

**Untersuchung der Temperaturlausbreitung
in der Hinterfüllung von Erdwärmesonden
als Werkzeug zur Qualitätssicherung
während Einbau und Thermal-Response-Test**

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
M.Sc. Klodwig Suibert Oskar Seibertz
aus Berlin

Tübingen
2019

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Eberhard Karls Universität Tübingen.

Tag der mündlichen Qualifikation:

06.08.2018

Dekan:

Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. Peter Dietrich

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. Peter Grathwohl

Kurzzusammenfassung

Das Wissen um die endliche Verfügbarkeit konventioneller, fossiler Rohstoffe führte zur intensivierten Auseinandersetzung mit alternativen, erneuerbaren Energiequellen. Im Zuge dieses als Energiewende bezeichneten Prozesses hat die thermische Nutzung des Untergrundes als Speicher, aber auch als Quelle von Wärme deutlich zugenommen. Diese Entwicklung verstärkte die Forschungsbestrebungen für die Beschreibung thermischer Parameter des Untergrundes sowie der Bauwerke, die zur Wärmergewinnung genutzt werden, über Temperaturverteilungen während Installation und Betrieb. Die zugehörigen Temperaturmessungen können dafür zeitgemäß, kostengünstig und unaufwendig mit Ramanspektrum basierter, verteilter Temperaturmessung auf Glasfaserkabeln (DTS) durchgeführt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde vom aktuellen, erkundungsbezogenen Stand der Technik aus, dem Thermal-Response-Test, untersucht, inwieweit eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Erdwärmesonden eines Sondenfeldes gegeben ist und diese Ergebnisse auch nicht etablierten, tiefenaufgelösten TRT gegenübergestellt. Aufgrund der Notwendigkeit der Verfügbarkeit von Erdwärmesonden zur TRT-Durchführung wurde sich entsprechend auch mit alternativen Erkundungsmöglichkeiten auseinandergesetzt. Dafür wurde sich mit der Temperaturcharakterisierung von flachem Untergrund sowie der Erdwärmesonde (EWS) beschäftigt. Temperaturmessungen während Aufheizen und Abkühlen des Untergrunds wurden mit DTS durchgeführt und alternativen Erkundungsverfahren, wie Direct-Push, gegenübergestellt. In Kombination mit den TRT-Temperaturverteilungen zeigte sich dabei, dass nicht nur geologische Schichten unterschieden werden können, sondern auch, dass der Ausbau der Erdwärmesonde einen erkennbaren Einfluss auf die Messungen hat. Aus diesem Grund wurden die Arbeiten mit Untersuchungen zur Nutzung der Hydrationswärme als Werkzeug des Qualitätsmanagements von EWS abgeschlossen. Dabei wurde auf numerische Wärmeleitungsmodellierung, Laborversuche und Feldversuche zurückgegriffen.

Aus der Summe der Ergebnisse wurden unterschiedliche Erklärungsansätze abgeleitet, welche notwendig sind für die Abschätzung, inwieweit die gefundenen Beobachtungen zur Erkundung und zum Qualitätsmanagement von Erdwärmesonden beitragen können. Dabei zeigte sich, dass verteilte Temperaturmessungen im Allgemeinen gut dazu geeignet sind, das relative Wärmespeichervermögen des Untergrundes zu ermitteln sowie mögliche Fehlstellen in der Hinterfüllung einer EWS zu detektieren. Damit kann die Temperaturmessung innerhalb einer EWS dazu genutzt werden, künftige Nutzungsarten zu definieren und die EWS vom Einbau an auf ihre Qualität zu überprüfen. Die Ankopplung dieser Versuche an herkömmliche Verfahren wie den Thermal-Response-Test hat sich bewährt, aber auch gezeigt, dass die Ergebnisse, die in TRT ermittelt werden, stark von den Einbaubedingungen der EWS abhängen. Ein direkter Vergleich von unterschiedlichen TRT eines EWS-Feldes (quartäre Sedimente, Sand, Kies, Schluff) wirft dabei Fragen zur Übertragbarkeit von TRT-Ergebnissen auf Nachbarsonden auf, die nicht abschließend geklärt werden konnten.

Disclaimer Daten

Alle Temperaturdaten aus den Experimenten können von den Archivservern des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) bezogen werden. Die Ordner-Struktur des Archivs ist in Appendix A dargestellt. Zusätzlich sind die Daten der angesprochenen Publikationen hinterlegt. Link: <https://www.ufz.de/record/dmp/archive/6446/de/>. Sollten Probleme beim Zugriff auftreten bitte ich darum sich direkt an das UFZ zu wenden.

Abstract

The knowledge about the limited availability of conventional, fossil energy resources directed the focus on alternative, renewable energy resources. In the course of this energy transition, there is an increased use of the shallow subsurface for thermal energy mining and storage. This increase in use led to deeper research in the field of characterisation of thermal properties of the (shallow) subsurface as well as investigations in related thermal energy mining systems like borehole ground heat exchanger (BHE). Hereby, temperature evolution during operation or exploration of the BHE with thermal response tests (TRT) were of special interest. Respective measurements can be done by Raman-spectre based distributed temperature sensing (DTS).

In the presented work the actual standard tool for geothermal exploration, the TRT, is the basis for further investigation. Here, the comparability between TRTs of different BHE at the same test site is of special interest as well as the comparison to the not widely established enhanced (depth depending) TRT. As the TRT itself is in need of a BHE, approaches more easy to apply were also investigated. To achieve the mentioned points, temperature evolution was measured with the help of DTS within the subsurface as well as within BHE. This was done during heating and cooling phases and partially compared to alternative exploration data like various Direct-Push (DP) techniques. The analysis of the temperature distributions showed not only that different geological layers can be distinguished during exploration phase but also that the construction process and quality have a measurable impact on the results. This led to investigations of the usability of hydration heat for BHE quality management by field site temperature measurements as well as laboratory and numeric analysis.

From the sum of the results multiple explanations were deduced which help to understand how the results of the exploration and the quality management approaches can help in determining the type of use of future BHE projects. Furthermore, it was shown that distributed temperature measurements are generally well suited for deduction of subsurface relative thermal storage potential as well as detection of possible failures within the grouting of a BHE. Temperature measurements in BHE can therefore be used to define the future thermal usage of the subsurface as well as help detecting failures of the BHE from installation onwards. Combining those approaches with conventional TRT was successful. However, it could be shown that the results of TRT strongly depend on BHE installation procedure. It is also shown that the direct comparison of different BHE from the same field site (quaternary sediments, sand gravel, tilt) shows varying results, leading to questions about the comparability of TRT of adjacent BHE which could not finally be resolved.

