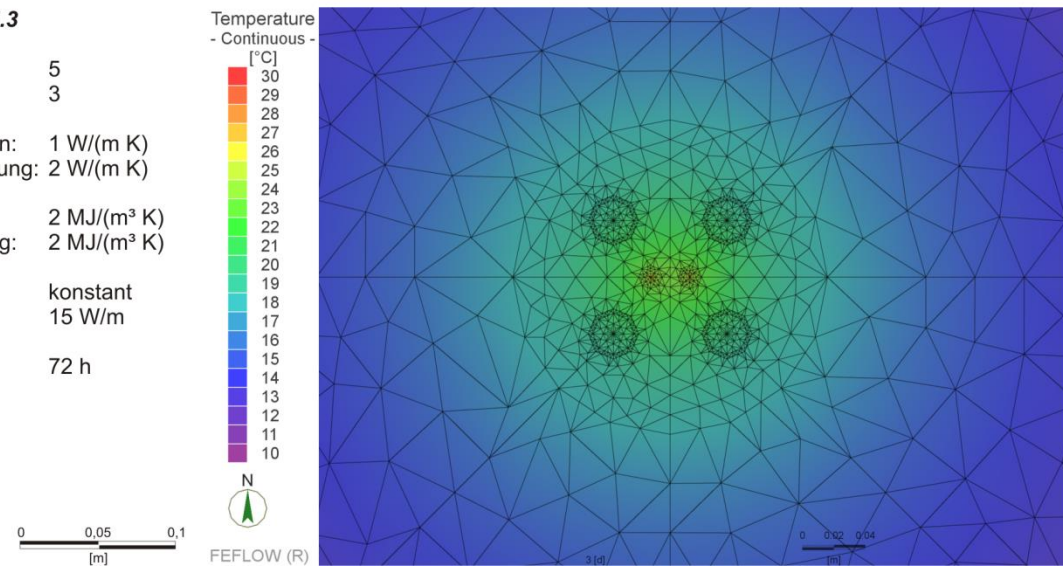
Modellname: eTRT_04-5.5

Modellnr.: 5
 Modellposition: 5
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-5.3

Modellnr.: 5
 Modellposition: 3
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_04-5.6

Modellnr.: 5
 Modellposition: 6
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

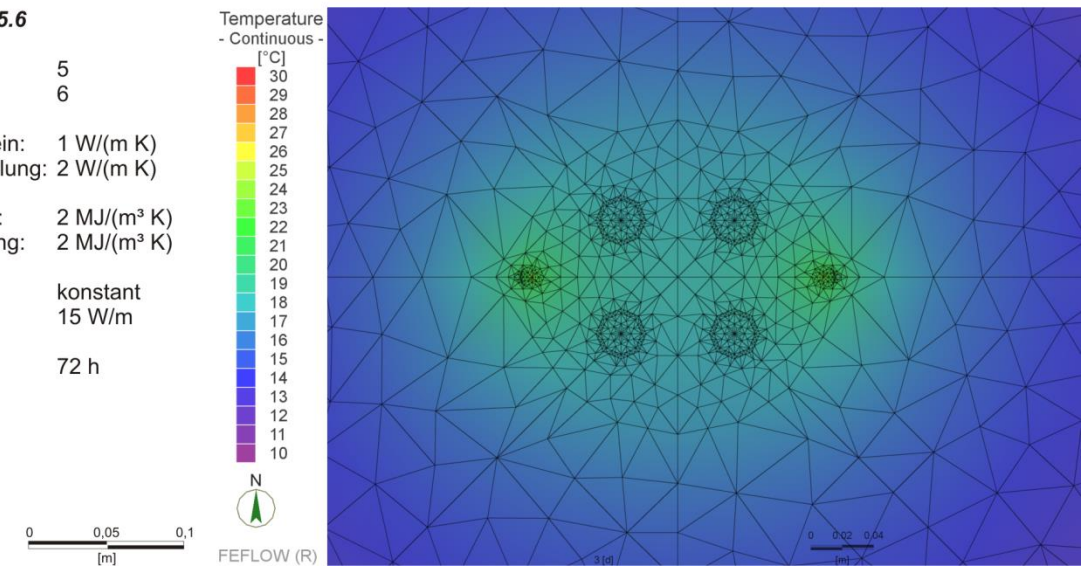


Abbildung II-3.12 Ergebnisse der 6 Modellpositionen von Modell eTRT_04-5.1 bis 5.6.

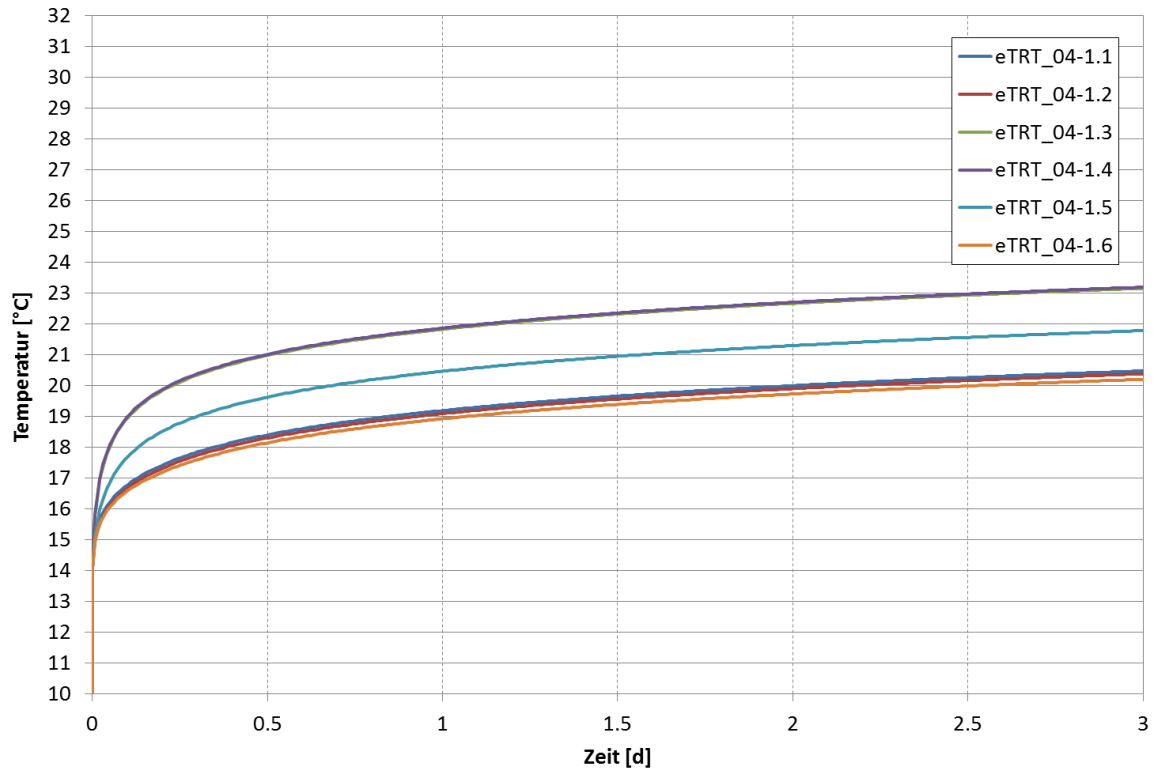


Abbildung II-3.13 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-1.1 bis 1.6.

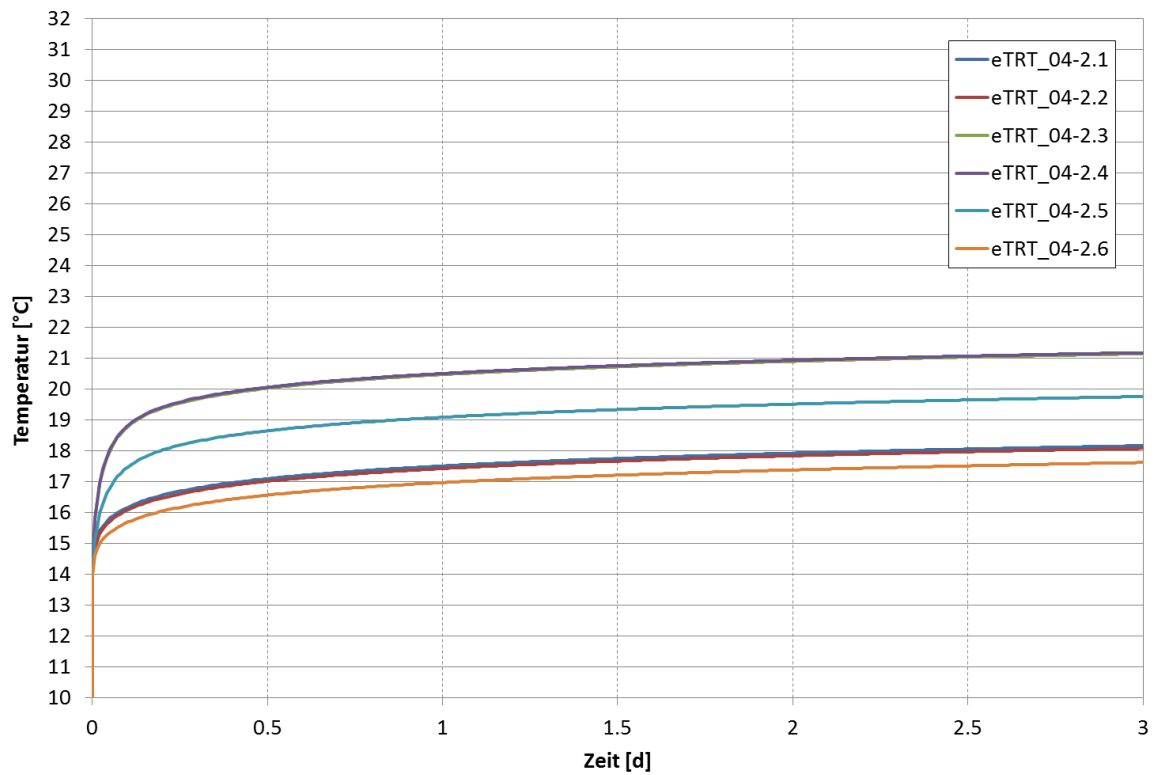


Abbildung II-3.14 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-2.1 bis 2.6.

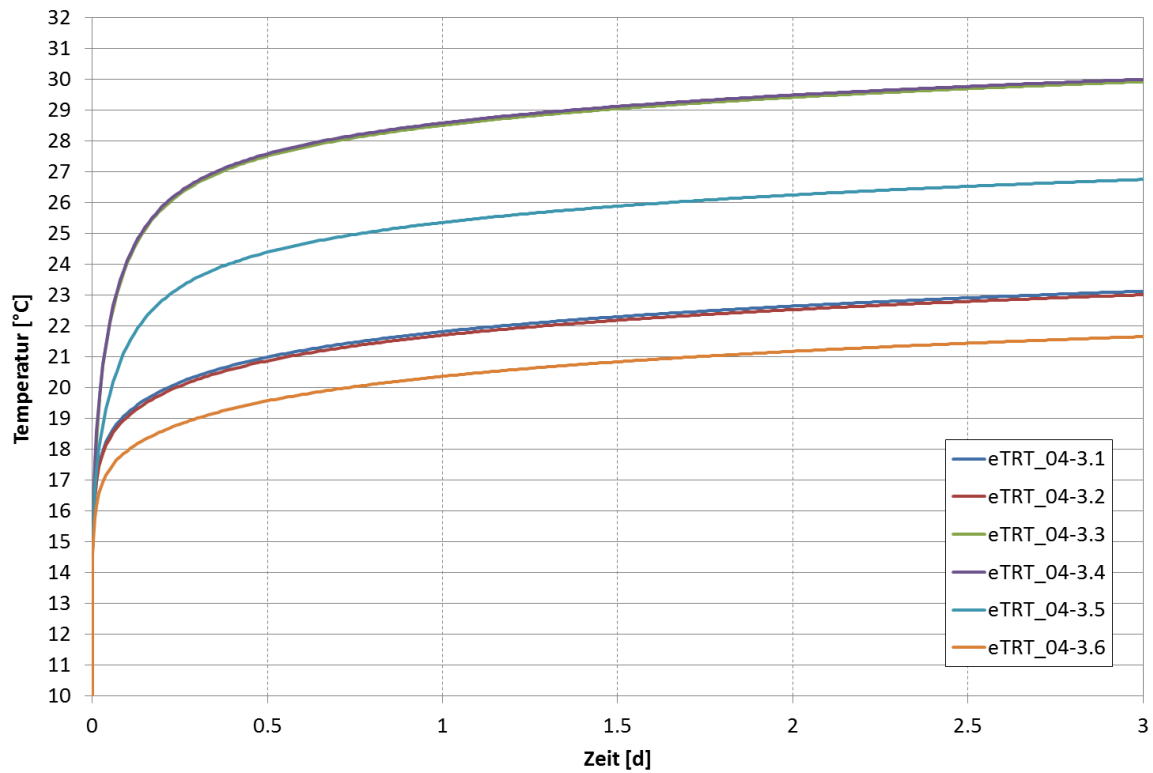


Abbildung II-3.15 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-3.1 bis 3.6.

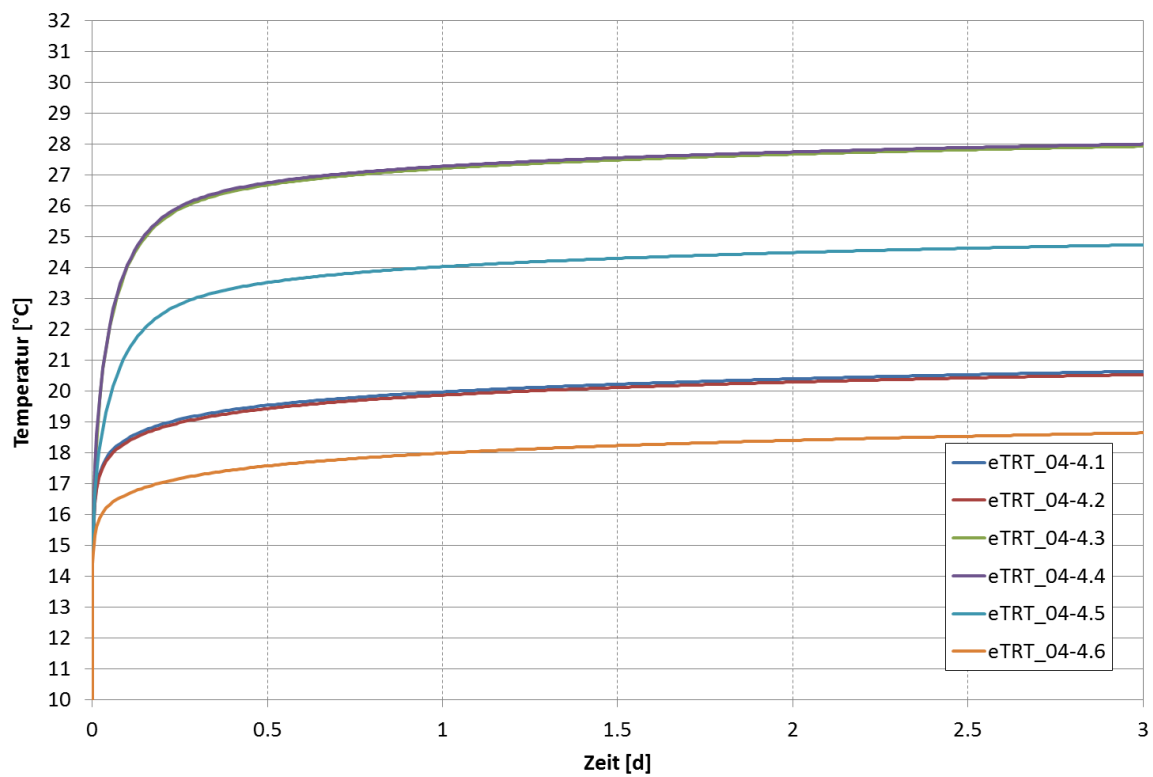


Abbildung II-3.16 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-4.1 bis 4.6.

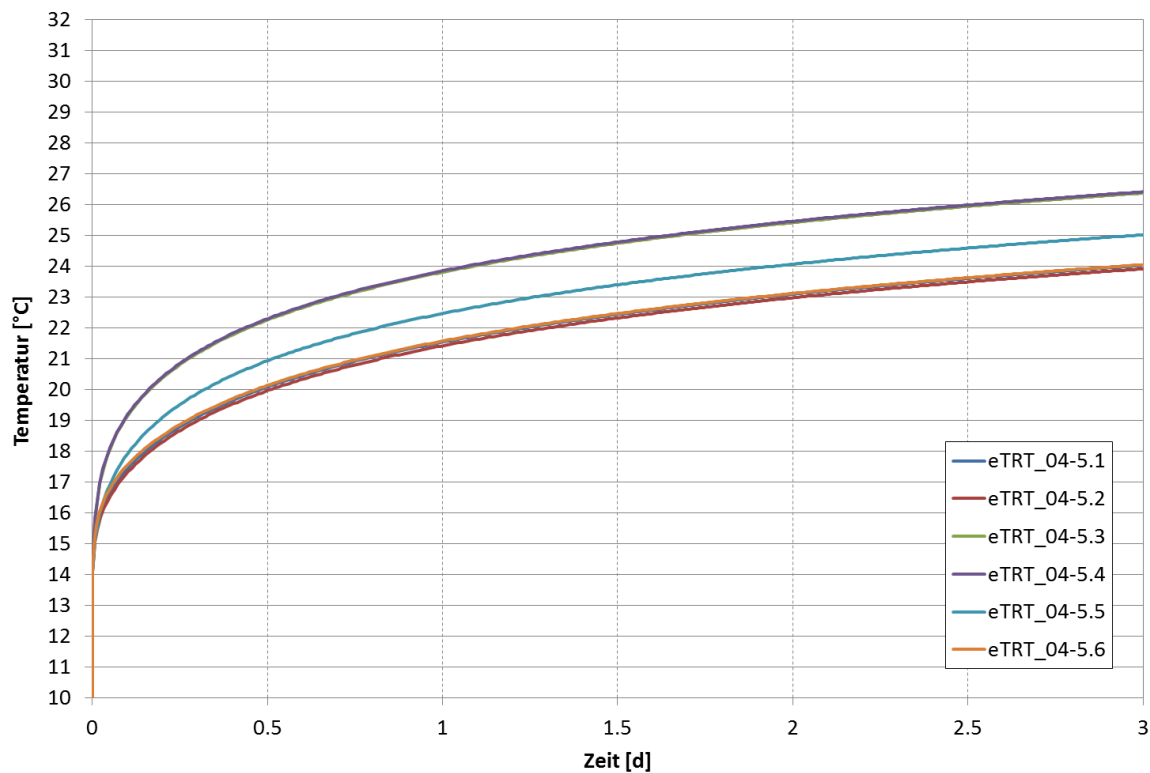


Abbildung II-3.17 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-5.1 bis 5.6.