Disclaimer Data

The data of all experiments is stored at the science-server of the Helmholtz-Centre for Environmental Research (UFZ). The folder structure of the server can be found in appendix A. The data of the publications can be found there too. The data can be accessed as raw as well as processed data from the following link: <https://www.ufz.de/record/dmp/archive/6446/de/>. If you have trouble accessing the data, please directly contact someone at the UFZ to help you.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	1
2. Grundlagen und grundlegende Methodik	4
2.1. Erdwärmesonden	5
2.1.1. Typen von Erdwärmesonden	5
2.1.2. Hinterfüllung	6
2.1.3. Rechtlicher Rahmen	7
2.2. Die Versuche beeinflussende Wärmetransportmechanismen	8
2.2.1. Wärmeleitung	8
2.2.2. Konvektion	10
2.2.3. Wärmestrahlung	11
2.3. Charakterisierung des Testfelds	12
2.3.1. Direct-Push-Verfahren	12
2.3.2. Testfelderkundung durch Sedimentansprache	14
2.4. Experimentell genutzte Wärmeeintragsquellen	16
2.4.1. Thermal Response Test	17
2.4.2. Zementhydratation	19
2.5. Raman-Spektrum basierte, verteilte Temperaturmessung (DTS)	21
2.5.1. Messprinzip	22
2.5.2. DTS-Messkonfigurationen	23
2.5.3. Kalibrierung	24
3. Vergleichbarkeit von Thermal Response Tests an benachbarten Erdwärmesonden im Feld	27
3.1. Einleitung	27
3.2. Methodik	29
3.2.1. Erdwärmesondeninstallation und TRT	29
3.2.2. Modell-Erdwärmesonde an der TU Dresden	32
3.2.3. DTS-Konfiguration	34
3.2.4. Auswertung (enhanced) Thermal Response Test	34
3.3. Ergebnisse	35
3.3.1. Ergebnisse der eTRT	37
3.3.2. EWS-Modell an der TU Dresden	39
3.4. Diskussion: (e)TRT	39
4. Untersuchung des relativen Untergrundwärmespeichervermögens	55
4.1. Einleitung	55

4.2. Methodik	57
4.2.1. Wärmeinjektion und Temperaturmessung	57
4.2.2. Aufbereitung und Auswertung der Temperaturdaten	59
4.3. Ergebnisse	60
4.3.1. Feldversuch an den Erdwärmesonden	63
4.4. Diskussion: Relatives Untergrundwärmespeichervermögen	65
5. Untersuchung der Hydratationstemperaturentwicklung in EWS	77
5.1. Einleitung	77
5.2. Methodik	78
5.2.1. Numerische Modellierung	78
5.2.2. Laborversuch	83
5.3. Ergebnisse	90
5.3.1. Modellierung der Laborversuche	90
5.3.2. Laborversuche	91
5.3.3. Modellierung des Feldversuches	95
5.3.4. EWS-Feldversuche	96
5.4. Diskussion: Hydrationswärme als Qualitätsmanagementwerkzeug	98
6. Fazit und Ausblick	113
A. Verzeichnisbaum Datenträger	

Tabellenverzeichnis

3.1. EWS-Versuche: Übersicht Einfach-U-Sonde	29
3.2. EWS-Versuche: Übersicht Doppel-U-Sonde, DUS1	30
3.3. EWS-Versuche: Übersicht Doppel-U-Sonde 2, DUS2	31
3.4. EWS-Versuche: Übersicht Koaxialsonde, KOAX	31
3.5. EWS-Versuche: TRT Laufzeiten	32
3.6. EWS-Versuche: Übersicht DTS-Konfigurationen	34
3.7. EWS-Versuche: Gegenüberstellung TRT Auftragnehmer / Eigenauswertung	38
3.8. EWS-Versuche: TRT Auftragnehmer, Eigenauswertung TRT / eTRT . .	48
5.1. Hydratationstemperaturen: Parametertabelle Modellierung	83
5.2. Hydratationstemperaturen: Parametertabelle Modell: Feld	85
5.3. Hydratationstemperaturen: Abmessungen Laborversuch	87

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Erdwärmesondentypen	6
2.2.	Schematische Darstellung Direct-Push Verfahren	13
2.3.	Charakterisierung Testfeld	16
2.4.	Gegenüberstellung der Bohrungen	17
2.5.	Lage der EWS auf dem Testfeld	18
2.6.	Thermal Response Test Versuchsanordnung	20
2.7.	Wärmefreisetzung der frühen Zementhydratation	21
2.8.	Temperaturabhängigkeit der Rückstreuungssignale	23
2.9.	Typische DTS Messkonfigurationen	26
3.1.	EWS-Versuche: Versuchsaufbau Modellsäule Dresden	33
3.2.	EWS-Versuche: TRT Temperaturverteilungen EUS, DUS1 und KOAX	37
3.3.	EWS-Versuche: Ergebnisse DUS2 TRT	38
3.4.	EWS-Versuche: Ergebnisse eTRT	39
3.5.	EWS-Versuche: Ergebnisse EWS-Modell Dresden	40
3.6.	EWS-Versuche: Mögliche Rohr/LWL-Positionen in EWS	44
3.7.	EWS-Versuche: Gegenüberstellung Wärmeleitfähigkeiten	46
3.8.	EWS-Versuche: eTRT Ergebnisse	48
3.9.	EWS-Versuche: Korrelationen	51
4.1.	Wärmetracertest: Versuchsaufbau	58
4.2.	Wärmetracertest: Temperaturänderungen	61
4.3.	Wärmetracertest: Anfangstemperaturen	62
4.4.	Wärmetracertest: Abkühlbeobachtung EUS, DUS1, KOAX	64
4.5.	Wärmetracertest: Abkühlbeobachtung DUS2	65
4.6.	Wärmetracertest: Abklingzeiten alle Sonden	66
4.7.	Wärmetracertest: D50-/DP-Daten Vergleich	69
4.8.	Wärmetracertest: D50 / DP Streudiagramme	70
4.9.	Wärmetracertest: gemittelte Abklingzeiten alle Sonden	75
4.10.	Wärmetracertest: Maximal Temperaturen der eTRT	76
5.1.	Hydratationstemperaturen: Labormodell	80
5.2.	Hydratationstemperaturen: Eingangswärmeentwicklung	82
5.3.	Hydratationstemperaturen: Feldmodell	84
5.4.	Hydratationstemperaturen: Versuchsaufbau	86
5.5.	Hydratationstemperaturen: Versuchsaufbau 2	88
5.6.	Hydratationstemperaturen: Labormodellierung	90
5.7.	Hydratationstemperaturen: Laborversuche	92