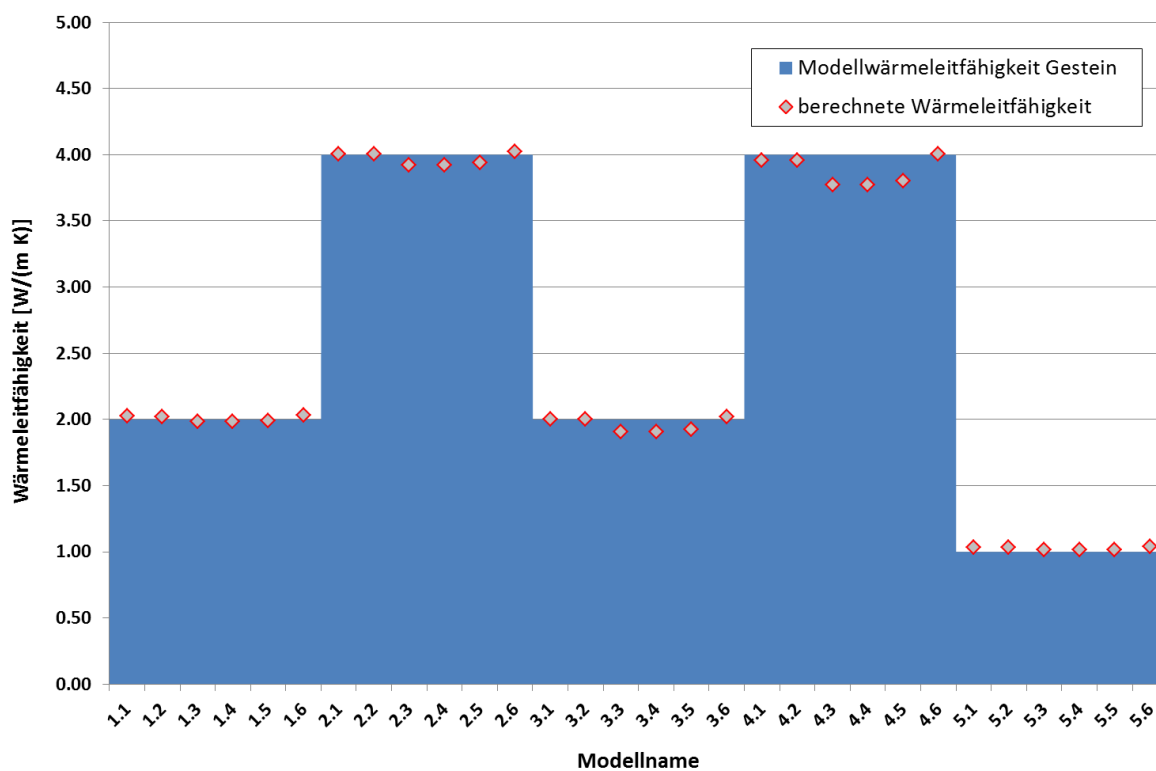


Abbildung II-3.18 Verteilung der berechneten Wärmeleitfähigkeit (rot-graue Punkte) und der den Modellen vorgegebenen Gesteinswärmeleitfähigkeiten (blaue Balken) der Modelle eTRT_04-1.1 bis 5.6.

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).

Tabelle II-3.11 Mittlere Abweichung der Wärmeleitfähigkeiten bei verschiedenen Modellpositionen.

Modellposition	Mittlere Abweichung [%]
1	1,2
2	1,1
3	2,9
4	2,9
5	2,5
6	1,5

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 Temperaturentwicklung 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 Wärmeleitfähigkeiten der beiden angrenzenden Gesteinseinheiten dar (Tab. II-3.13). Die Abweichung vom jeweiligen Mittelwert der oberen, bzw. unteren Schicht zur mittleren Schicht beträgt maximal 2% (Tab. II-3.13).

Modellname: eTRT_05-1

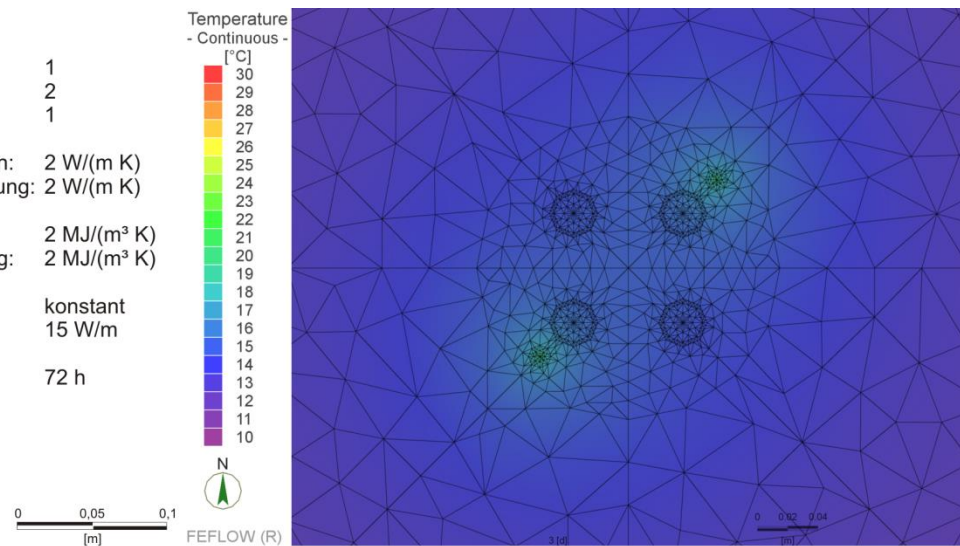
Modellnr.: 1
 Slice: 2
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_05-1**

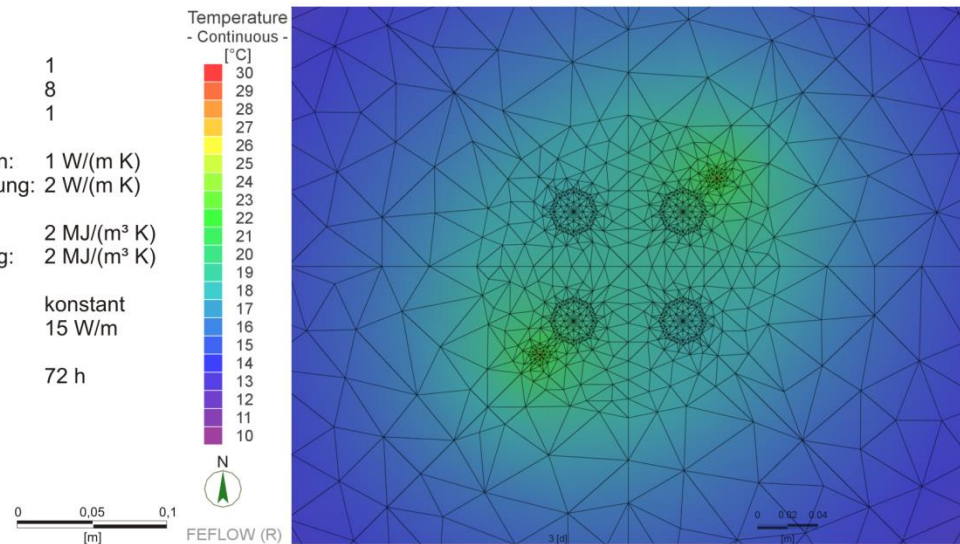
Modellnr.: 1
 Slice: 8
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 1 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_05-1**

Modellnr.: 1
 Slice: 14
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

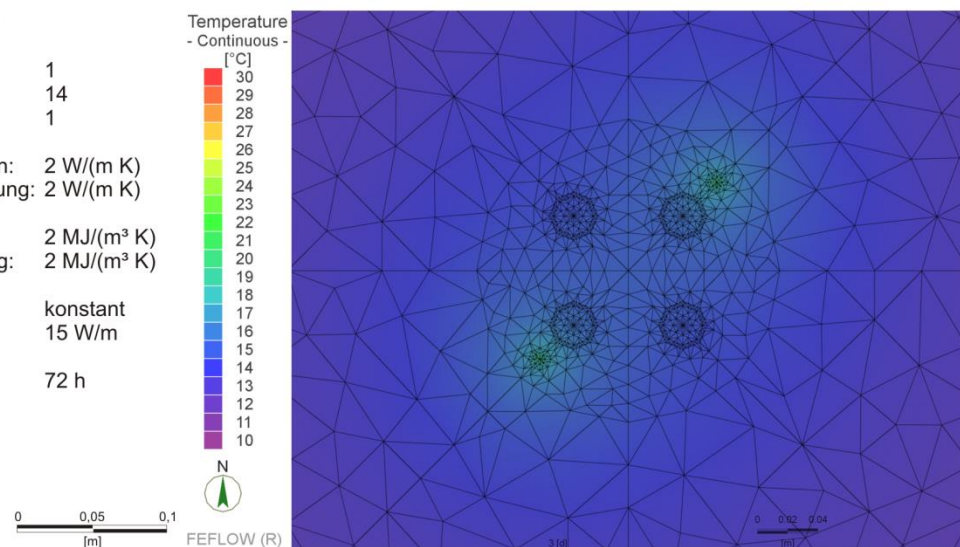


Abbildung II-3.19 Ergebnisse der Modelle eTRT_05-1 auf Slice 02, 08 und 14.

Modellname: eTRT_05-2

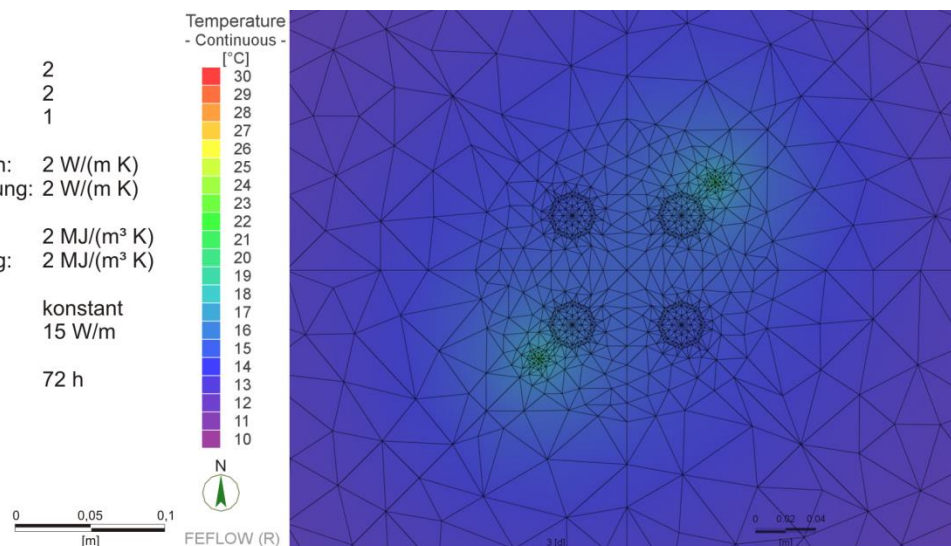
Modellnr.: 2
 Slice: 2
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_05-2**

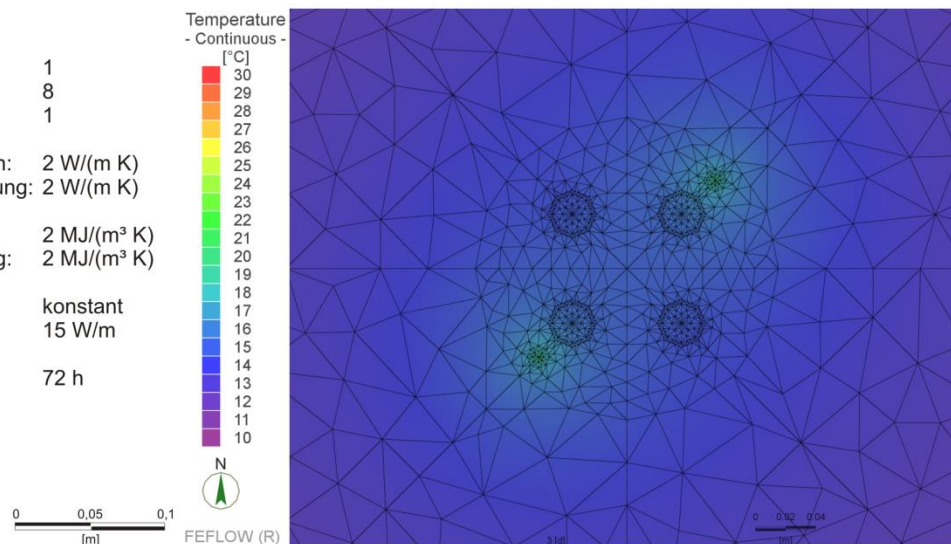
Modellnr.: 1
 Slice: 8
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_05-2**

Modellnr.: 1
 Slice: 14
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

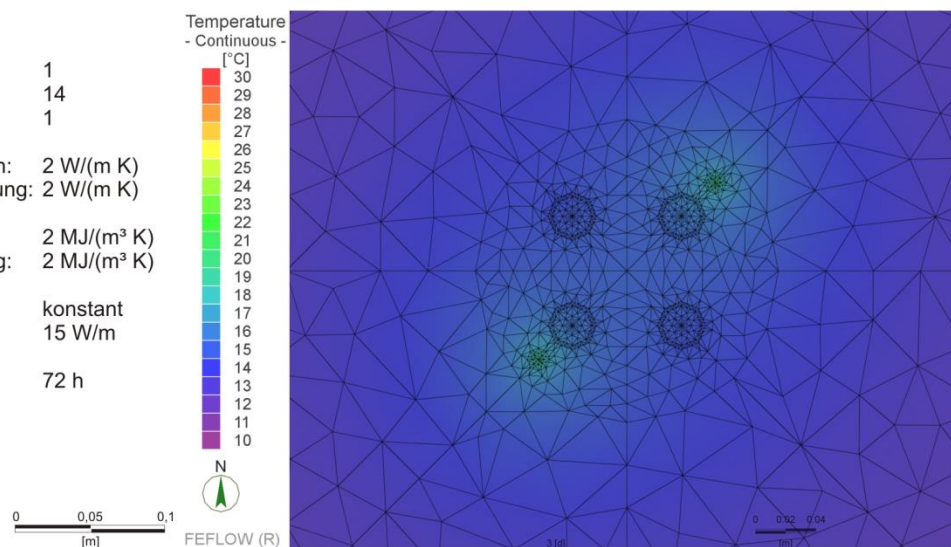


Abbildung II-3.20 Ergebnisse der Modelle eTRT_05-2 auf Slice 02, 08 und 14.

Modellname: eTRT_05-3

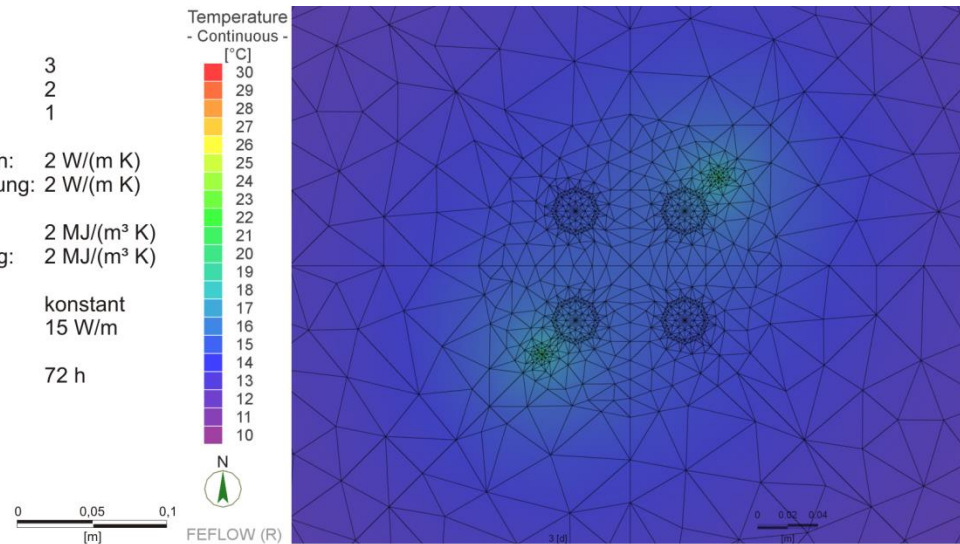
Modellnr.: 3
 Slice: 2
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_05-3**

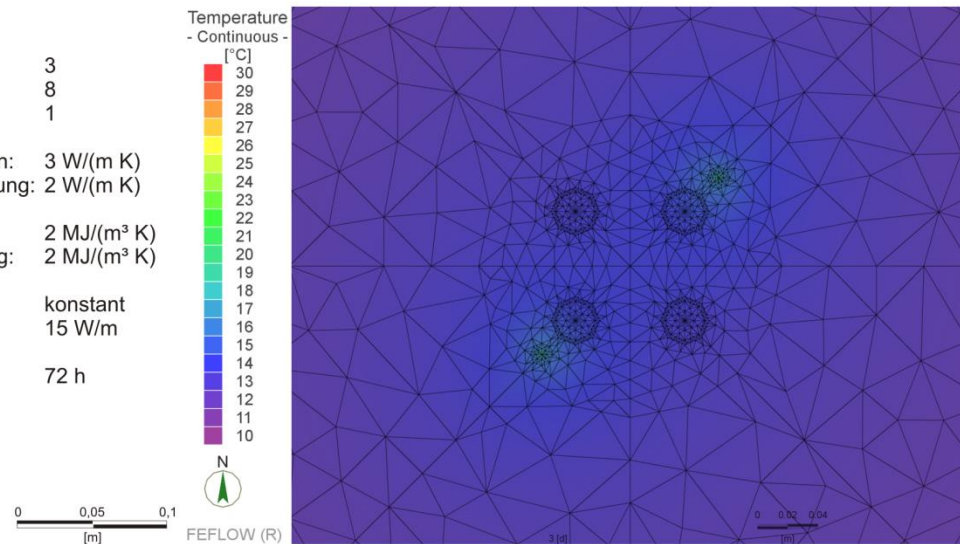
Modellnr.: 3
 Slice: 8
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 3 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_05-3**

Modellnr.: 3
 Slice: 14
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Testdauer: 72 h

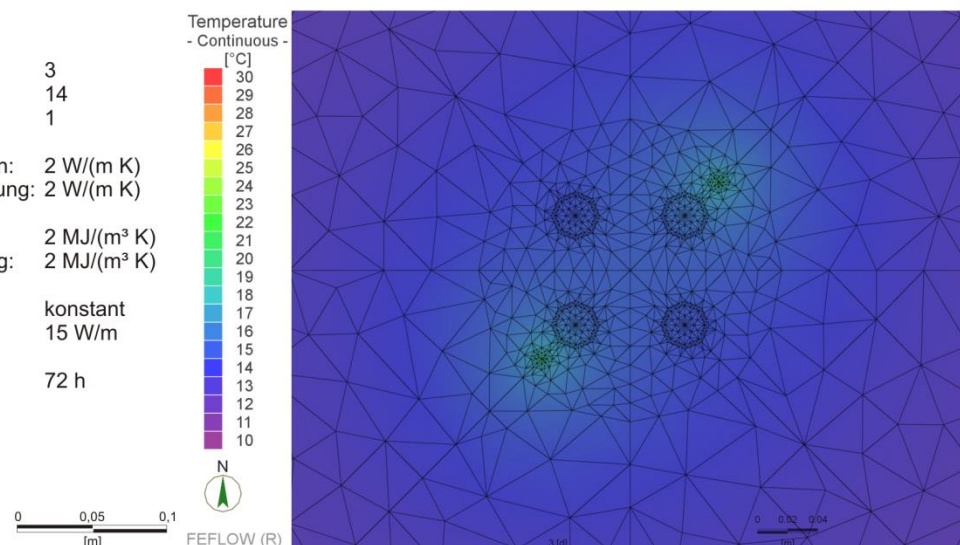


Abbildung II-3.21 Ergebnisse der Modelle eTRT_05-3 auf Slice 02, 08 und 14.

Tabelle II-3.12 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_05-1 bis 3.

Slice #	Tiefe m	Modell eTRT_05-1				Modell eTRT_05-2				Modell eTRT_05-3			
		λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %
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

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

Modell #	Slice #	λ_{rock} 1 W/(m K)	λ_{rock} 2 W/(m K)	Mittel- λ_{rock} W/(m K)	λ_{calc} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %
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

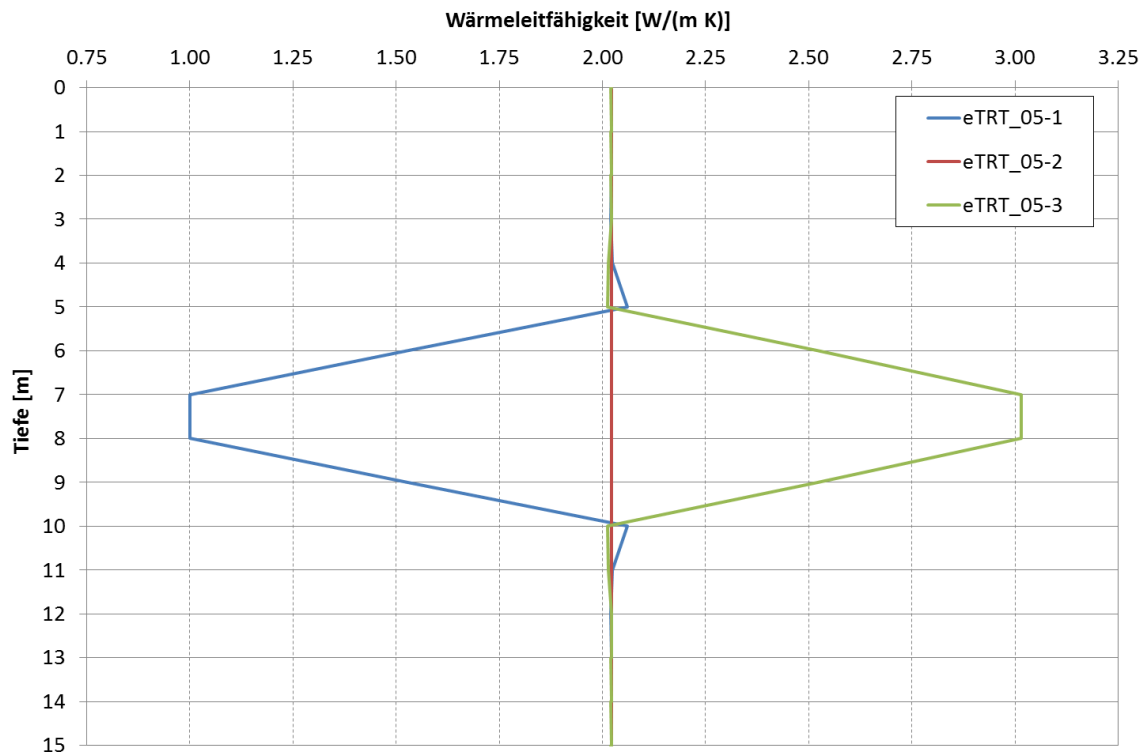


Abbildung II-3.22 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_05-1, 2 und 3 aufgetragen über die Modelltiefe.

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 ($\pm 5\%$ des Wärmeeintragswertes von 15 W/m), folgt auch die Temperaturkurve mit einem wellenförmigen Anstieg (Abb. II-3.27).

Modellname: eTRT_06-1

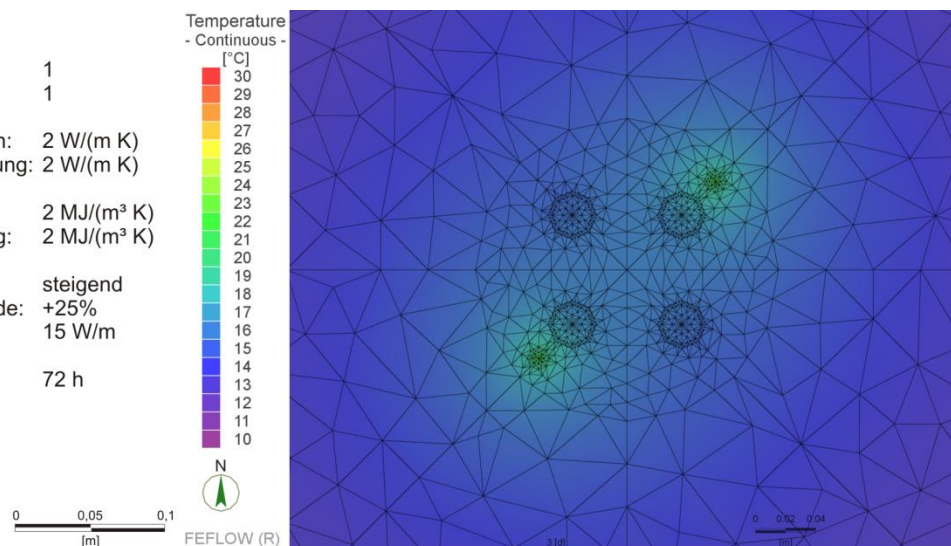
Modellnr.: 1
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: steigend
 Wärmeänderung Start-Ende: +25%
 Start-Wärmeleistung: 15 W/m

Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_06-2**

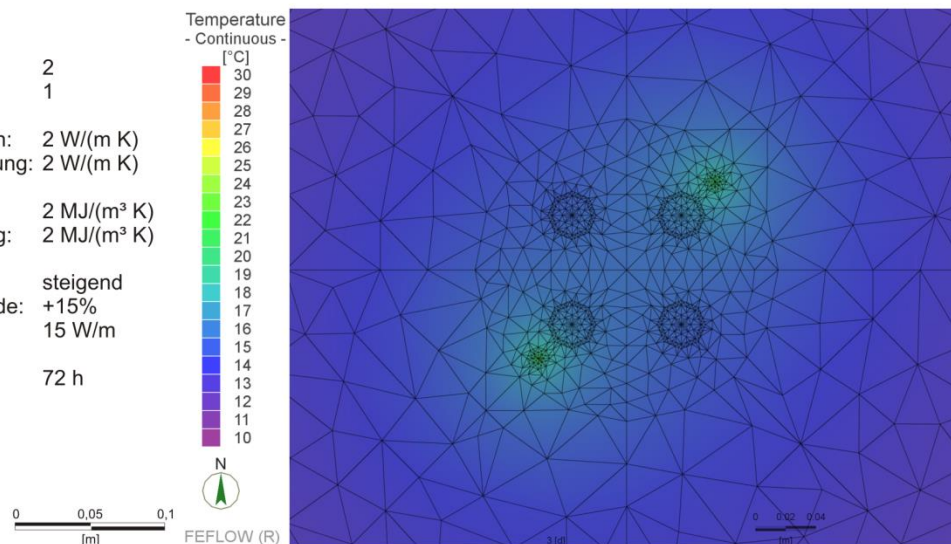
Modellnr.: 2
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: steigend
 Wärmeänderung Start-Ende: +15%
 Start-Wärmeleistung: 15 W/m

Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_06-3**

Modellnr.: 3
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: steigend
 Wärmeänderung Start-Ende: +5%
 Start-Wärmeleistung: 15 W/m

Testdauer: 72 h

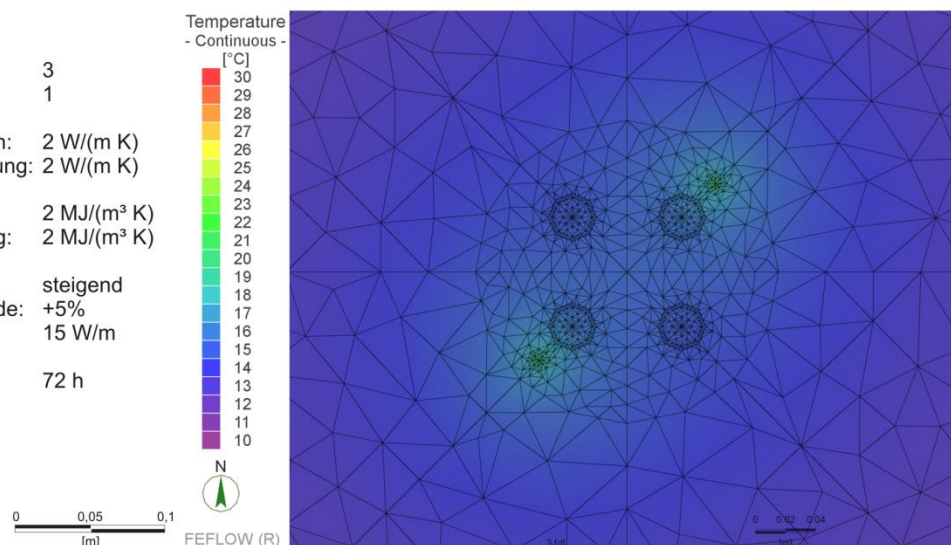
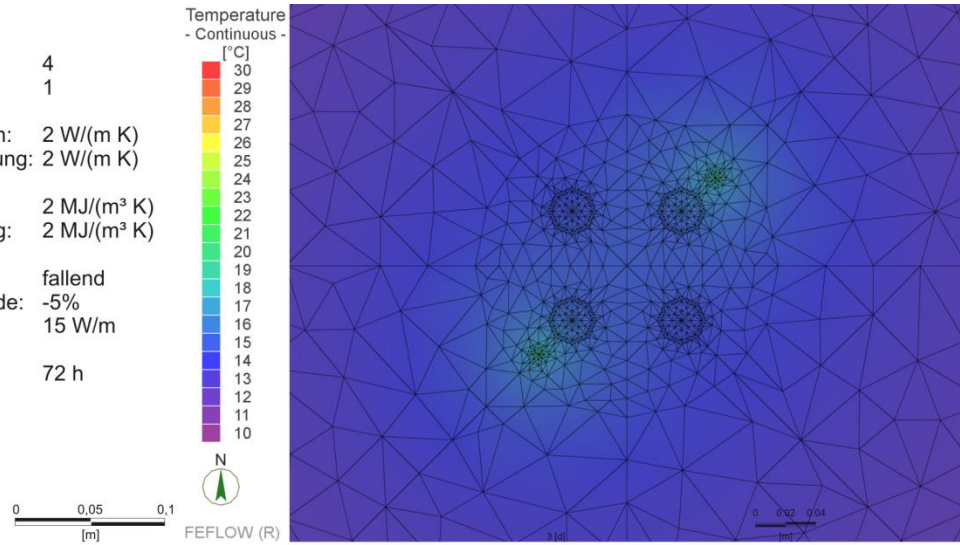


Abbildung II-3.23 Ergebnisse der Modelle eTRT_06-1, 2 und 3.

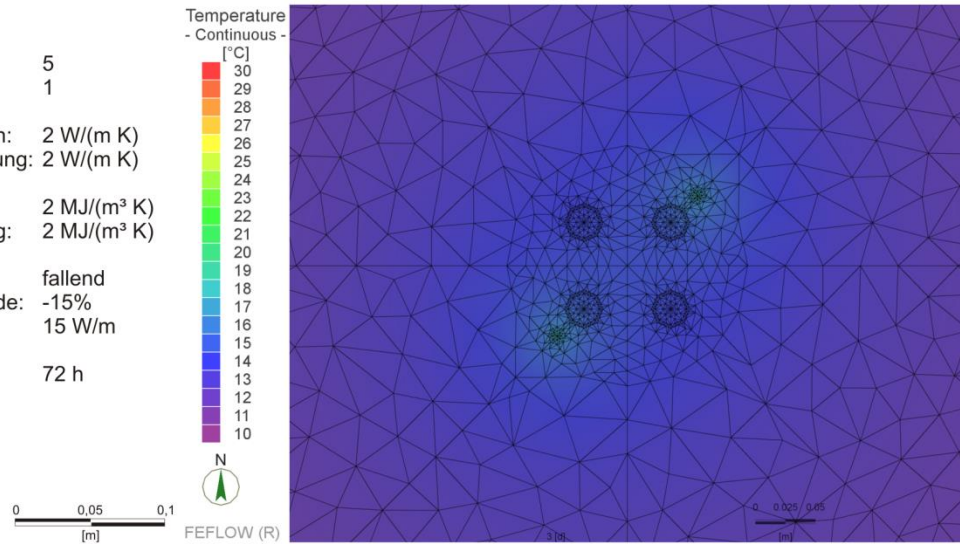
Modellname: eTRT_06-4

Modellnr.: 4
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: fallend
 Wärmeänderung Start-Ende: -5%
 Start-Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_06-5

Modellnr.: 5
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: fallend
 Wärmeänderung Start-Ende: -15%
 Start-Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_06-6

Modellnr.: 6
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: fallend
 Wärmeänderung Start-Ende: -25%
 Start-Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

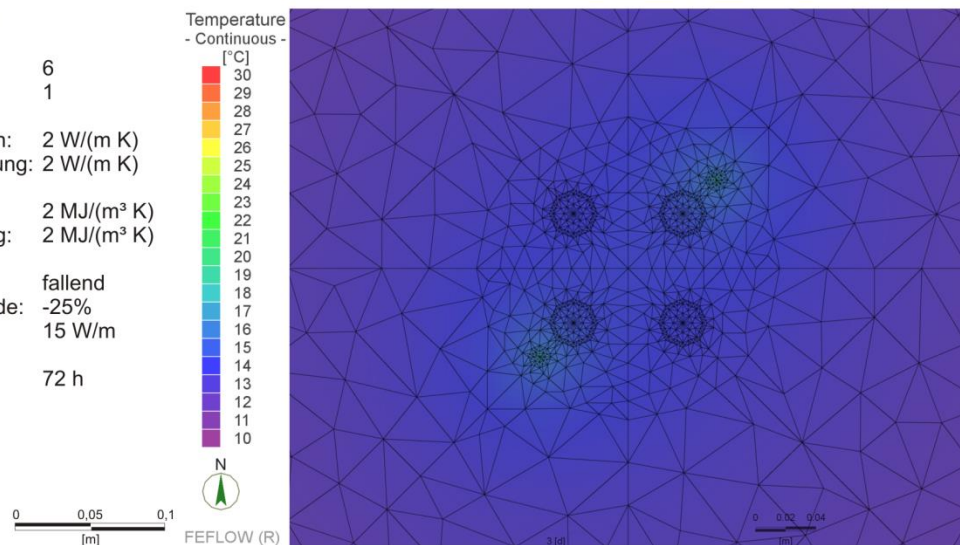
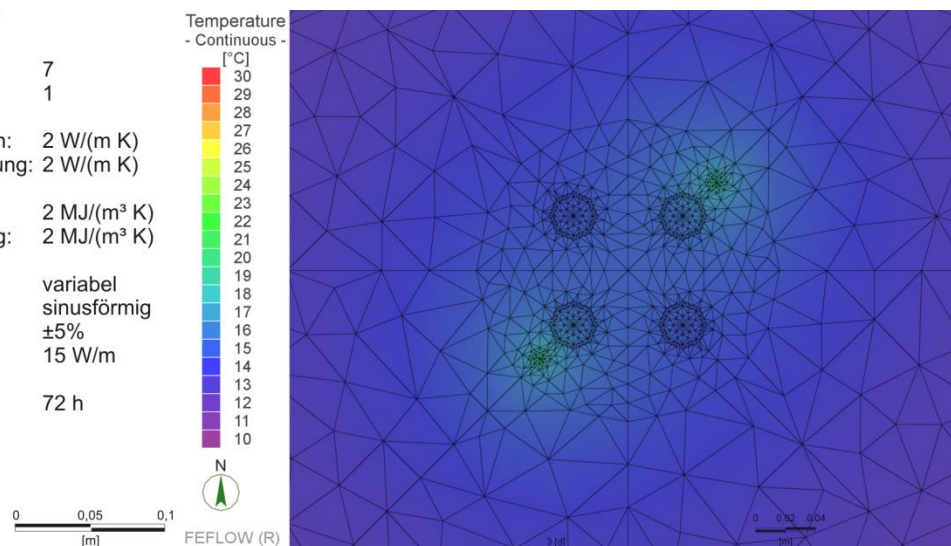


Abbildung II-3.24 Ergebnisse der Modelle eTRT_06-4, 5 und 6.