5.8. Hydrations Temperaturen: Wärmeleitfähigkeitsmessungen	94
5.9. Hydrations Temperaturen: Feldübertragung	95
5.10. Hydrations Temperaturen: Hydrations Temperaturverlauf für EUS, DUS1 und KOAX	97
5.11. Hydrations Temperaturen: Hydrations Temperaturverlauf DUS2	98
5.12. Hydrations Temperaturen: Vergleich Labor und Modell Ergebnisse	100
5.13. Hydrations Temperaturen: S1 25 h	103
5.14. Hydrations Temperaturen: Fehlstellenausprägung für Kies	105
5.15. Hydrations Temperaturen: Vergleich der Ergebnisse Hydrations, eTRT, D50	109
5.16. Hydrations Temperaturen: HPT Daten	111

Akronyme

ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
CPT	Cone Penetrometer Test
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsche Industrienorm
DP	Direct-Push
DPIL	Direct-Push Injection Logging
DTS	Raman-Spektrum basiertes, verteiltes Temperatur- messen
DTS1	Oberstromige Messstelle
DTS2	Abstromige Messstelle
DUS	Doppel-U-Sonde
DUS1	Doppel-U-Sonde 1
DUS2	Doppel-U-Sonde 2
eTRT	enhanced Thermal Response Test
EU	Europäische Union
EUS	Einfach-U-Sonde
EWS	Erdwärmesonde
GOK	Geländeoberkante
GWL	Grundwasserleiter
HD-PE	High-Density Polyethylen
HPT	Hydraulic Profiling Tool
KD2Pro	Wärmeleitfähigkeitssensor
KOAX	Koaxialsonde
LWL	Lichtwellenleiter
N4386-A	DTS-Sensor

OGS	Open Geo Sys
Pt ₁₀₀	Platin-Widerstand (Ω)
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-KG	Polyvinylchlorid-Kanalgrundrohr
S1 – 5	Säulen aus dem Laborversuch Hydratationstemperatur
SAGS	Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten, geotechnischen Auswertung großflächiger Geothermiesysteme
TRT	Thermal Response Test
TU	Technische Universität
UTES	Underground Thermal Energy Storage
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WCP	Water Content Profiler

Symbole

A	Fläche	m^2
C	DTS-Kalibrierparameter	
P_s	Amplitude Stokes-Signal	eV
P_{as}	Amplitude Anti-Stokes-Signal	eV
R_b	Bohrlochwärmewiderstand	$K W^{-1}$
S_{VC}	volumetrische Wärmekapazität	$J m^{-3} K^{-1}$
T_0	ungestörte Untergrundtemperatur	K
T_1	höhere Temperatur	K
T_2	niedrige Temperatur	K
T_f	durchschnittliche Wärmeträgerfluidtemperatur	K
T_{max}	Maximaltemperatur	$^{\circ}C$
T_{dts}	DTS-Temperatur	K oder $^{\circ}C$
T_{in}	Vorlauftemperatur	K
T_{norm}	normierte Temperatur	K oder $^{\circ}C$
T_{out}	Rücklauftemperatur	K
$\Delta Q/\Delta t$	Wärmeleistung	$W s^{-1}$
$\Delta\alpha$	DTS-Kalibrierparameter: Dämpfungseigenschaften	
α	Temperaturleitfähigkeit	$m^2 s^{-1}$
γ	Energiedifferenz Eingangs-/Rückstreuungsphotonen	K
λ_f	Wärmeleitfähigkeit Fluidphase	$W m^{-1} K^{-1}$
λ_m	effektive Wärmeleitfähigkeit Sediment	$W m^{-1} K^{-1}$
λ_s	Wärmeleitfähigkeit Festphase	$W m^{-1} K^{-1}$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W m^{-1} K^{-1}$
∇T	Temperaturgradient	$K m^{-1}$
π	Kreiszahl	
ρ	Dichte	$kg m^{-3}$
\vec{q}	Wärmestromdichte	$W m^{-2}$
c_p	spezifische Wärmekapazität	$J kg^{-1} K^{-1}$
k_f	hydraulische Leitfähigkeit	$m s^{-1}$
k	Steigung linearer Abschnitt von $T_f(t)$	
m	Schnittpunkt mit Ordinate von $T_f(t)$	K
n	Porosität	
q	Wärmeleistungsabgabe pro Meter	$W m^{-1}$
r_b	Bohrlochradius	m
t	Zeit	s
x	Distanz	m

1. Einleitung und Motivation

Das Wissen um die Endlichkeit konventioneller, fossiler Energieträger führte zu einer intensivierten Erforschung alternativer, nach Möglichkeit erneuerbarer, Energieträger und Techniken zu deren Nutzarmachung. Dies ist Teil eines Prozesses, welcher in Deutschland als Energiewende bezeichnet wird. Als alternative Energiequellen für die Stromerzeugung werden zum Beispiel Solar- und Windenergie, aber auch Wasserkraft genutzt. In Ländern mittlerer bis hoher geografischer Breite, wie zum Beispiel Deutschland oder Großbritannien, werden aber durchschnittlich zwischen 48–55 % des Gesamtenergieverbrauchs ausschließlich für die Gewinnung von Wärme im häuslichen sowie industriellen Bereich genutzt (z.B. Scottish Government und UK Department of Energy and Climate Change (DECC), 2015; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2013). Dies spiegelt sich im Gesamtenergieverbrauch der Europäischen Union (EU) wider, der im Durchschnitt bei 50 % für die Wärmeerzeugung liegt (Directorate-General for Energy (European Union), 2016). Im Umkehrschluss zeigt dies, dass eine Energiewende nur bei gleichzeitiger Durchführung einer Wärmewende effektiv durchgeführt werden kann.