Modellname: eTRT_06-7

Modellnr.: 7
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: variabel
 Variation: sinusförmig
 Wärmeänderung: ±5%
 Bezugs-Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_06-8**

Modellnr.: 8
 Modellposition: 1
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)
 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmeeintrag: konstant
 Start-Wärmeleistung: 15 W/m
 Testdauer: 72 h

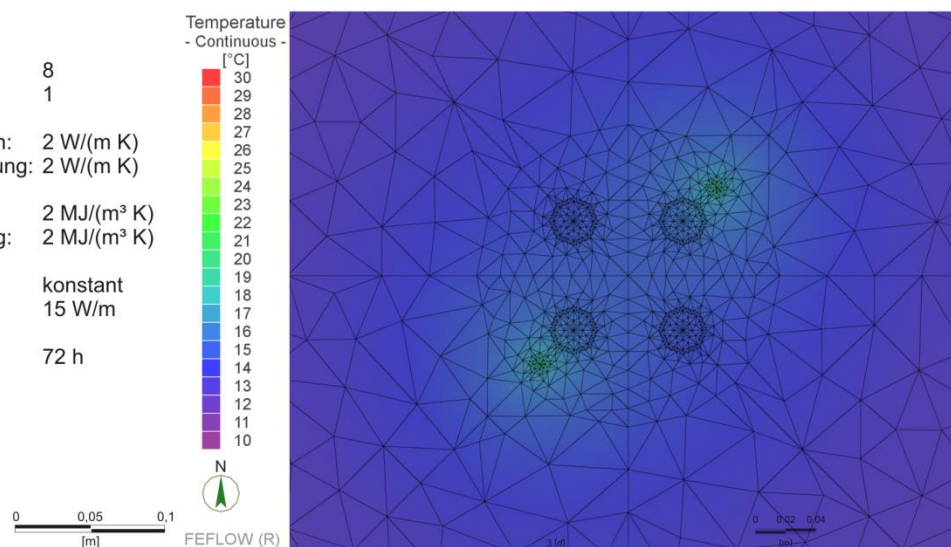


Abbildung II-3.25 Ergebnisse der Modelle eTRT_06-7 und 8.

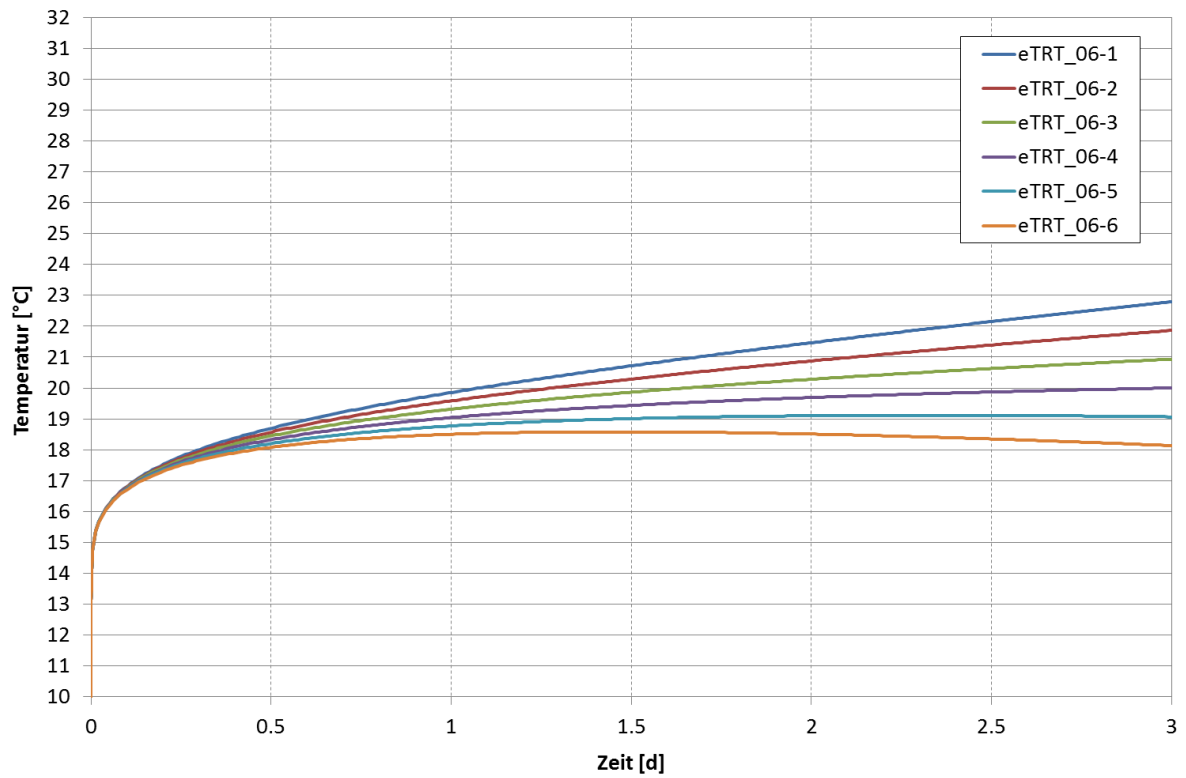


Abbildung II-3.26 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_06-1 bis 6.

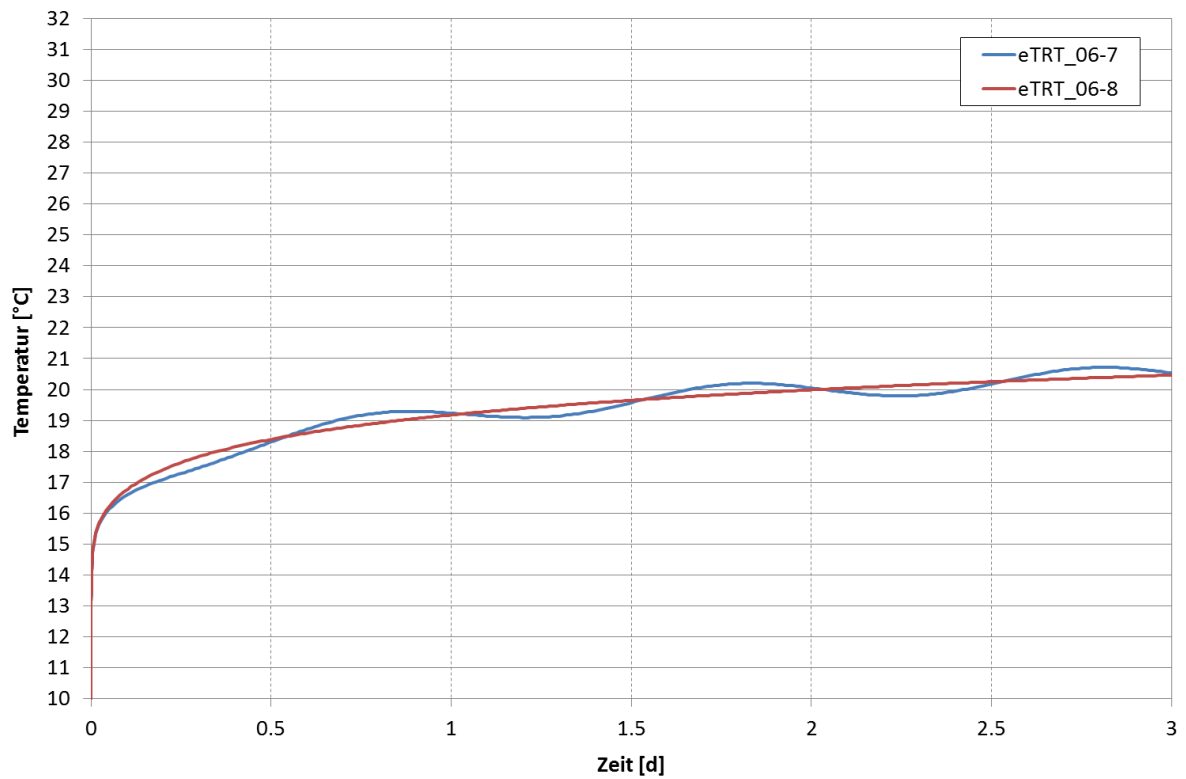


Abbildung II-3.27 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_06-7 und 8.

Tabelle II-3.14 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsberechnung Modellreihe eTRT_06 (nach Gleichung II-1.1).

Modellname	Wärmeleitfähigkeit λ			Abweichung von Gesteinswärmeleitfähigkeit [%]	Maximale, nach 3 Tagen erreichte Endtemperatur [°C]
	Gestein	Verpressung	Berechnet		
	[W/(m K)]	[W/(m K)]	[W/(m K)]		
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

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 Fluss Schatten 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

Modellnr.: 1
 Slice: 2
 Modellposition: 1

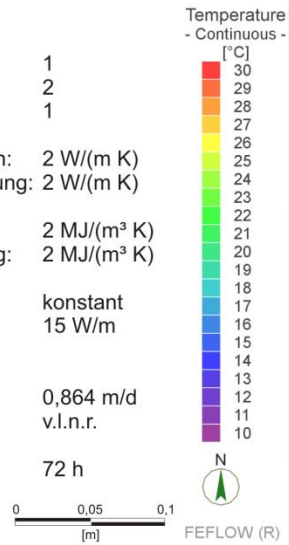
Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_07-1

Modellnr.: 1
 Slice: 8
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_07-1

Modellnr.: 1
 Slice: 14
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

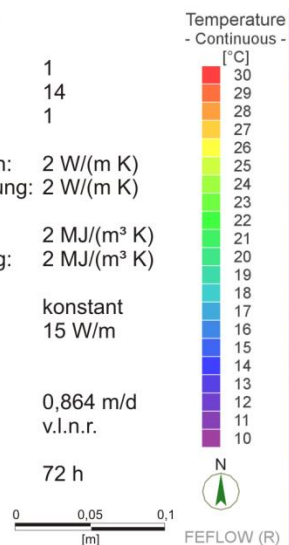


Abbildung II-3.28 Ergebnisse der Modelle eTRT_07-1 auf Slice 02, 08 und 14.

Modellname: eTRT_07-2

Modellnr.: 2
 Slice: 2
 Modellposition: 1

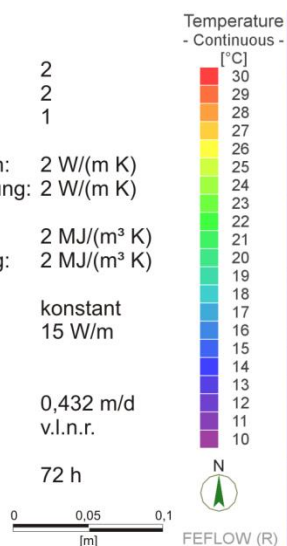
Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,432 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_07-2**

Modellnr.: 2
 Slice: 8
 Modellposition: 1

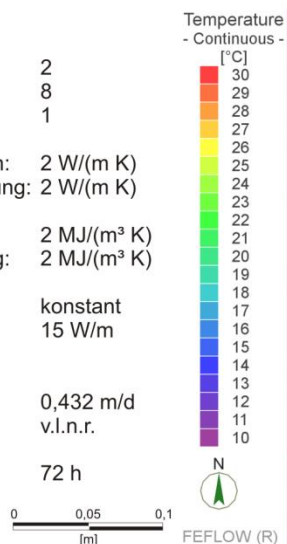
Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,432 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_07-2**

Modellnr.: 2
 Slice: 14
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,432 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

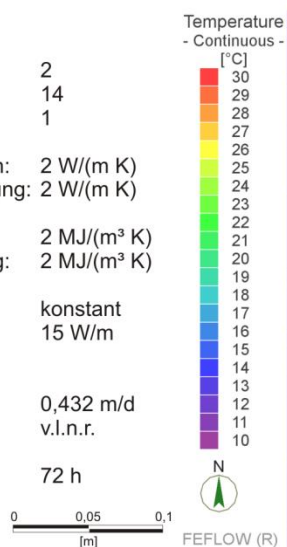


Abbildung II-3.29 Ergebnisse der Modelle eTRT_07-2 auf Slice 02, 08 und 14.

Modellname: eTRT_07-3

Modellnr.: 3
 Slice: 2
 Modellposition: 1

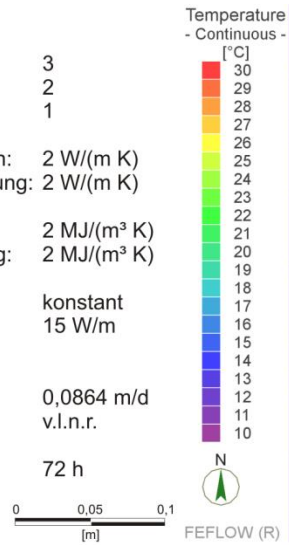
Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,0864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_07-3

Modellnr.: 3
 Slice: 8
 Modellposition: 1

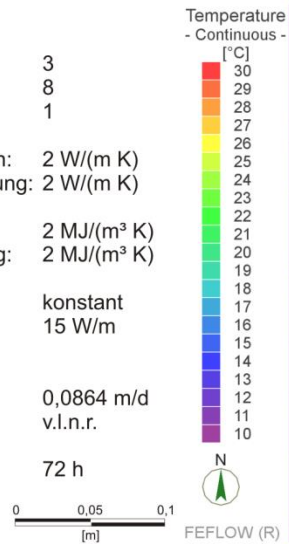
Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,0864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h



Modellname: eTRT_07-3

Modellnr.: 3
 Slice: 14
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,0864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

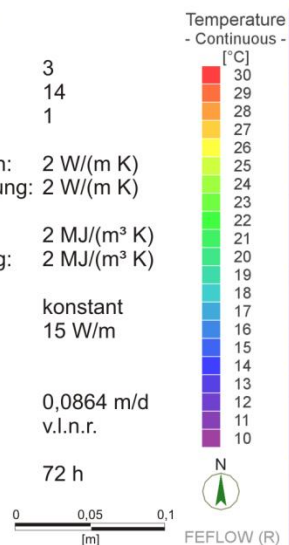


Abbildung II-3.30 Ergebnisse der Modelle eTRT_07-3 auf Slice 02, 08 und 14.

Modellname: eTRT_07-4

Modellnr.: 4
 Slice: 2
 Modellposition: 1

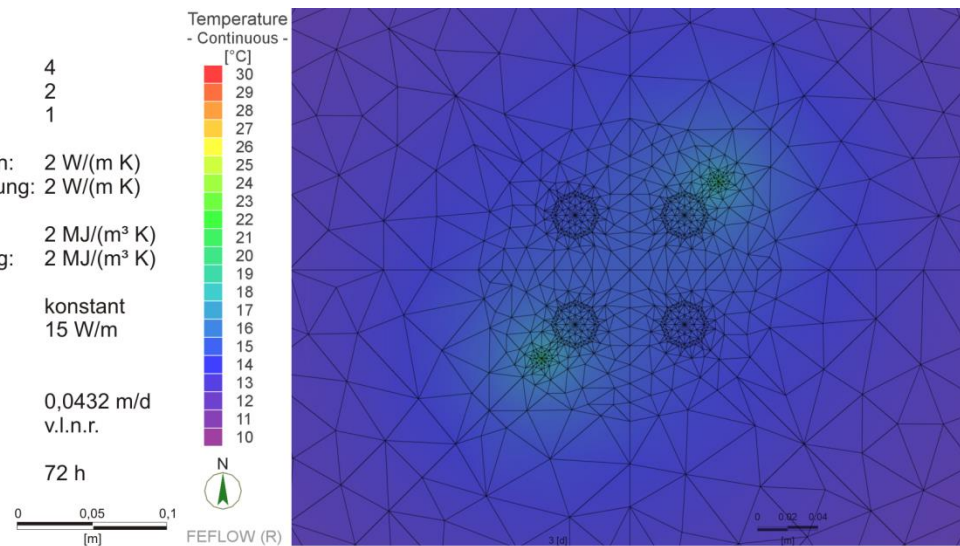
Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,0432 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_07-4**

Modellnr.: 4
 Slice: 8
 Modellposition: 1

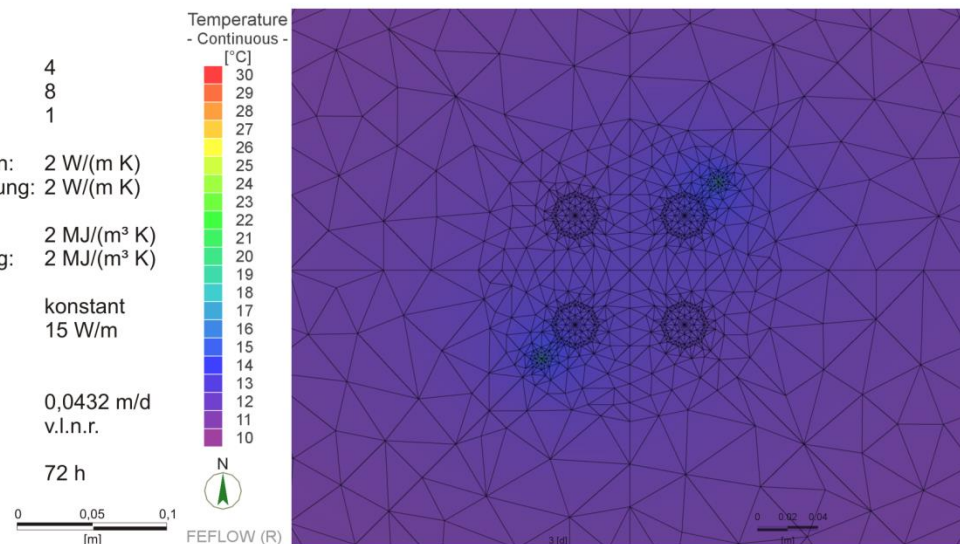
Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,0432 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_07-4**

Modellnr.: 4
 Slice: 14
 Modellposition: 1

Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,0432 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

Testdauer: 72 h

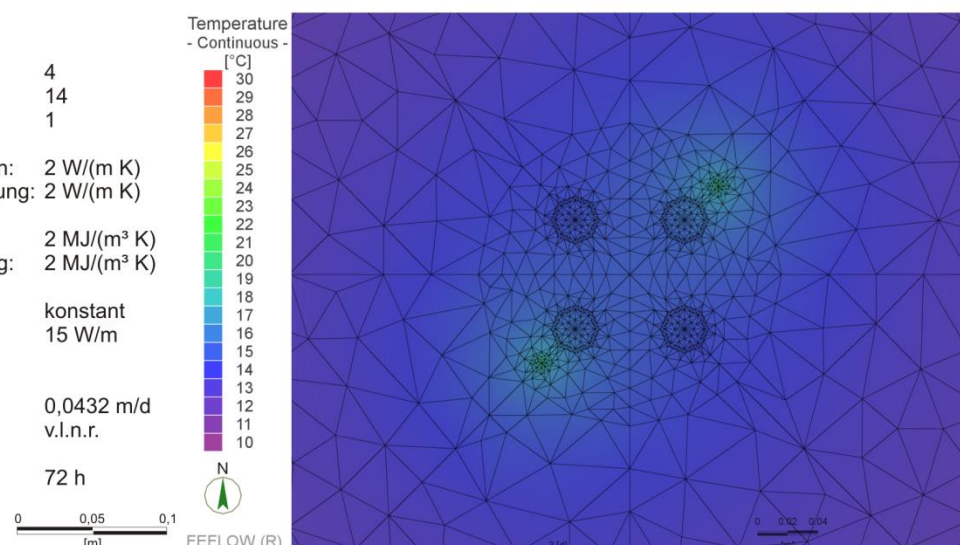


Abbildung II-3.31 Ergebnisse der Modelle eTRT_07-4 auf Slice 02, 08 und 14.

Modellname: eTRT_07-5

Modellnr.: 5
 Slice: 2
 Modellposition: 1

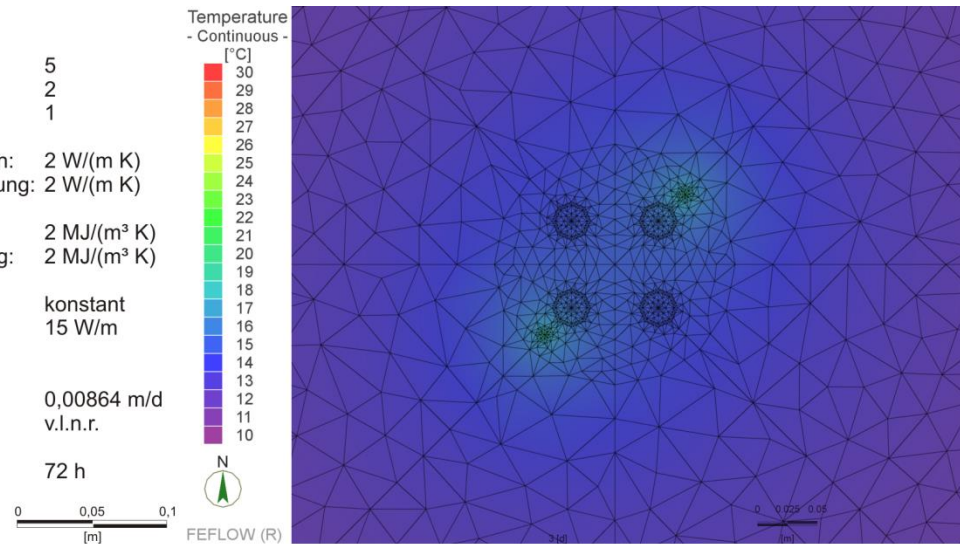
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,00864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_07-5**

Modellnr.: 5
 Slice: 8
 Modellposition: 1

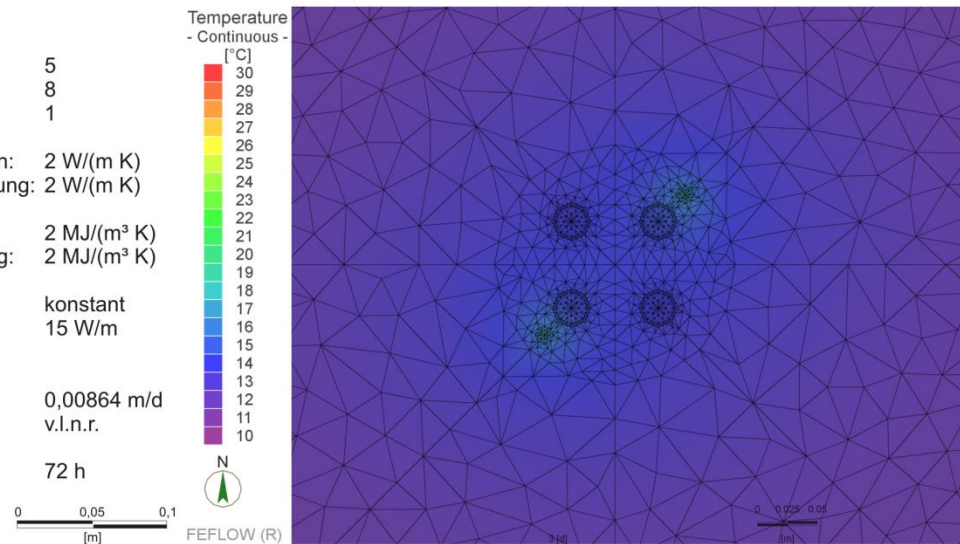
 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,00864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

 Testdauer: 72 h

**Modellname: eTRT_07-5**

Modellnr.: 5
 Slice: 14
 Modellposition: 1

 Wärmeleitfähigkeit Gestein: 2 W/(m K)
 Wärmeleitfähigkeit Verfüllung: 2 W/(m K)

 Wärmekapazität Gestein: 2 MJ/(m³ K)
 Wärmekapazität Verfüllung: 2 MJ/(m³ K)

 Wärmeeintrag: konstant
 Wärmeleistung: 15 W/m

 Grundwasser:
 Fließgeschwindigkeit: 0,00864 m/d
 Fließrichtung: v.l.n.r.

 Testdauer: 72 h

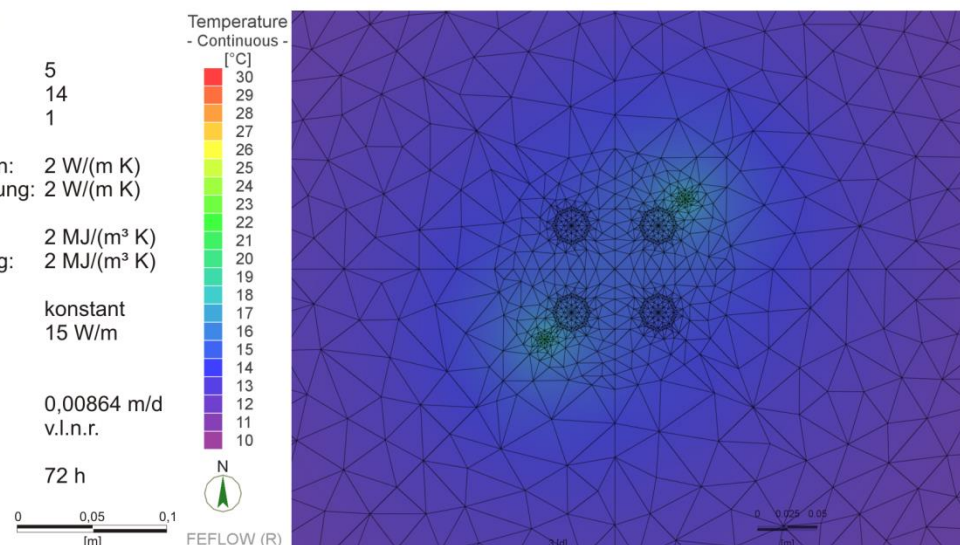


Abbildung II-3.32 Ergebnisse der Modelle eTRT_07-5 auf Slice 02, 08 und 14.

Tabelle II-3.15 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_07-1 bis 5 am linken, unteren Glasfaserkabel.

Slice #	Tiefe m	Modell eTRT_07-1.1				Modell eTRT_07-2.1				Modell eTRT_07-3.1			
		λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %
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

Slice #	Tiefe m	Modell eTRT_07-4.1				Modell eTRT_07-5.1			
		λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %
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

Tabelle II-3.16 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_07-1 bis 5 am rechten, oberen Glasfaserkabel.

Slice #	Tiefe m	Modell eTRT_07-1.2				Modell eTRT_07-2.2				Modell eTRT_07-3.2			
		λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %
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

Slice #	Tiefe m	Modell eTRT_07-4.2				Modell eTRT_07-5.2			
		λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	$\Delta\lambda$ W/(m K)	Abweichung %
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

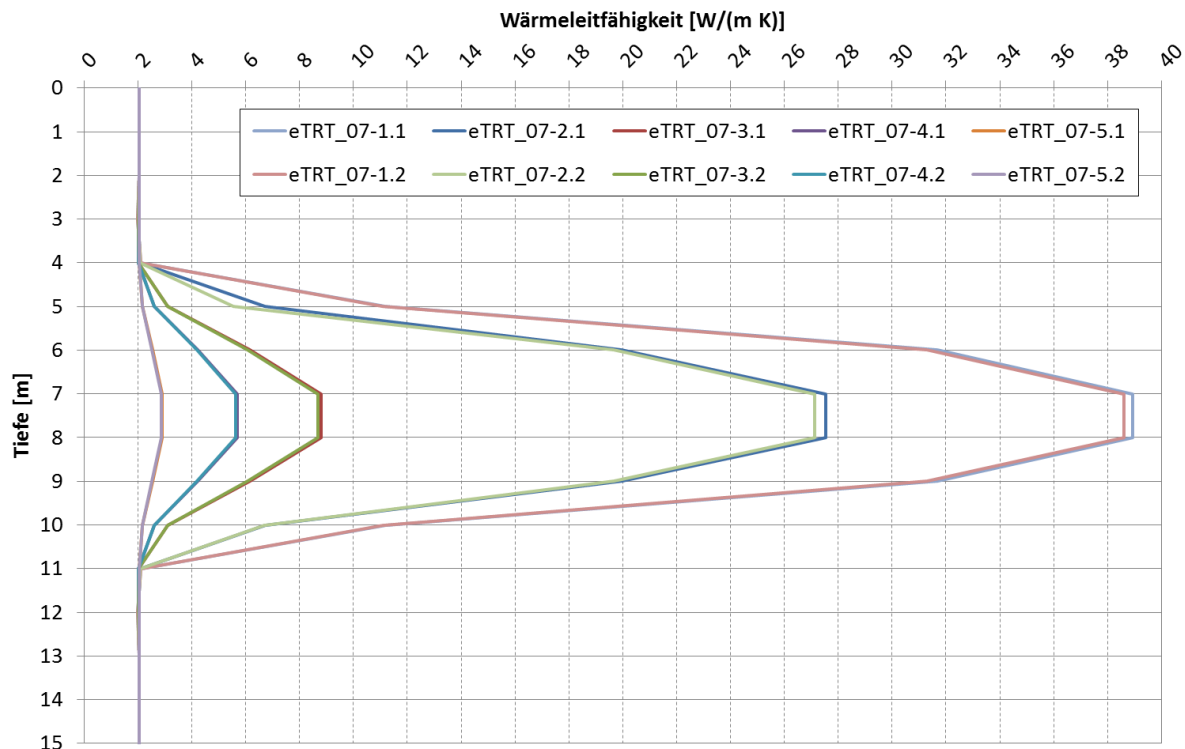


Abbildung II-3.33 Wärmeleitfähigkeiten der Modelle eTRT_07-1 bis 5 aufgetragen über die Modelltiefe („1“ bedeutet linker, unterer OP, „2“ rechter, oberer OP).

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 Peclet-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 l 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 Temperaturanomale 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; $\lambda_{\text{calc}} = \lambda_{\text{total}}$, $\lambda_{\text{rock}} = \lambda_{\text{kond}}$). Die charakteristische Länge l wurde entsprechend BARCENILLA et al. (2005), SUTTON et al. (2003), ZSCHOKE (2005) und DORNSTÄDTER et al. (2008) mit dem Bohrllochdurchmesser festgelegt.

Modellname	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	l m	ρc_p MJ/(m ³ K)	v_{calc} m/s	v_{Modell} m/s	Δv m/s	Abweichung %
Modell 1 LU	38,92	2,00	0,2	4,2	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	339,6
Modell 1 RO	38,62	2,00	0,2	4,2	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	336,0
Modell 2 LU	27,52	2,00	0,2	4,2	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	507,7
Modell 2 RO	27,14	2,00	0,2	4,2	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	498,5
Modell 3 LU	8,81	2,00	0,2	4,2	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	710,7
Modell 3 RO	8,68	2,00	0,2	4,2	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	695,1
Modell 4 LU	5,70	2,00	0,2	4,2	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	779,9
Modell 4 RO	5,62	2,00	0,2	4,2	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	762,7
Modell 5 LU	2,90	2,00	0,2	4,2	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	967,1
Modell 5 RO	2,88	2,00	0,2	4,2	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$9,4 \cdot 10^{-7}$	944,0

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

Modellname	λ_{calc} W/(m K)	λ_{rock} W/(m K)	l m	ρc_p MJ/(m ³ K)	v_{calc} m/s	v_{Modell} m/s	Δv m/s	Abweichung %
Modell 1 LU	38,92	2,00	0,51	4,2	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	72,7
Modell 1 RO	38,62	2,00	0,51	4,2	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	71,3
Modell 2 LU	27,52	2,00	0,51	4,2	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	138,7
Modell 2 RO	27,14	2,00	0,51	4,2	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	135,1
Modell 3 LU	8,81	2,00	0,51	4,2	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	218,5
Modell 3 RO	8,68	2,00	0,51	4,2	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	212,3
Modell 4 LU	5,70	2,00	0,51	4,2	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	245,7
Modell 4 RO	5,62	2,00	0,51	4,2	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	238,9
Modell 5 LU	2,90	2,00	0,51	4,2	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	319,2
Modell 5 RO	2,88	2,00	0,51	4,2	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	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_04-4.1, Modell eTRT_04-3.1c0 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).

Tabelle II-3.19 Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c und eTRT_04-3.1c.

Modellname	Mesh	Anzahl Knoten & Elemente pro Slice/Layer	Methode des Wärmeeintrags	eingebrachte Wärmemenge (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 ³ d)
eTRT_04-4.1_c5	GridBuilder fein	194.996 / 373.598	Heat source solid	8145870119 J/(m ³ d)
eTRT_04-4.1_c6	Triangle fein 2	198.347 / 395.432	Heat source solid	8145870119 J/(m ³ d)
eTRT_04-4.1_c7	Triangle fein 4	338.606 / 675.655	Heat source solid	8145870119 J/(m ³ 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 ³ d)
eTRT_04-3.1_c5	GridBuilder fein	194.996 / 373.598	Heat source solid	8145870119 J/(m ³ d)
eTRT_04-3.1_c6	Triangle fein 2	198.347 / 395.432	Heat source solid	8145870119 J/(m ³ d)
eTRT_04-3.1_c7	Triangle fein 4	338.606 / 675.655	Heat source solid	8145870119 J/(m ³ d)

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/(m³ d)). Dieser Materialparameter wurde den Elementen innerhalb des diskretisierten LWL-Kabels zugewiesen (Abb. II-3.2).

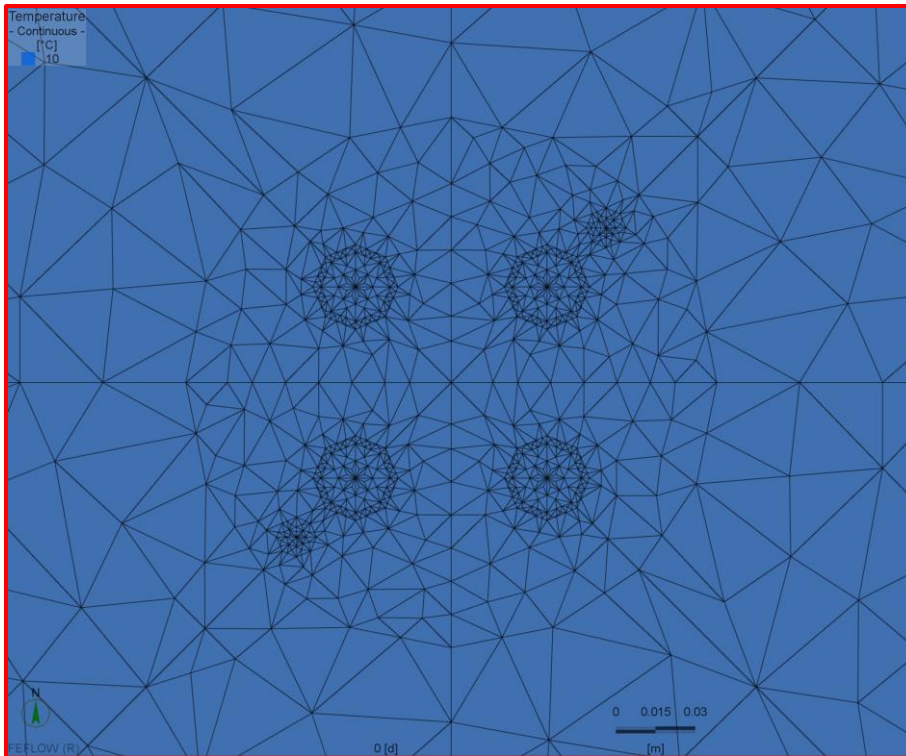


Abbildung II-3.34 Modellgeometrie des normalen Meshs („Triangle normal“, Tab. II-3.19) der Messreihen eTRT_04 bis eTRT_07 (Abmessungen in Tab. II-3.1, S. 94).

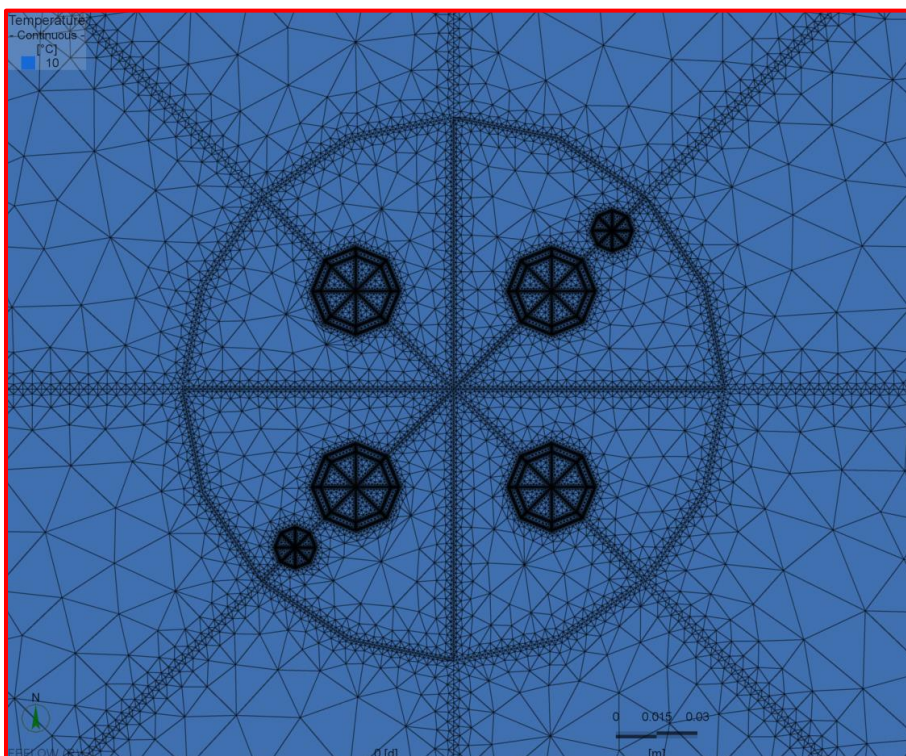


Abbildung II-3.35 Modellgeometrie des Meshs GruidBuilder fein (Tab. II-3.19, Abmessungen in Tab. II-3.1).