Wirft man einen genaueren Blick auf die Zahlen für die Europäische Union, so stellt man fest, dass ein großes Potential für die Nutzung alternativer Wärmequellen im häuslichen Bereich zu finden ist. Nach Statistics Explained (European Commission) (2016) entfallen 25 % des Gesamtenergieverbrauches der EU auf den häuslichen Bereich. Davon entfallen alleine 71 % auf Heizwärme und Warmwasserproduktion (Directorate-General for Energy (European Union), 2016). Die vorgenannten Zahlen sind der Grund, warum es in den letzten zwei Jahrzehnten zu einer intensivierten Nutzung des Untergrundes als Energiequelle bzw. -speicher kam. Die genutzten Geothermiesysteme werden dabei in zwei Teilbereiche unterteilt. Dies sind zum einen flache Niedrigenthalpie-Geothermiesysteme, die in aller Regel nur bis in Tiefen von maximal 400 m reichen (z.B. Arola et al., 2014; Allen und Milenic, 2003), und zum anderen tiefe Hochenthalpie-Geothermiesysteme für Tiefen größer 400 m (z.B. Bertani, 2012; Chamorro et al., 2012; Barbier, 2002).

Für die Wärmegegewinnung im häuslichen und kommunalen Bereich sind die flachen Geothermiesysteme von besonderem Interesse. Dies liegt zum einen an den geringeren Kosten im Vergleich zu tiefen Systemen und zum anderen am tatsächlichen Energiebedarf von privaten Haushalten und kommunalen Einrichtungen, der einen Einsatz von Hochenthalpie-Geothermiesystemen in der Regel nicht rechtfertigt. Eines der hierbei am häufigsten verwendeten Geothermiesysteme ist die sogenannte Erdwärmesonde (EWS). Die EWS wird Erdwärmekollektoren und Brunnendupletten aufgrund der einfachen, kostengünstigen Installation sowie des angenommenen geringen Umwelteinflusses vorgezogen (z.B. Borinaga-Treviño et al., 2013; Omer, 2008; Sanner et al., 2003). Neben der ausschließlichen Nutzung einer EWS zur Wärmeentnahme oder -entsorgung (unidirektionaler Betrieb) kann auch eine saisonale Speicherung von Überschusswärme in den Sommermonaten mit anschließendem, ausschließlichen Entnahmezyklus im Winter vorgenommen werden (bidirektionaler Betrieb). Bekannt ist der bidirektionale Betrieb vor allem von Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)-Systemen, bei denen die Wärmeenergie in einem Aquifer zur späteren Nutzung zwischengespeichert wird (z.B. Lee, 2010; Dickinson et al., 2009). Tatsächlich sind diese Systeme jedoch nicht auf Grundwasserleiter beschränkt, sondern können auch im geringleitenden oder ungesättigten Untergrund eingesetzt werden. Hierzu werden dann EWS genutzt, da diese zur Wärmegegewinnung nicht auf Massenaustausch mit dem Untergrund angewiesen sind.

In den letzten Jahren hat die Forschung im Bereich der Geothermie deutlich zugenommen. Ein wichtiger Punkt ist hierbei die Erkundung geeigneter Installationslokalitäten für das EWS-System. Im Fokus stehen hier Grundwasserleiter, aber auch die Nutzung von urbanen Wärmeinseln zur Gewinnung von Erdwärme (z.B. Arola et al., 2014; Arola und Korkka-Niemi, 2014; Zhu et al., 2010; Hamada et al., 2002). Die mögliche Nutzung von Erdwärme in einem Gebiet ist von unterschiedlichsten Faktoren beeinflusst. Vor allem die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und der thermische Bohrlochwiderstand sind hierbei von besonderem Interesse. Dies spiegelt sich in der fortgesetzten Forschung zum konventionellen Thermal Response Test (TRT) wider (z.B. Borinaga-Treviño et al., 2013; Marcotte und Pasquier, 2008; Sanner et al., 2005; Gehlin, 2002). Beim TRT werden die Vor- und Rücklauftemperaturen während einer künstlichen Leistungsbeaufschlagung der EWS über die Zeit erfasst und daraus eine effektive Wärmeleitfähigkeit für die gesamte EWS ermittelt. Seit dem Aufkommen der glasfaserbasierten, verteilten Temperaturmessungen ist es möglich, die Temperaturen in EWS zu jedem Zeitpunkt zu erfassen und somit den konventionellen TRT tiefenabhängig auszuwerten (z.B. Acuña und Palm, 2013; Fujii et al., 2009).

Neben Feldstudien hat die Verbesserung von Computerhardware und die Weiter- und Neuentwicklung von (numerischen) Modellen zu Studien in unterschiedlichen Teilbereichen der EWS-Erforschung geführt. Einige nennenswerte Beispiele sind Untersuchungen von EWS unter unterschiedlichen Betriebsmodi (z.B. Cui et al., 2008; Bandyopadhyay et al., 2008) sowie zum Einfluss des Grundwassers auf die EWS-Effizienz (z.B. Fan et al., 2007; Florides und Kalogirou, 2007). Auch Einflüsse der Heterogenität von Hinterfüllung und Untergrund (z.B. Rùhaak et al., 2015; Sommer et al., 2013; Read et al., 2013) oder EWS-interne Prozesse wie der thermische Kurzschluss (z.B. Zanchini et al., 2010; Zeng et al., 2003) sind Gegenstand aktueller Forschung. In einigen Fällen wurden diese Modelle mithilfe von Laborversuchen validiert (z.B. Erol und François, 2014; Eslami-nejad und Bernier, 2012; Beier et al., 2011)

Einige Autoren merken jedoch an, dass der Erkundung und Überwachung von neu geplanten sowie bestehenden Systemen mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden muss, um sicherzustellen, dass eine nachhaltige und sichere Nutzung gewährleistet werden kann (z.B. Vienken et al., 2015; Bloemendal et al., 2014; Brielmann et al., 2011; Butscher et al., 2011). Diese Anmerkungen werden begleitet von intensivierter Forschung zum Thema Qualitätsmanagement an EWS, z.B. Beobachtung der Wärmefahnenentwicklung und Einbauvorgangsüberwachung (z.B. Riegger, 2013; Jäger, 2013; Lo Russo et al., 2012).