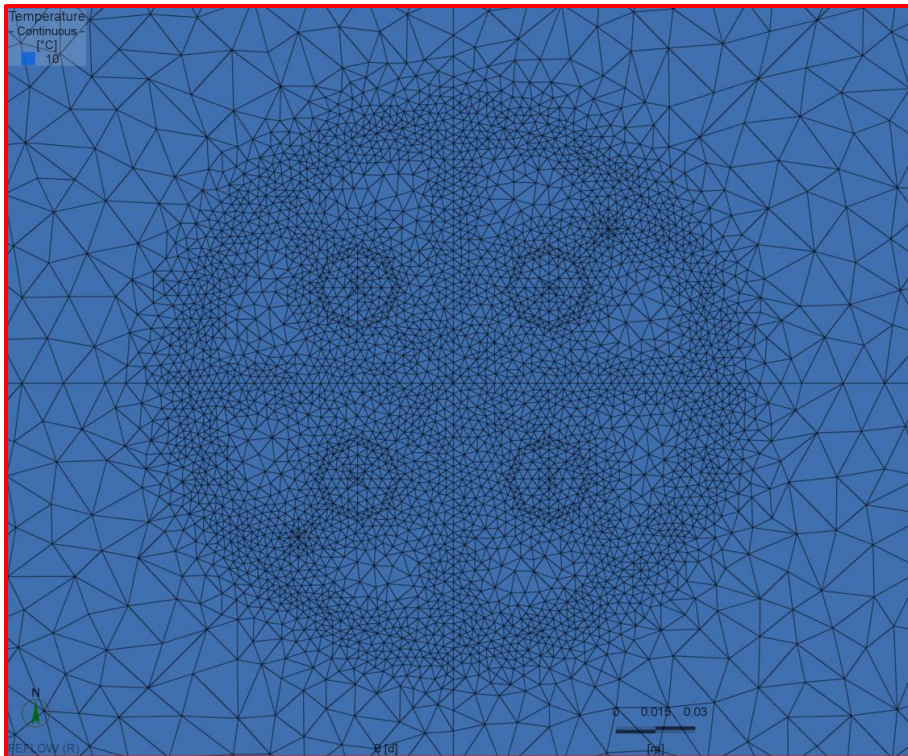


Abbildung II-3.36 Modellgeometrie des Meshs Triangle fein 2 (Tab. II-3.19, Abmessungen in Tab. II-3.1).

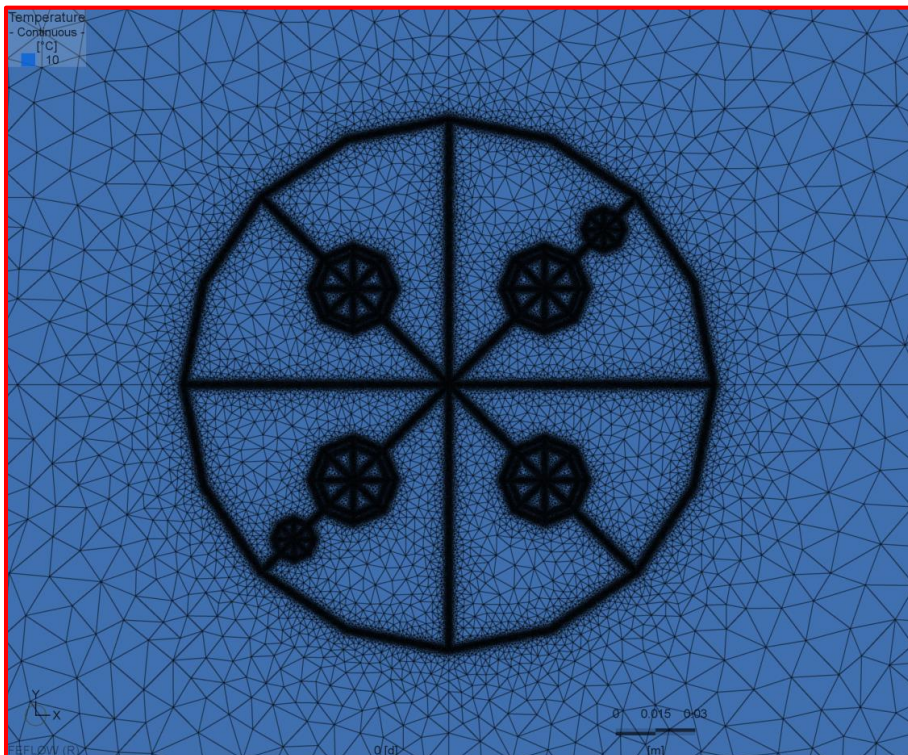


Abbildung II-3.37 Modellgeometrie des Meshs Triangle fein 4 (Tab. II-3.19, Abmessungen in Tab. II-3.1).

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).

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

Modellname	Wärmeleitfähigkeit λ			Steigung der linearen Regression im Auswertebereich (48h – 72h) [-]	Abweichung von Gesteinswärmeleitfähigkeit [%]	Maximale, nach 3 Tagen erreichte Endtemperatur [°C]
	Gestein (vorgegeben) [W/(m K)]	Verpressung (vorgegeben) [W/(m K)]	Berechnet [W/(m K)]			
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 von Standard-Mesh c0			0,00427	0,00065	0,11	2,47

Modellname	Wärmeleitfähigkeit λ			Steigung der linearen Regression im Auswertebereich (48h – 72h) [-]	Abweichung von Gesteinswärmeleitfähigkeit [%]	Maximale, nach 3 Tagen erreichte Endtemperatur [°C]
	Gestein (vorgegeben) [W/(m K)]	Verpressung (vorgegeben) [W/(m K)]	Berechnet [W/(m K)]			
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.

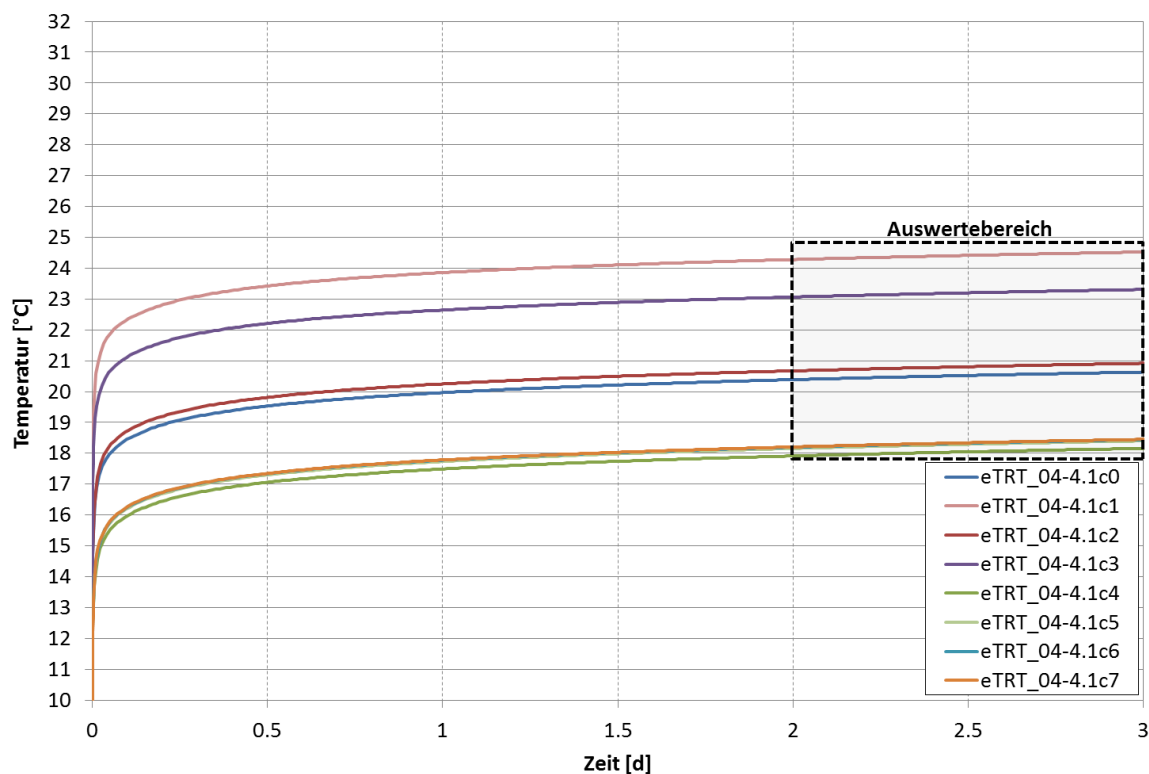


Abbildung II-3.38 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-4.1c0 bis c7.

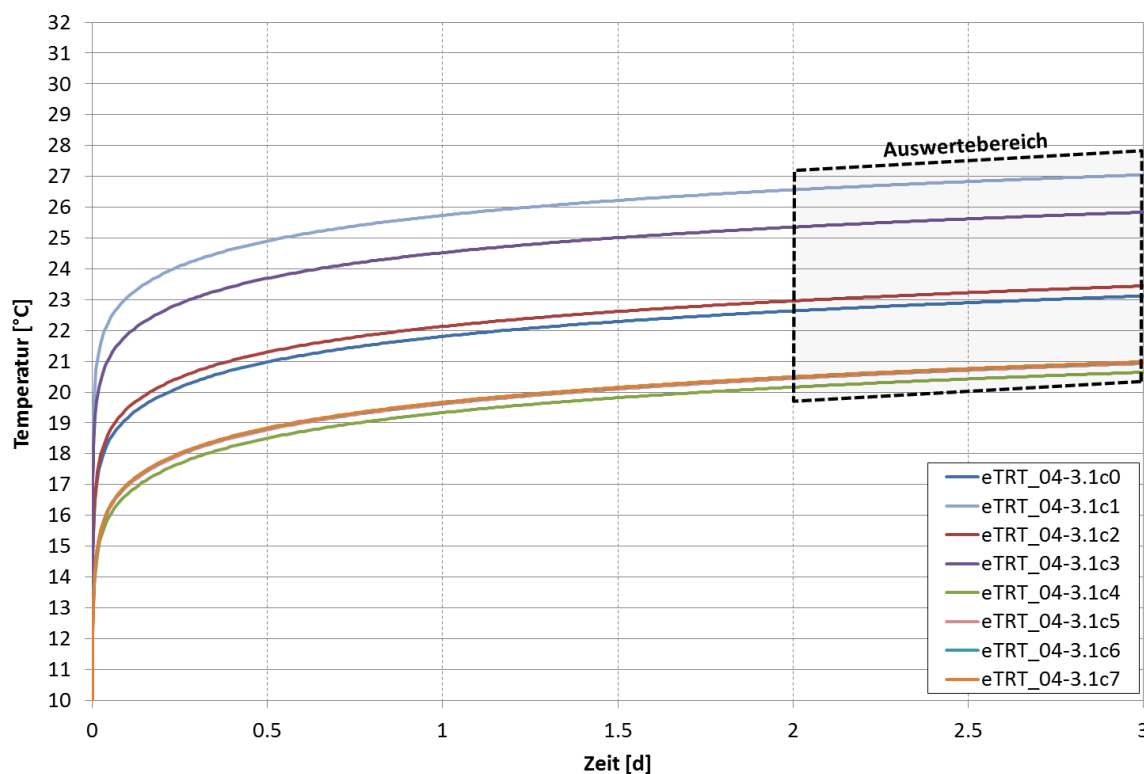


Abbildung II-3.39 Temperaturkurven von Observation Point 1 der Modelle eTRT_04-3.1c0 bis c7.

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 Hauptmodellreihen 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.

Tabelle II-3.21 Meshingparameter der Kontroll-Modelle eTRT_04-4.1c4 bis c12
(Wärmeeinbringung Heat source solid).

Modellname	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

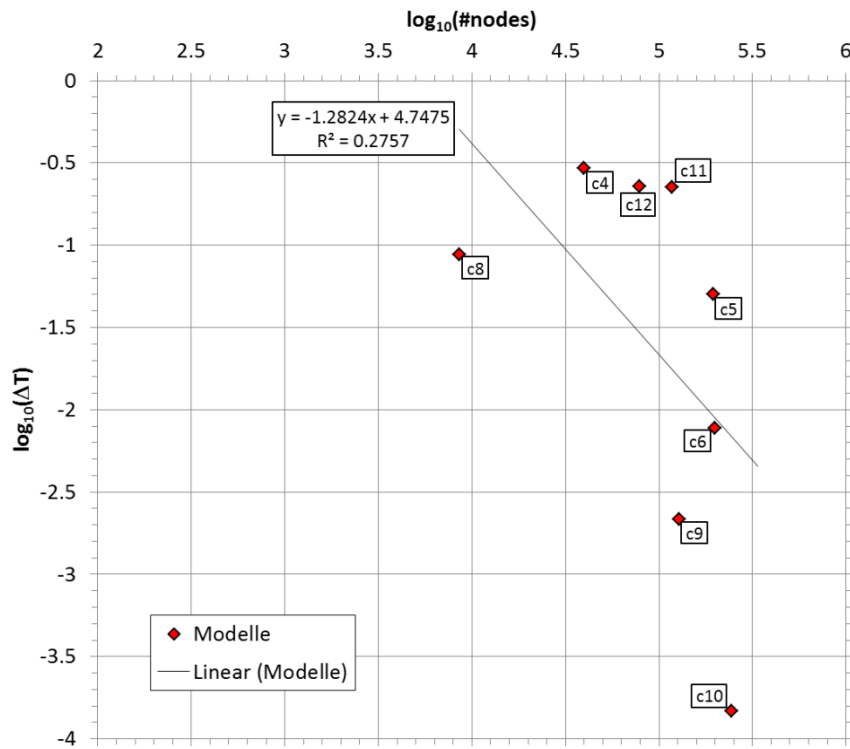


Abbildung II-3.40 Konvergenzplot der Modellreihe eTRT_04-4.1c.

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 Knotenzahl 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 $\geq 2 \text{ W}/(\text{m K})$) 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 (Brunnenfunktion 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. unterer) 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 Wärmeeintragschwankungen 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):

$$T^q(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[-\frac{1}{r_b} \int_0^\infty (1 - e^{-au^2t}) \frac{J_0(ur)Y_1(ur_b) - Y_0(ur)J_1(ur_b)}{u^2[J_1^2(ur_b) + Y_1^2(ur_b)]} du \right] \quad (\text{II-4.1})$$

T^q	Temperatur [K]
r	Radius [m]
t	Zeit [s]
q	Wärmefluss [W/m]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
r_b	Bohrlochradius [m]
α	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]
$J_0(u), J_1(u)$	Bessel Funktion erster Ordnung
$Y_0(u), Y_1(u)$	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):

$$T^q(r, t) = \frac{q}{2\pi r_b \lambda} \sum_{j=1}^{j=10} \frac{V_j}{j} \frac{K_0(\omega_j r)}{\omega_j K_1(\omega_j r_b)} \quad (\text{II-4.2a})$$

mit

$$\omega_j = \sqrt{\frac{j \ln(2)}{\alpha t}} \quad (\text{II-4.2b})$$

und

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

$K_\nu(x)$ modifizierte Bessel-, bzw. MacDonald-Funktion

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

Eine Annäherung der Lösung von Gleichung II-4.1 mittels des Exponentialintegrals E_1 ist in CARSLAW & JAEGER (1959) und HELLSTRÖM (1991) wie folgt als Linienquellen-Approximation beschrieben:

$$T^q(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (\text{II-4.3})$$

Für lange Zeiträume $\frac{\alpha t}{r^2} \geq 5$ kann das Integral $E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)$ mit $\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma$ 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):

$$T^q(t) = \frac{q_k}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma \right] \quad \text{mit} \quad q_k = \text{konst.} \quad (\text{II-4.4})$$

T_f Temperatur Fluid [K]
 q_k konstanter Wärmefluss [W/m]
 γ Euler-Mascheroni-Konstante [-]

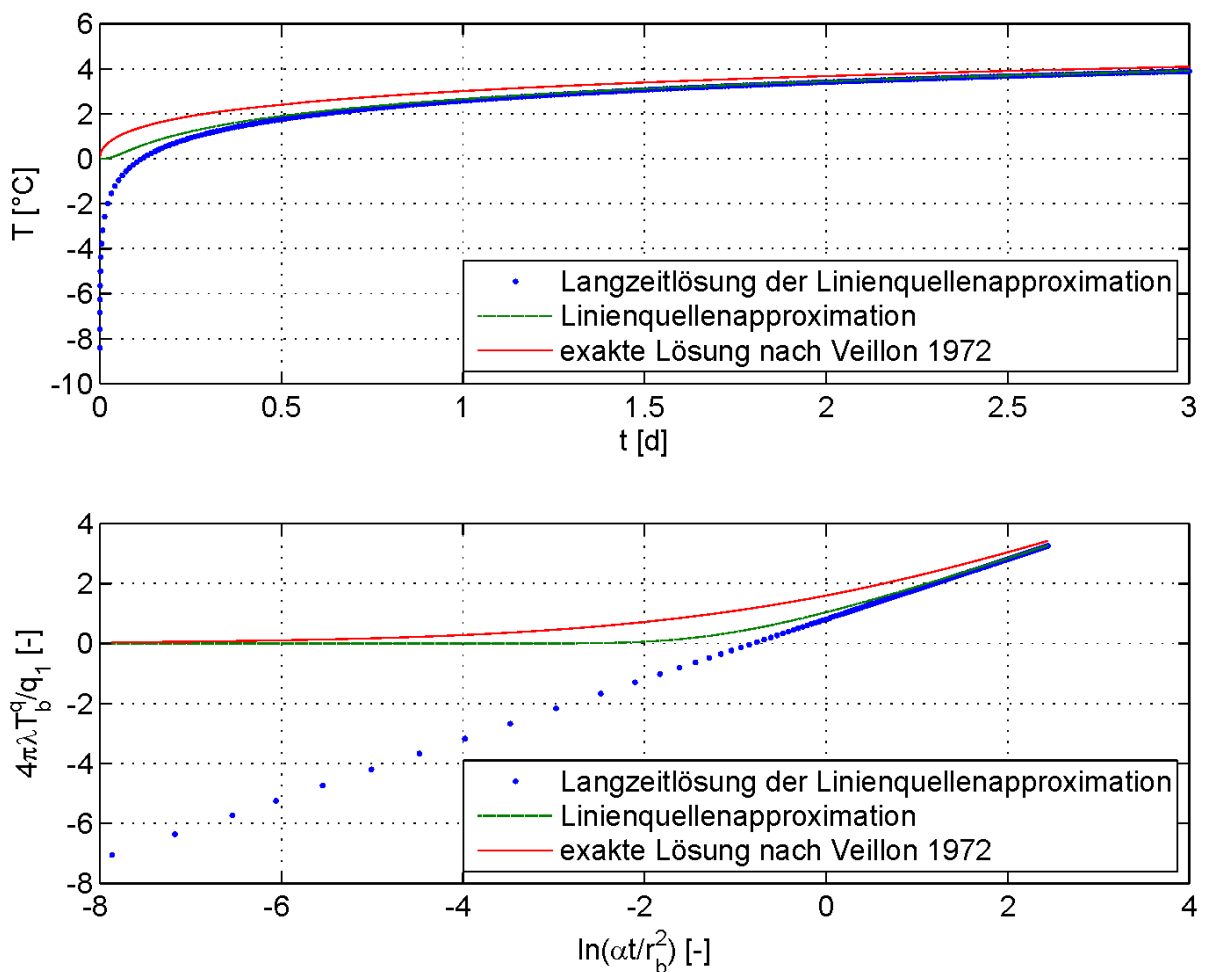


Abbildung II-4.1 Darstellung der dimensionslosen Temperaturänderung $4\pi\lambda T_b^q/q_1$ als Funktion der dimensionslosen Zeit $\alpha t/r_b^2$ berechnet mit Beispielwerten bei $r = r_b$ (nach HELLSTRÖM 1991). Rote, durchgezogene Linie = numerische Inversion der Laplace-Transform-Lösung (Gleichung 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).

$\alpha t/r_b^2$ [-]	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 $\frac{\alpha t}{r_b^2} > 5$ 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 Bohrllochdurchmesser, 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):

$$\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad r_b = 0,15 \text{ m} \quad \rightarrow \quad t = \frac{5r_b^2}{\alpha} = \frac{5 \cdot 0,15^2 \text{ m}^2}{1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 112500 \text{ s} = \mathbf{31,25 \text{ h}}$$

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 sekundlich 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 monatliche 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_s und den Term des Bohrlochwiderstandes R_b erweitert werden:

$$T^q(r, t) = \frac{q}{2\pi r_b \lambda} \sum_{j=1}^{j=10} \frac{V_j}{j} \frac{K_0(\omega_j r)}{\omega_j K_1(\omega_j r_b)} + qR_b + T_s \quad (\text{II-4.5})$$

R_b	thermischer Bohrlochwiderstand [(K m)/W]
T_s	Temperatur ungestörter Untergrund [°C]

Da die Ermittlung von λ aus obiger Gleichung durch die zusätzliche Unbekannte R_b nicht eindeutig lösbar ist, wurde versucht mittels der Programmierung eines grid search Algorithmus mit wechselnden Werten für λ und R_b zu einer Lösung zu kommen. Bei einer Berechnung einer Temperaturkurve nach Gleichung II-4.5 bewirkt eine Änderung der Werte für λ eine Änderung der generellen Steigung der dargestellten Kurve. Eine Änderung von R_b bewirkt hingegen eine Parallelverschiebung des hinteren Teils der Temperaturkurve. Vergleicht man nun die aus Gleichung II-4.5 für beliebige λ und R_b entstandene Temperaturkurve mit der Temperaturkurve, deren λ - und R_b -Werte zu ermitteln sind (z.B. die Temperaturkurve aus einem TRT oder eTRT), so sollten die λ - und R_b -Werte annähernd identisch sein, wenn die Quadrate der Differenzen zwischen den beiden Temperaturkurven möglichst klein sind. Summiert man die Differenzenquadrate 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_b , 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 λ - und R_b 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 λ - und R_b liegen und somit auch hier die Aussage der Wärmeleitfähigkeitsermittlung nicht eindeutig ist.

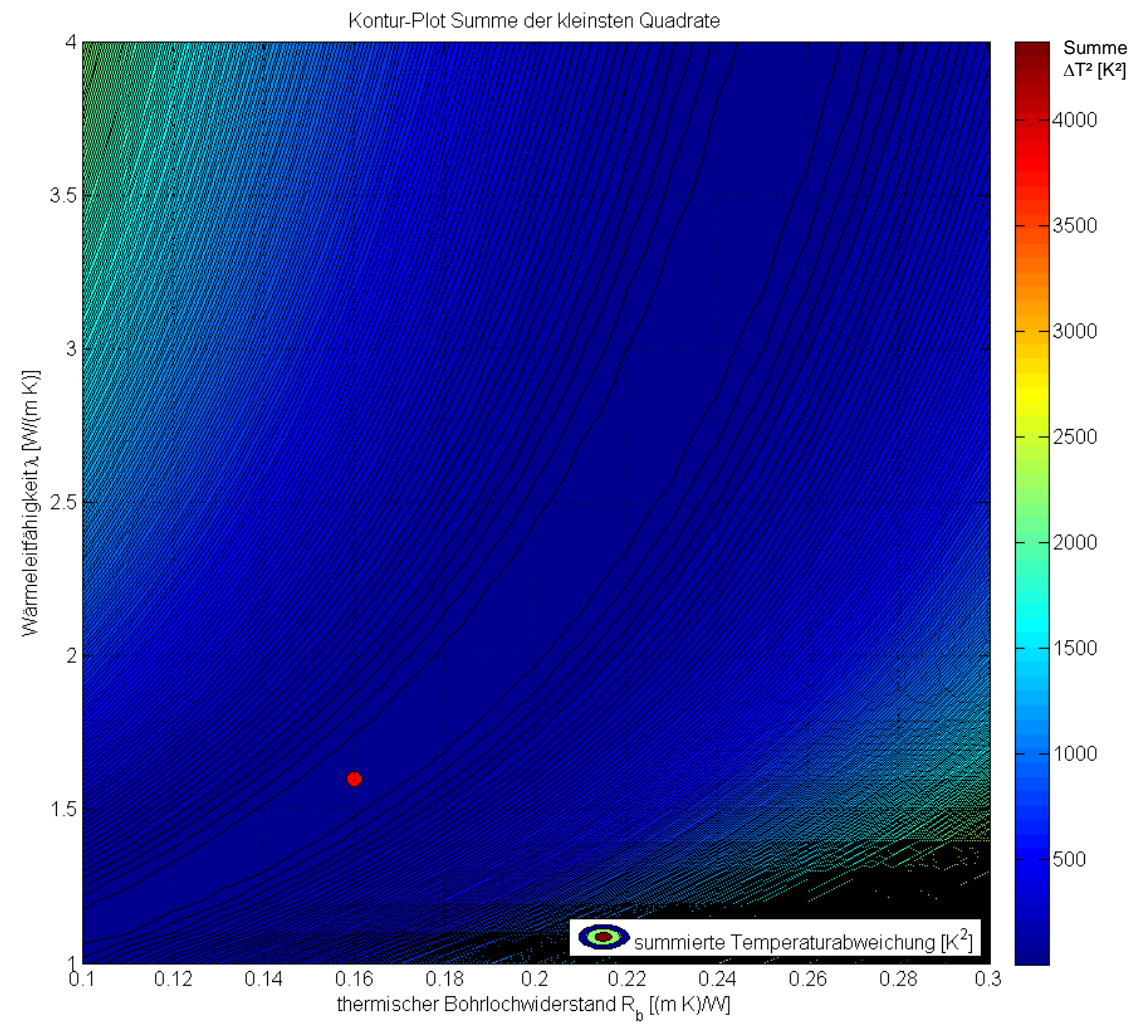
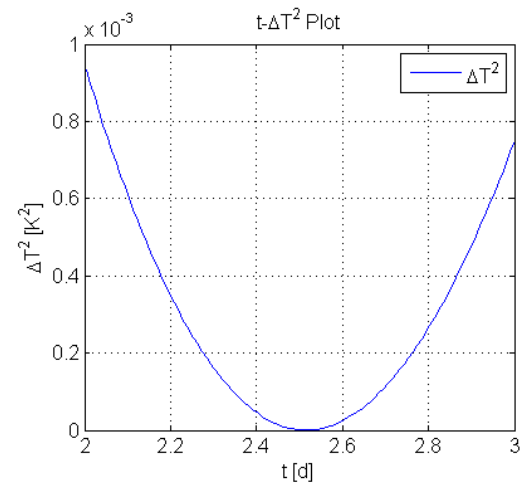
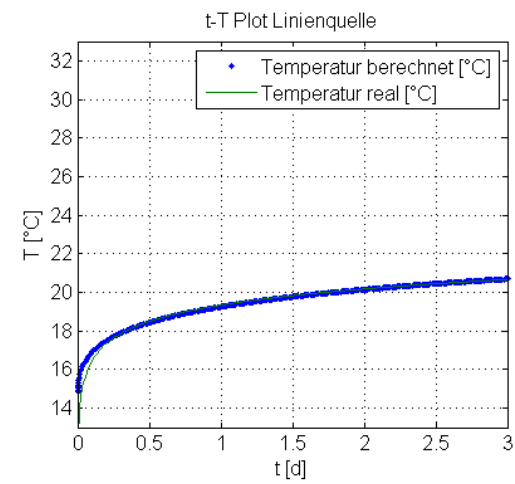


Abbildung II-4.2 Darstellung der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bei konstanter Wärmezufuhr mittels einer grid search Berechnung.

Der rote Punkt im Kontur-Plot zeigt den besten Fit zwischen den beiden Temperaturkurven im Auswertebereich und somit die Werte für λ und R_b 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:

$$T^q(t) = \frac{\dot{Q}_L}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right) + T_b \quad (\text{II-4.6})$$

\dot{Q}_L	Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]
λ	Wärmeleitfähigkeit des Messabschnitts [W/(m K)]
t	Zeit [s]
t_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.

$$\dot{Q}_L = \frac{Q_{total}}{t_h} \quad (\text{II-4.7})$$

\dot{Q}_L	Heizleistung pro Längeneinheit des Messabschnitts [W/m]
Q_{total}	Eingebrachte Gesamtwärmemenge [J/m]
t_h	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 ($\lambda_{rock} = 4 \text{ W/(m K)}$, $\lambda_{fill} = 0,8 \text{ W/(m K)}$, 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	eingebraachte Wärme Q_{total} [J/m]	Dauer der Aufheizung t_h [s - d]	Steigung der Relaxationsgeraden m_{relax} [K]	berechnete Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Abweichung vom Modellwert λ_{rock} [%]
eTRT_06-7	$7,776 \cdot 10^6$	$2,592 \cdot 10^5 - 3$	1,20	1,99	0,6
eTRT_06-9	$7,776 \cdot 10^6$	$2,592 \cdot 10^5 - 3$	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.

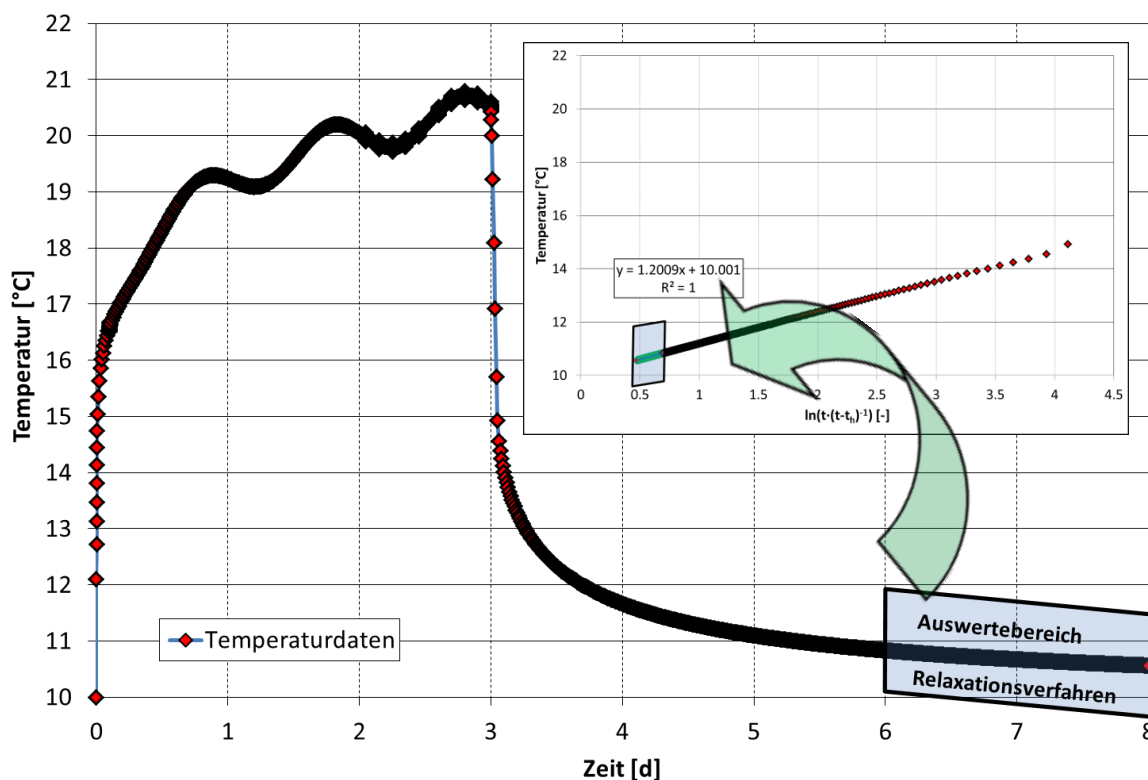


Abbildung II-4.3 Darstellung der Auswertung nach dem Relaxationsverfahren für Modell eTRT_06-7. Der Auswertebereich liegt zwischen Tag 6 und Tag 8. Die Auswertung von Modell eTRT_06-9 erfolgte analog.

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 Messpunktabstände ca. 1 m) nicht durchgeführt.

Bei Grundwasserfluss zeigen die Modelle, dass der advective 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 Wärmezeugung 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 Bohrmeter einsparung 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 Spannungs-konstanthaltung, 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 Wärmeeintragschwankungen 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'échangeurs 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) Terrestrial 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 Erdwärmesondenerfelder; 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., GeoSkripter **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; 9th 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 méthodes 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 groundwater-influenced 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.”

J. R. R. Tolkien

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

Verwendung der Daten mit freundlicher Genehmigung der Stadtverwaltung Speyer.

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
181350	24.09	186338	24.22	191327	24.25
181438	24.10	186426	24.22	191415	24.25
181525	24.11	186514	24.22	191502	24.25
181613	24.11	186601	24.22	191590	24.25
181700	24.10	186689	24.22	191677	24.25
181788	24.11	186777	24.23	191764	24.26
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		
183187	24.11	188178	24.23		
183275	24.12	188265	24.22		
183362	24.13	188353	24.22		
183450	24.12	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

```
% -----  
% Thermal Conductivity Calculation of BHEs Using the Relaxation Method  
% -----  
% used methods:  
% Relaxation Method of the Line Source Approximation (RLS)  
%  
% Florian Malm 2013  
% -----  
% -----  
% Sources:  
% Malm 2013  
% after Dornstädter et al. 2008 & Heske et al. 2011  
% -----  
% 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).  
% -----  
% Relaxation Method:  
% Eq. II-1.3:  
%  $tc = Q\_1 / (4 * pi * m)$   
%  $m$  = incline of the  $\ln(t / (t - t_h)) - T$ -matrix solved by linear  
% regression of the data  
% -----  
% -----  
  
% 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]  
prec = 2.0; % round to position after decimal point [-]  
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  
% -----  
Q_1 = 30; % mean heat input [W/m]  
% -----  
ifql = 1; % if ifql = 1, then do calculation of Q_1 with  
% relax_m_calc_Q_1-script, else take Q_1 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
    tq_relax = load('t-q_relax_input.txt','-ASCII');
end
% -----

% calculated variables
% -----
t_h = t_hd*24*60*60; % end of the heat injection [s]
t_start_s = t_start*24*60*60; % start of calculation [s]
t_end_s = t_end*24*60*60; % end of calculation [s]
prec_calc = ['%10.',num2str(round(prec)),'f'];
% position after decimal point [-]
% -----
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
% -----

% -----
% calculate Q_1 [W/m]
% -----
% build tq_data with relax_m_calc_Q_1.m -script
% -----
if ifql == 1
    [Q_1] = relax_m_calc_Q_1(tq_relax_s,t_h);
end
clear ifql;
% -----

% -----
% calculate thermal conductivity [W/(m K)]
% -----
% 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_1);
tc_dev = 100*abs(tc-tc_rock)/tc_rock; % deviation from given tc [%]
% -----
% 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 R2:           ', ...
      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
% -----
% input arguments:
% tq_relax_s = time-heat-injection-matrix, t(:,1) [s], q(:,2) [W/m]
% t_h       = end of the heat injection [s]
% -----
% output argument:
% Q_l       = mean heating power per unit length for two cables [W/m]
% -----
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
tq_data = zeros(y,2);
tq_data(1:y,:) = tq_relax_s(1:y,:);
% calculate Q_l
mean_Q_data = mean(tq_data,1); % mean heat injection [W/m]
mean_Q_l = abs(mean_Q_data(1,2)); % mean heat injection [W/m]
Q_l = mean_Q_l*2; % mean HI for two cables! [W/m]

```

relax_m_calc_tc.m

```

function [tc,T_0,m_regr,r2] = ...
    relax_m_calc_tc(tT_relax,t_h,t_start_s,t_end_s,Q_l)
% calculate tc [W/(m K)] for Relaxation_Method.m -script
% -----
% input arguments:
% tT_relax = time-temperature-matrix, t(:,1) [s], T(:,2) [°C]
% t_h     = end of the heat injection [s]
% t_start_s = start of calculation [s]