Auf den Erkenntnissen und Ansätzen bestehender Arbeiten aufbauend (z.B. Riegger, 2013; Jäger, 2013; Riegger et al., 2012; Lo Russo et al., 2012), wurden hier weiterführende Arbeiten im Bereich der Erkundung und des Qualitätsmanagements von EWS durchgeführt. Dabei wurden aufbauend auf den Stand der Technik, den TRT, Versuche an EWS durchgeführt, die die Auswertbarkeit von DTS-Temperatursignalen aus der Hinterfüllung einer EWS in Hinsicht auf die Wärmeleitfähigkeit untersuchen. Dabei fand der Aspekt der Vergleichbarkeit der Ergebnisse eines TRT an unterschiedlichen, benachbarten Sonden besondere Beachtung. Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit technisch einfacher umzusetzende Ansätze, als Alternativen zum TRT, zur thermischen Erkundung eingesetzt werden können, vor allem in Hinblick auf die Nutzung bereits bestehender Bauwerke wie z.B. Piezometern. Aufgrund der Notwendigkeit, die Glasfasern während des Einbaus in die Hinterfüllung einzubringen, wurden zudem theoretische und angewandte Versuche zur Nutzung der Hydrationswärme als Qualitätsmanagementwerkzeug untersucht. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Veränderung des Temperatursignals durch Störungen und Fehlstellen gelegt, um somit die Lage potentieller Fehlstellen in der Hinterfüllung frühestmöglich zu detektieren und die Hydratationstemperaturrentwicklung damit als Qualitätsmanagementwerkzeug etablieren zu können.

2. Grundlagen und grundlegende Methodik

Die vorgestellten Arbeiten gliedern sich in die Themenbereiche Erkundung und Qualitätsmanagement. Dabei werden vom technischen Standard, dem TRT, aus Vergleiche und Untersuchungen angestellt sowie neue Verfahren und Methoden untersucht. Folgende Aspekte finden besondere Beachtung:

1. Feldversuch: Temperaturüberwachung von Erdwärmesonden mit Glasfasern in der Hinterfüllung zur Überprüfung der Auswert- und Vergleichbarkeit von TRTs und eTRTs (*Vorerkundung*)
2. Feldversuch: Untersuchung des relativen Wärmespeichervermögens des Untergrundes durch Beschreibung des Untergrundabkühlverhaltens als vorerst qualitative Alternative zum TRT (*Vorerkundung*)
3. Numerische Modellierung und Laborversuch: Untersuchung von potentiellen Temperaturanomalien während des Hydrationsprozesses in der Hinterfüllung, die durch Fehlstellen ausgelöst werden (*Qualitätsmanagement*)

Entsprechend muss sich vorab mit den unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Versuche sowie den die Versuche beeinflussenden Parametern auseinandergesetzt und vertraut gemacht werden. Die vorgestellten Versuche setzen sich thematisch mit der flachen Geothermie auseinander. Deshalb wird zuerst geklärt, für welches Geothermiesystem Versuche unternommen wurden, welche rechtlichen Rahmenbedingungen im Allgemeinen gelten und welche davon Beachtung fanden. Anschließend werden die Wärmetransportprozesse und ihr Einfluss auf die Versuche sowie die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mittels TRT erörtert. Abschließend wird das Testfeld, auf welchem alle Feldversuche durchgeführt wurden, sowie das primär genutzte Temperaturmessverfahren vorgestellt. Damit ist ein ausreichender Rahmen zum Verständnis der anschließend vorgestellten Arbeiten gegeben.

2.1. Erdwärmesonden

Die im Folgenden vorgestellten Versuche beziehen sich ausschließlich auf Erdwärmesonden (EWS). Diese sind eines der am häufigsten verwendeten flachen Geothermiesysteme. Es sind geschlossene Systeme, was bedeutet, dass kein Masseaustausch mit dem Untergrund stattfindet, um die Wärmegewinnung zu ermöglichen. Stattdessen zirkuliert ein Wärmeträgermedium, auch als Sole bezeichnet, in einem geschlossenen Rohrleitungssystem. Die Wärmeenergie wird über Wärmeleitung aus der Sole heraus oder in die Sole hinein transportiert. Erdwärmesonden funktionieren dementsprechend nach dem Prinzip des Wärmetauschers. Das Wärmeträgermedium wird dann der Wärmepumpe zugeführt, die für die Anhebung des Energieniveaus auf Heizniveau genutzt wird. Um die Wärmeleitung zwischen den Leitungen und dem Untergrund zu ermöglichen, werden unterschiedliche Substanzen verwendet (z.B. Erol und François, 2014). In Deutschland werden überwiegend speziell vorbereitete Thermozeemente genutzt.

Der Vorteil der EWS gegenüber vergleichbaren Systemen wie Erdwärmekollektoren und Brunnendupletten kann im geringen Platzbedarf und der nicht direkten Nutzung des Grundwassers gesehen werden. Somit können diese Systeme auch in enger bebauten Gebieten genutzt und auf eine Entnahme und Reinjektion von Grundwasser verzichtet werden.

2.1.1. Typen von Erdwärmesonden

Erdwärmesonden liegen in drei unterschiedlichen Konfigurationen vor. Dies sind Einfach- und Doppel-U-Sonden sowie Koaxialsonden (vgl. Abb. 2.1). Während für Einfach- und Doppel-U-Sonden aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kunststoffe überwiegend Polyethylen und High-Density Polyethylen für die Verrohrung zum Einsatz kommen (z.B. REHAU AG & Co, 2013), ist die Auswahl an Materialien für die Koaxialsonden deutlich umfangreicher und reicht von Kunststoffen hin zu Edelstahl. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass der Rücklauf einer Koaxialsonde im Vorlauf untergebracht und damit eine thermische Isolierung des Rücklaufs erwünscht ist. Zudem ist es auch üblich, die Koaxialsonden direkt in den Untergrund einzubringen (z.B. Zanchini et al., 2010), was erfordert, dass der Vorlauf deutlich stabiler ist als bei den U-Sonden. Die Direkteinbringung ist in Deutschland jedoch nicht erlaubt, da der Zwischenraum im Anschluss nicht, wie in Deutschland erforderlich, mit Hinterfüllung verpresst werden kann.

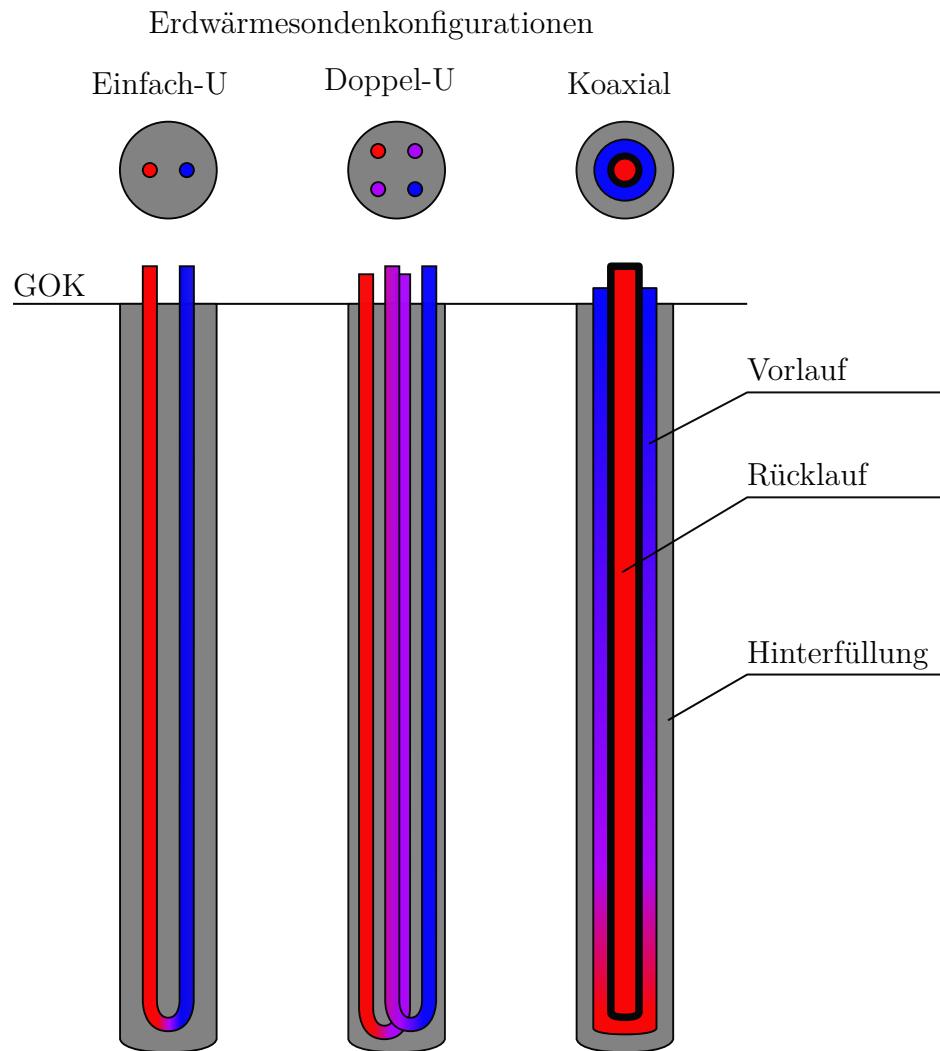


Abbildung 2.1.: Von links nach rechts die drei Haupterdwärmesondentypen in Quer- und Längsschnitt: Einfach-U-Sonde, Doppel-U-Sonde (hier seriell) und Koaxialsonde. Die Hinterfüllung muss einen Mindestradius haben, der 3 cm größer ist als der Radius des Sondenbündels. (GOK entspricht Geländeoberkante)

2.1.2. Hinterfüllung

Für Erdwärmesonden erfüllt die Hinterfüllung zwei wichtige Funktionen. Zum einen ist sie die thermische Ankopplung der Verrohrung an den Untergrund, zum anderen ist sie die hydraulische Versiegelung des Bohrlochs (z.B. Self et al., 2013; Omer, 2008). Dabei hat auch die hydraulische Versiegelung zwei Aufgaben zu erfüllen: a) Verhinderung hydraulischer Kurzschlüsse zwischen unterschiedlichen Grundwasserstockwerken, und b)

Verhinderung des Austritts von Wärmeträgerfluid in den Untergrund während einer Leckage des Rohrleitungssystems.

Die Hinterfüllung von EWS erfolgt in Deutschland überwiegend mit Zementen oder speziellen Trockenmischungen auf Zementbasis, die mit Wasser zu einer Verpressungssuspension angerührt werden. Die Grundlage bildet dabei häufig Hochofenzement, z.B. CEM III/B (z.B. Terra Calidus GmbH, 2009), der aufgrund seines Klinkeranteils von nur 5–64% und dementsprechend größeren Anteilen an Hüttensand eine geringe Hydrationswärmeentwicklung aufweist (DIN EN 197, 2011). Die thermische Aufwertung erfolgt in der Regel durch Quarzmehl. Beimischungen von Tonmineralen sollen die Fließ- und Pumpeigenschaften der Zementsuspension verbessern.

Die Einbringung der Zementsuspension erfolgt im Anschluss an den Einbau der Rohrleitungen in die Bohrung. Dabei ist darauf zu achten, dass das Kontraktorverfahren genutzt wird. Kernbestandteil dieses Verfahrens ist die Verpressung der Zementsuspension unterhalb des aktuellen Zementpiegels. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass keine Fluideinschlüsse in der Zementsuspension entstehen können, wenn Zementsuspension auf den Zementpiegel aufschlägt. Als Fluide gelten hierbei vor allem Luft und Wasser, die eine geringere Wärmeleitfähigkeit als die eingesetzten Zemente haben.

2.1.3. Rechtlicher Rahmen

Um den sicheren Einbau sowie die sichere Nutzung von EWS zu gewährleisten, wurden in weiten Teilen der Welt entsprechende Regulierungen und Richtlinien aufgestellt (Empfehlungen für die EU z.B. Sanner (2008)). Da aber alle experimentellen Arbeiten für das vorgestellte Projekt ausschließlich in Deutschland durchgeführt wurden, werden hier auch ausschließlich deutsche Richtlinien vorgestellt. Dabei können aufgrund der föderalen Organisationsstruktur Deutschlands die einzelnen Länder über eigene Richtlinien verfügen. Sie folgen jedoch überwiegend der VDI-4640 (VDI, 2010), sodass nur kleine Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern bestehen.

Die Auseinandersetzung mit den Richtlinien wurde durchgeführt, damit der experimentelle Aufbau im Labor dicht am realen Einbau in Deutschland liegt. Zu diesem Zweck wurden wichtige Kernpunkte der Richtlinien der Länder Sachsen und Niedersachsen herausgearbeitet (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 2015; Niedersächsisches Umweltministerium, 2006), um sicherstellen zu können, dass während allen (kontrollierbaren) Phasen des Experiments die Richtlinien eingehalten werden. Folgende, für den Aufbau wichtige Elemente wurden identifiziert:

1. Nutzung von Abstandshaltern, um einen direkten Kontakt von Vor- und Rücklaufverrohrung zu unterbinden.
2. Nutzung von Zentrierern, um sicherzustellen, dass das Säulenbündel im Bohrlochzentrum angesiedelt ist.
3. Der Radius des Bohrloches muss mindestens 0,03 m größer als der Radius des Säulenbündels sein.
4. Die gewählte Hinterfüllung muss eine hydraulische Leitfähigkeit kleiner $10^{-10} - 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ haben und frostresistent sein.
5. Das Kontraktorverfahren muss während der Verpressung eingehalten werden.