```

```

% t_end_s          = end of calculation [s]
% Q_1              = mean heating power per unit length for two cables [W/m]
% -----
% output arguments:
% tc               = thermal conductivity of surrounding rock [W/(m K)]
% 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
% -----
% build tT_data
% -----
r_s = size(tT_relax); z = 0; m = 0; n = 0;
for i=1:r_s(1)
    if tT_relax(i,1) < t_h
        z=z+1;
    end
    if tT_relax(i,1) < t_start_s
        m=m+1;
    end
    if tT_relax(i,1) <= t_end_s
        n=n+1;
    end
end
n = n-z; m = m-z;
tT_data = zeros(n-m-1,2);
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);
% -----

% calculate linear regression of ln(t/(t-th))-T-File
% -----
lin_regr = polyfit(tT_data(:,1),tT_data(:,2),1);
% -----

% calculate thermal conductivity of surrounding rock
% -----
tc = Q_1/(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
% -----
% 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)
%
% Florian Malm 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).
% -----
% Line Source Approximation:
% Eq. 10.13:  $T_{fq}(t) = q_1 / (4 \cdot \pi \cdot t \cdot c) \cdot [\ln([4 \cdot a \cdot t] / r_b^2) - \text{eulmas}] + q_1 \cdot R_b + T_0$ 
% -----
% Line Source Exponential Integral E1(x):
% Eq. 10.09:  $T_{fq}(t) = q_1 / (4 \cdot \pi \cdot t \cdot c) \cdot E_1(r^2 / [4 \cdot a \cdot t]) + q_1 \cdot R_b + T_0$ 
% -----
% Numerical_Inversion of Laplace Transform Solution:
% Eq. 10.06:  $T_q(r, t) = q_1 / (2 \cdot \pi \cdot r_b \cdot t \cdot c) \cdot \sum_{j=1 \rightarrow 10} ((V_j / j) \cdot K_0(W_j \cdot r) / w_j \cdot K_1(w_j \cdot r_b))$ 
%
% Eq. 10.07:  $w_j = \sqrt{(j \cdot \ln(2)) / (t \cdot \text{diff} \cdot t)}$ 
% Eq. 10.08:  $V_j = \sum_{k=\text{Int}((j-1)/2) \rightarrow \min(j, 5)} (((-1)^{(j-5)} \cdot k^{5 \cdot (2k)!}) / ((5-k)! \cdot (k-1)! \cdot k! \cdot (j-k)! \cdot (2k-j)!))$ 
%
% note:  $(k-1)! = \text{gamma}(k)$ ;  $(2k-j)! = \text{gamma}(2k-j+1)$ 
% -----

% start of script
clear;

% input variables
% -----
tc          = 2.0;          % thermal conductivity rock, W/(m K)
v_heat_cap  = 2.0;          % vol. heat capacity, MJ/(m^3 K)
r           = 0.15;         % radius, m
r_b         = 0.15;         % borehole radius, m
Q           = 30;           % constant heat input, W/m
% -----
R_b         = 0.188620138905809; % thermal borehole resistivity, (m K)/W
T_0        = 10;           % undisturbed ground temperature, °C

```

```

% calculated variables
% -----
eulmas      = abs(psi(1));          % Euler-Mascheroni-Constant, -
t_diff      = tc/(v_heat_cap*1e6); % thermal diffusivity rock, m^2/s

% 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');
% tc(tT_data) = 2.74863 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
% -----
[T]         = LineSource_Approx(r,t_diff,tq_data,tc,eulmas,Q);

% Create plot a la Hellstroem (fig. 10.2, p. 152, Hellstroem 1991)
% -----
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);

% -----
% 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)
% -----
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);

% -----
% 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);

```

```

% -----
% Result Plots
% T-t-plot
% -----
fs=12; % font size for the all fonts in the plot
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';
hleglentry2 = 'Linienquellenapproximation';
hleglentry3 = 'exakte Lösung nach Veillon 1972';
hlegl = legend(hleglentry1,hleglentry2,hleglentry3);
set(hlegl, '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(\alpha/r_b^2) [-]', 'fontsize', fs);
ylabel('4\pi\lambda T_b^q/q_1 [-]', 'fontsize', fs);
set(gca, 'fontsize', fs);
% -----
% END OF SCRIPT
% -----

```

LineSource_Approx.m

```

function [T] = LineSource_Approx(r,a,q_vec,lambda,gamma,Q)
% LineSource computes heat injection from a pipe by a line source starting
% at t=0.
% [Tq] = LineSource_Approx(r,a,t,q,lambda,gamma)
% -----
% Input Arguments:
% r - radius at which temperature is evaluated [m]
% q_vec - ntimesteps*2 matrix which contains:

```

```

%           q_vec(:,1) - time [s]
%           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)]
%   gamma   - Euler-Mascheroni-constant [0,5772...]
%   Q       - constant heat input [W/m]
% -----
% Output:
%   T       - ntimesteps*2 matrix which contains:
%           T(:,1) - time [s]
%           T(:,2) - temperature [°C]
% -----
n = size(q_vec,1);
T = zeros(n,2);
for i = 1:n
    T(i,2) = (q_vec(i,2)/(4*pi*lambda))*(log((4*a*q_vec(i,1))/r^2) ...
            -gamma);
    T(i,1) = q_vec(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]
%   q_vec   - ntimesteps*2 matrix which contains:
%           q_vec(:,1) - time [s]
%           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)]
%   Q       - constant heat input [W/m]
% -----
% Output:
%   Tq      - ntimesteps*2 matrix which contains:
%           Tq(:,1) - time [s]
%           Tq(:,2) - temperature [°C]
% -----
n = size(q_vec,1);
Tq = zeros(n,2);
for i = 1:n
    Tq(i,2) = (q_vec(i,2)/(4*pi*lambda))*expint(r^2/(4*a*q_vec(i,1)));
    Tq(i,1) = q_vec(i,1);
end

```

LineSource_Laplace.m

```

function [Tt] = LineSource_Laplace(r,a,q_vec,lambda,r_b,Q)
% LineSource computes heat injection from a pipe by a line source starting
% at t=0.
% [Tt] = LineSource_Laplace(r,a,t,q,lambda)
% -----
% Numerical_Inversion of Laplace Transform Solution*:
% *Hellstroem, G. (1991) Ground Heat Storage; 262 p., University of Lund,
% Sweden (Dissertation). p.150

```

```

% Eq. 10.06:  $T_q(r,t) = q_1 / (2\pi r_b t c) \sum_{j=1 \rightarrow 10} ((V_j/j) * K_0(W_j*r)/w_j * K_1(w_j*r_b))$ 
%
% Eq. 10.07:  $w_j = \sqrt{(j \cdot \ln(2)) / (t \cdot \text{diff} \cdot t)}$ 
% Eq. 10.08:  $V_j = \sum_{k=\text{Int}((j-1)/2) \rightarrow \min(j,5)} (((-1)^{(j-5)} * k^{5*(2k)!} / ((5-k)! * (k-1)! * k! * (j-k)! * (2k-j)!))$ 
%
% note:  $(k-1)! = \text{gamma}(k)$ ;  $(2k-j)! = \text{gamma}(2k-j+1)$ 
% -----
% Input Arguments:
% r - radius at which temperature is evaluated [m]
% r_b - radius of the borehole [m]
% q_vec - ntimesteps*2 matrix which contains:
% q_vec(:,1) - time [s]
% 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)]
% Q - constant heat input [W/m]
% -----
% Output:
% Tt - ntimesteps*2 matrix which contains:
% Tt(:,1) - time [s]
% Tt(:,2) - temperature [°C]
% -----

n = size(q_vec,1);
Tt = zeros(n,2);
for itime = 1:size(q_vec,1)
    t = q_vec(itime,1);
    q = q_vec(itime,2);
    [Tt_timestep] = ComputeLaplace(a,t,lambda,r,r_b,q);
    Tt(itime,1) = t;
    Tt(itime,2) = Tt_timestep;
end

%-----
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_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);

%-----
function [omega_j] = Omega_j(j,a,t)
% computes omega_j (eq. 10.7)
omega_j = sqrt(j*log(2)/(a*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;

```

```

for k=k_min:k_max
    numerator    = (-1).^(j-1)*k^5*factorial(2*k);
    denominator  = factorial(5-k)*gamma(k)*factorial(k)*factorial(j-k) ...
                  *gamma(2*k-j+1);
    V_j          = V_j + numerator/denominator;
end

```

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

Num_LSL.m

```

% -----
% Temperature Calculation of BHEs Using Various Methods
% -----
% used methods:
% Numerical Inversion of the Laplace Transform Solution (LSL)
%
% 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'échangeurs baionnette verticaux; L'Université 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:  $T_q(r,t) = q_1 / (2\pi r b t c) \sum_{j=1 \rightarrow 10} (V_j / j)$ 
%           *  $K_0(W_j r) / w_j K_1(w_j r b)$ 
% Eq. 10.07:  $w_j = \sqrt{(j \ln(2)) / (t \text{diff} * t)}$ 
% Eq. 10.08:  $V_j = \sum_{k=\text{Int}((j-1)/2) \rightarrow \min(j,5)} ((-1)^{(j-5+k)} * k^5 * (2k)!) / ((5-k)! * (k-1)! * k! * (j-k)! * (2k-j)!)$ 
%           note:  $(k-1)! = \text{gamma}(k)$ ;  $(2k-j)! = \text{gamma}(2k-j+1)$ 
% -----

% start of script
% -----
clear;
profile on;
t = cputime;
start_clock = clock;
% -----
% input constants and variables
% -----
v_heat_cap = 2.0;           % vol. heat capacity, MJ/(m^3 K)
r           = 0.1;         % radius, m
r_b        = 0.1;         % borehole radius, m

```



```

T_0          = 10;                % undisturbed ground temperature, °C
% -----
% starting values for numeric forward modelling
% -----
if_save      = 1;                % := 1 --> save end-time-temp.-matrix
% := 0 --> don't save matrix
if_save_p    = 1;                % := 1 --> save Num_LSL_Output-File
% := 0 --> don't save Num_LSL_Output-File
if_num       = 1;                % := 1 --> do numeric modelling
% := 0 --> do no numeric modelling
plot_lang    = 0;                % plot language: 1 := english, 0 := german
tc           = 1.00;             % thermal conductivity rock, W/(m K)
R_b          = 0.100;            % thermal borehole resistivity, (m K)/W
tc_step      = 0.01;            % tc step, W/(m K)
R_b_step     = 0.001;           % Rb step, (m K)/W
comp_start   = 2.0;             % start of comparation, d
comp_end     = 3.0;             % end of comparaion, d
n1           = 201;             % matrix dimension for tc, -
n2           = 201;             % matrix dimension for R_b, -
prec         = 1.0;             % round to position after decimal point, -
% -----
% tc           = 2.74863;
% R_b          = 0.188516548286207;
% -----
% 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
% -----
% 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');
% -----

% -----
% adapting of t-q-input-data
% -----
% [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);
% -----
[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_b_end = R_b_matrix(column,1);
tc = tc_end;
R_b = R_b_end;
% -----
end

```

```

% -----
% calculation for plot
% -----
% 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
end

```

```

% -----
% -----
% creation of Num_LSL_Output-File
% Num_LSL_Output-File data content
% -----
%
% 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 0
% 3 calc. tc and Rb: tc R_b 0 0 0 0 0
% 4 min_err and Rbcalc: m_err 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 ...
% 6 tc and data tc2 data2,1 data2,2 data2,3 data2,4 data2,5 ...
% 7 ... ..
% -----
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;
    plop4 = zeros(1,size(plop2,2));
    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=num2str(c(1,5));
    end
    if c(1,6) < 10
        ss=['0',num2str(round(c(1,6)))];
    else
        ss=num2str(round(c(1,6)));
    end
    plop5 = zeros(1,size(plop2,2));
    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
% -----

% % -----
--
% % Result Plots and Text Output
% % -----
--
x_cont_a  = 0; % zoom in X-left contour-plot           --> 90
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.
%
% [Tt] = LineSource_Laplace(r,a,t,q,lambda,r_b,Rb,T0)
%
% -----
% Numerical_Inversion of Laplace Transform Solution*:
% *Hellstroem, G. (1991) Ground Heat Storage; 262 p., University of Lund,
% Sweden (Dissertation). p.150
% Eq. 10.06:  $Tq(r,t) = q_1 / (2 * \pi * r_b * t c) * \sum_{j=1 \rightarrow 10} ((V_j / j) * K_0(W_j * r) / w_j * K_1(w_j * r_b))$ 
%
% Eq. 10.07:  $w_j = \sqrt{(j * \ln(2)) / (t \text{diff} * t)}$ 
% Eq. 10.08:  $V_j = \sum_{k=\text{Int}((j-1)/2) \rightarrow \min(j,5)} (((-1)^{(j-5)} * k^{5*(2k)!} / ((5-k)! * (k-1)! * k! * (j-k)! * (2k-j)!))$ 
%
% note:  $(k-1)! = \text{gamma}(k)$ ;  $(2k-j)! = \text{gamma}(2k-j+1)$ 
% -----
% Input Arguments:
% r - radius at which temperature is evaluated [m]

```

```

% r_b      - radius of the borehole [m]
% q_vec    - ntimesteps*2 matrix which contains:
%           q_vec(:,1) - time [s]
%           q_vec(:,2) - time-varying heat input [W/m]
% cv       - volumetric heat capacity of surrounding rock [MJ/(m^3 K)]
% lambda   - thermal conductivity of the surrounding rock [W/(m K)]
% Rb       - thermal borehole resistance [(m K)/W]
% T0       - starting temperature [°C]
% -----
% Output:
% Tt       - ntimesteps*2 matrix which contains:
%           Tt(:,1) - time [s]
%           Tt(:,2) - temperature [°C]
% -----

% start
% -----
% calculated variable
% -----
a = lambda/(cv*1e6);           % thermal diffusivity rock, m^2/s
% -----
% create Tt-matrix
% -----
n = size(q_vec,1);
Tt = zeros(n,2);
for itime = 1:size(q_vec,1)
    t = q_vec(itime,1);
    q = 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:  $T_q(r,t) = q_1/(2\pi r_b t c) \sum_{j=1 \rightarrow 10} ((V_j/j) * K_0(W_j r)/w_j K_1(w_j r_b))$ 
% -----
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] = Omega_j(j,a,t);
    S = S + V_j/j*besselk(0,omega_j*r)/(omega_j* ...
        besselk(1,omega_j*r_b));
    % T_t = T0+S; % note: uncertain if OK
end
S = (S*q/(2*pi*r_b*lambda)) + q*Rb + T_t;
% -----
% calculation of:
% Eq. 10.07:  $w_j = \sqrt{(j \ln(2))/(t \text{diff} * t)}$ 
% -----
function [omega_j] = Omega_j(j,a,t)
% computes omega_j (eq. 10.7)
omega_j = sqrt(j*log(2)/(a*t));
% -----
% calculation of:
% Eq. 10.08:  $V_j = \sum_{k=\text{Int}((j-1)/2) \rightarrow \min(j,5)} (((-1)^{(j-5)} * k^{5*(2k)!} / ((5-k)! * (k-1)! * k! * (j-k)! * (2k-j)!))$ 
% note: (k-1)! = gamma(k); (2k-j)! = gamma(2k-j+1)
% -----

```

```

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;
for k = k_min:k_max
    numerator = (-1).^(j-1)*k^5*factorial(2*k);
    denominator = factorial(5-k)*gamma(k)*factorial(k)*factorial(j-k) ...
                  *gamma(2*k-j+1);
    V_j = V_j + numerator/denominator;
end

```

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
%
% [delta_T_t] = Num_delta_T_t(tT_data,Tt)
%
% -----
% Input Arguments:
% tT_data      - time-temperature n,2-matrix [s -- °C], given
% Tt           - time-temperature n,2-matrix [s -- °C], calculated
% -----
% Output:
% delta_T_t    - time-delta-temperature n,2-matrix which contains:
%               tq_data(:,1) - time [s]
%               tq_data(:,2) - temperature [W/m]
% -----

% start
% -----
% cutting data-sets
% -----
n = size(Tt,1);
n_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
%
% [mean_err_matrix,tc_matrix,R_b_matrix] = Num_mean_err_matrix(n1,n2, ...
%   tc,R_b,r,t_diff,tq_data,r_b,T_0,tT_data,Tt)
%
% -----
% Input Arguments:
%   n1          - length tc-matrix [-]
%   n2          - length R_b-matrix [-]
%   tc          - starting value thermal conductivity [W/(m K)]
%   R_b         - starting value thermal borehole resistance [(m K)/W]
%   tc_step     - tc-step for mean error matrix [W/(m K)]
%   R_b_step    - R_b-step for mean error matrix [(m K)/W]
%   r           - radius for temp-calculation [m]
%   v_heat_cap  - volumetric heat capacity [MJ/(m^3 K)]
%   tq_data     - time-heat-input n,2-matrix [s -- W/m]
%   r_b         - borehole radius [m]
%   T_0         - undisturbed ground temperature [°C]
%   tT_data     - time-temperature n,2-matrix [s -- °C], given
%   comp_st_s   - starting time of comparison [s]
%   comp_end_s  - ending time of comparison [s]
% -----
% Output:
%   mean_err_matrix - n1,n2-matrix which contains:
%                   absolute value of mean deviation from tT_data [K]
%   tc_matrix       - n1,1-matrix of thermal conductivity values:
%                   tc_matrix(1,1) = tc + tc_step [W/(m K)]
%                   tc_matrix(2,1) = tc + tc_step + tc_step [W/(m K)]
%                   ...
%   R_b_matrix      - n2,1-matrix of thermal borehole resistance values:
%                   R_b_matrix(1,1) = R_b + R_b_step [W/(m K)]
%                   R_b_matrix(2,1) = R_b + R_b_step + R_b_step [W/(m K)]
%                   ...
% -----

% start
% -----
% building tc- and R_b-matrices
% -----
tc_matrix = zeros(n1,1);
R_b_matrix = zeros(n2,1);
mean_err_matrix = zeros(n1,n2);
for i = 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
% -----
% 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
    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)

```



```

%
% -----
% Input Arguments:
%   tT_data      - time-temperature n,2-matrix [s -- °C], given
%   Tt           - time-temperature n,2-matrix [s -- °C], calculated
%   delta_T_t    - time-delta-temperature n,2-matrix [s -- °C]
%   if_num       - grid search mode on = 1, else = 0
%   plot_output  - Output File
%   prec         - precision in digits after dot
%   hourtext     - computing time hour
%   mintext      - computing time minute
%   sectext      - computing time second
%   x_cont_a     - zoom in X-left contour-plot
%   x_cont_b     - zoom in X-right contour-plot
%   y_cont_a     - zoom in Y-down contour-plot
%   y_cont_b     - zoom in Y-up contour-plot
% -----
% Output:
%   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);
    hleg1 = 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);
% -----
% delta-T-t-plot
% -----
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

```

```

        title('t-\Delta T^2 plot','fontsize',fs);
    end
    hleg2 = legend('\Delta T^2');
    set(hleg2,'Location','NorthEast');
    xlabel('t [d]','fontsize',fs);
    ylabel('\Delta T^2 [K^2]','fontsize',fs);
    set(gca,'fontsize',fs);
    % -----
    if if_num == 1
        % -----
        % 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);
            hleg3 = 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
    Tx04='-----';
    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;
% -----

```