Weitere Regulierungen, wie sie sich zum Beispiel aus dem Bundesberggesetz (BBergG, Bundesgesetzgeber Deutschland (1980)) ableiten oder solche, die den Abstand zwischen Sonden regeln, wurden weitestgehend ignoriert, da sie ausschließlich für das EWS-Feldexperiment von Interesse gewesen wären und auch nur dann, wenn eine tatsächliche geothermische Nutzung der EWS angestrebt worden wäre. Dies ist jedoch nicht der Fall.

2.2. Die Versuche beeinflussende Wärmetransportmechanismen

Wie bereits vorhergehend erwähnt, erfolgt der Wärmeübergang aus dem Untergrund (auch ungesättigt) in die EWS über Wärmeleitung. Dementsprechend stellt die Wärmeleitung den überwiegenden Wärmetransportmechanismus in allen Experimenten und Betrachtungen dar. Aber auch Konvektion und Wärmestrahlung sind während der Experimente aufgetreten, zum Beispiel im Grundwasser hervorgerufen durch den Wärmeintrag oder als ungewollter Wärmeintrag durch solare Strahlung. Diese Effekte wurden jedoch nur als mögliche Fehlerquellen diskutiert und nicht quantitativ untersucht. Dementsprechend wurden in der numerischen, thermischen Modellierung als Vereinfachung des Systems ausschließlich Wärmeleitungsmodellierungen durchgeführt.

2.2.1. Wärmeleitung

Der primär betrachtete Prozess der Wärmeleitung, auch Konduktion oder Diffusion genannt, bezeichnet den Transport von Wärme im Inneren von oder zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Körpern auf Basis von Atom-, Molekül- und Elektronenbewegung.

Der Wärmefluss kommt dabei durch einen Temperaturgradienten zustande und zeigt, dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgend, immer in Richtung des niedrigsten Potentials, welches der niedrigsten Temperatur im System entspricht. Dieser Prozess findet ohne Massenverlagerung statt und wird damit von der Konvektion getrennt betrachtet (z.B. Demtröder, 2015). In EWS wird dies genutzt, um durch Abkühlung des Wärmeträgerfluids in den Rohren unter die Untergrundtemperatur einen Wärmefluss in die EWS zu erzeugen.

Die Beschreibung der Wärmeleitung erfolgt über die Wärmestromdichte (\vec{q} ; W m^{-2}). Basis ist hier wieder der Temperaturgradient (∇T ; K m^{-1}), der aus den Temperaturen T_1 (wärmer) und T_2 (kälter) über eine Strecke gebildet wird. Der stationäre Wärmefluss ist dabei zusätzlich von der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit (λ ; $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) des betrachteten Stoffes abhängig:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.1)$$

Durch Integration der Glg. 2.1 über die Fläche erhält man die Wärmeleistung über die Zeit ($\Delta Q/\Delta t$; W s^{-1}). Die eindimensionale Form dieser Gleichung, hier in x -Richtung gezeigt, ist auch als Fouriersches Gesetz bekannt:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Dabei stellt $\Delta T/\Delta x$ die Temperaturänderung über die Strecke zwischen den Enden und A (m^2) die Querschnittsfläche des Körpers dar.

Streng genommen gelten diese, den Wärmetransport beschreibenden, Gleichungen ausschließlich bei Annahme von homogener und isotroper Verteilung der relevanten Materialparameter im Untergrund. Die Wärmeleitfähigkeit in und um eine EWS kann jedoch eine Richtungsabhängigkeit besitzen, wie sie z.B. in eingeregelter Sedimenten oder in den Mineralien selbst vorliegen kann. In diesem Fall wird λ , vergleichbar mit der hydraulischen Leitfähigkeit k_f , als Tensor zweiter Ordnung beschrieben (hier ausgerichtet entlang der Hauptachsen der Anisotropie):

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Bei genauerer Betrachtung des flachen Untergrundes zeigt sich jedoch, dass in Lockersedimenten eine Feststellung der tatsächlichen Anisotropie der Untergrundwärmeleitfä-

higkeit nur mit sehr großem technischen Aufwand möglich wäre. Dies begründet sich damit, dass die Wärmeleitfähigkeit des Sediments eine komplizierte Zusammensetzung aus dem Mischungsverhältnis von Fest- und Fluidphase, des Lagerungsgefüges und des Grundwasserstromes ist. Aus diesem Grund wird häufig auf eine Vereinfachung zur Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit des Sediments λ_m zurückgegriffen (z.B. Lo Russo et al., 2012; Patrick A. und Franklin W., 1997):

$$\lambda_m = n\lambda_f + (1 - n)\lambda_s \quad (2.4)$$

Gleichung 2.4 verrechnet die Wärmeleitfähigkeiten der festen (λ_s) und der fluiden Phase (λ_f) mit der vorherrschenden Porosität (n) des Untergrundes. Man erhält auf diese Weise eine effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes. Diese Gleichung vernachlässigt jedoch das Gefüge und auch mögliche Grundwasserströmungen und ist auf Abschätzung oder auf Messwerte der Wärmeleitfähigkeit der Festphase angewiesen. Dies kann z.B. mit den Werten aus der VDI (2010) erfolgen.

Betrachtet man nichtstationäre Wärmeleitung, so wird auf die Wärmeleitungsgleichung zurückgegriffen. Bei dieser partiellen Differentialgleichung kann eine Temperaturverteilung für bestimmte Zeitpunkte ermittelt werden $\delta T/\delta t$:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \nabla(\alpha \nabla T) \quad (2.5)$$

Dabei ist α die wie folgt definierte Temperaturleitfähigkeit:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (2.6)$$

Die Temperaturleitfähigkeit ist neben der Wärmeleitfähigkeit auch abhängig von der spezifischen Wärmekapazität (c_p) und der Dichte (ρ) des wärmeleitenden Mediums. Für die Lösung der Wärmeleitungsgleichung wird in der geothermischen Forschung und Praxis in der Regel auf numerische Modelliersoftware wie FeFlow (Trefry und Muffels, 2007) oder OpenGeoSys (Kolditz et al., 2012) zurückgegriffen.

2.2.2. Konvektion

Im Gegensatz zur Wärmeleitung, der Konduktion, findet bei der sogenannten Konvektion, auch Wärmemitführung genannt, der Transport der Wärme über ein strömendes Fluid statt. Für die vorgestellten Experimente spielt dabei vor allem die Konvektion in Form von Advektion eine Rolle. Die Advektion beschreibt hierbei den Transport eines

gelösten Stoffes oder von Wärmeenergie mit und in Richtung des Grundwasserstroms (z.B. Hölting und Coldewey, 2013).

Neben der erzwungenen Mitführung von Wärme durch den Grundwasserfluss kann es auch zu einer freiwilligen, gravitativ getriebenen Konvektion kommen. Bei dieser verursachen unterschiedliche Temperaturen einen Dichteunterschied im Fluid, der zur Bildung von sogenannten Konvektionszellen führt. Diese transportieren Fluid und damit Wärme in einem zur Gravitation parallelen Strömungssystem.

Freiwillige Konvektion sowie die Advektion (bei vorliegendem Grundwasserfluss) können bei geothermischen Feldexperimenten, welche bis in den Grundwasserleiter reichen, nicht vermieden werden. Möglichkeiten zur Charakterisierung der Grundwasserströmung über Wärmesignale wurden an unterschiedlichen Stellen in der Literatur bereits behandelt (z.B. Bakker et al., 2015; Bridger und Allen, 2014; Anderson, 2005; Hamada et al., 2002). Als Versuche sind hier z.B. Wärmetracer-Versuche zu nennen, mit denen Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten ermittelt werden können (z.B. Bakker et al., 2015; Leaf et al., 2012). Für die hier vorgestellten Versuche ist die Quantifizierung der Grundwasserströmung anhand der Temperatur nicht so bedeutend wie das Aufzeigen, dass tatsächlich ein messbarer Einfluss auf die unterschiedlichen Phasen der geothermalen Exploration und den anschließenden Erschließungsprozess besteht.

2.2.3. Wärmestrahlung

Abschließend wird die Wärmestrahlung vorgestellt. Die Wärmestrahlung ist ein makroskopischer Wärmetransportprozess, bei welchem von einem Körper Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ausgesandt wird. Als Quellen von Wärmestrahlung kommen in der Geothermie Festkörper und Fluide in Frage. Im Gegensatz zu Konduktion und Konvektion erfolgt die Wärmeübertragung nicht an ein Medium gebunden und kann somit auch im Vakuum erfolgen. Die Abstrahlung erfolgt dabei ausschließlich von der Oberfläche des Körpers.

Die Wärmestrahlung wird als der Wärmetransportprozess mit dem geringsten Einfluss auf die Feldexperimente angesehen. Dies gilt trotz der weitreichenden Nutzung von Wärmestrahlung als Charakterisierungswerkzeug der thermischen Erkundung in den Geowissenschaften und darüber hinaus (z.B. Rowan et al., 2003; Sabins, 1999; Green et al., 1998; Watson, 1975). Für die Darstellung der Transportprozesse in geothermischen Systemen spielt die Wärmestrahlung trotzdem nur eine untergeordnete Rolle, was durch ihre Nichtbeachtung in geothermischen Modellen in der Literatur Ausdruck findet.

Für die experimentelle Anwendung im Labor sieht der Fall jedoch anders aus. Einige der hier vorgestellten Ergebnisse entstammen Labormessungen. Dafür wurden unterschiedlich skalierte EWS nachgebaut. Die Temperaturverteilungen im Inneren dieser Modelle sind von der Wärmestrahlung, die ihre Umgebung an sie abgibt, messbar beeinflusst, vergleichbar mit den Zuleitungen während der Durchführung eines TRT (z.B. Choi und Ooka, 2016a,b). Dementsprechend müssen Maßnahmen zur Reduktion von Energieeintrag durch Wärmestrahlung, wie Reflektoren, genutzt werden.

2.3. Charakterisierung des Testfelds

Alle folgenden vorgestellten Feldversuche wurden auf demselben Testfeld durchgeführt. Dieses befindet sich auf dem Gelände des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) und wird für unterschiedliche Experimente genutzt. Die Erkundung besteht dabei aus drei Ansätzen: a) *in situ* Erkundung von Untergrundparametern mit Direct-Push(DP)-Technologie; b) Sedimentansprachen; c) Labormessungen.

Das Testfeld ist dabei in zweierlei Hinsicht besonders geeignet für vergleichende Versuche. Zum einen kann die gesamte technische Infrastruktur des UFZ genutzt werden, zum anderen hat sich das Testfeld bereits in vorhergehenden Erkundungen als vertikal sehr heterogen herausgestellt. Die Heterogenität des Testfeldes ist hierbei als positiv für die Versuche zu bewerten, weil auf kurzen Entfernungen eine deutliche Änderung der Sedimentzusammensetzung erreicht wird. Damit decken die Versuche trotz der geringen Bohrtiefen von 16 – 25 m unterschiedliche mögliche geologische Bedingungen ab, die beim Einbau von flachen EWS angetroffen werden können.

2.3.1. Direct-Push-Verfahren

Neben der Ansprache von Bohrgut wurde hier zur Testfeldcharakterisierung Direct-Push genutzt. Das Direct-Push(DP)-Verfahren, übersetzt nach Leven et al. (2011) als „direktes Vortriebverfahren“, erlaubt die geringinvasive Charakterisierung des flachen Untergrundes (z.B. Vienken et al., 2014; Butler et al., 2002). Dabei können geologische, geophysikalische oder hydraulische und mechanische Eigenschaften des Untergrundes erfasst werden (z.B. Bumberger et al.; Leven et al., 2011; Dietrich und Leven, 2006). Das Verfahren basiert, wie in Abb. 2.2 dargestellt, auf dem Vortrieb eines Sondierkopfes an einem Bohrgestänge in den Untergrund. Der Vortrieb wird dabei durch statische Auflast, wie Lastwagen oder Bohrraupe, oder dynamischen Lasteintrag, z.B. pneumatischer Hammer,

erreicht. Je nach Untergrundzusammensetzung sowie Größe und Leistungsfähigkeit der eingesetzten Vortriebseinheiten können Sondierungstiefen zwischen 10 und 40 m erreicht werden.

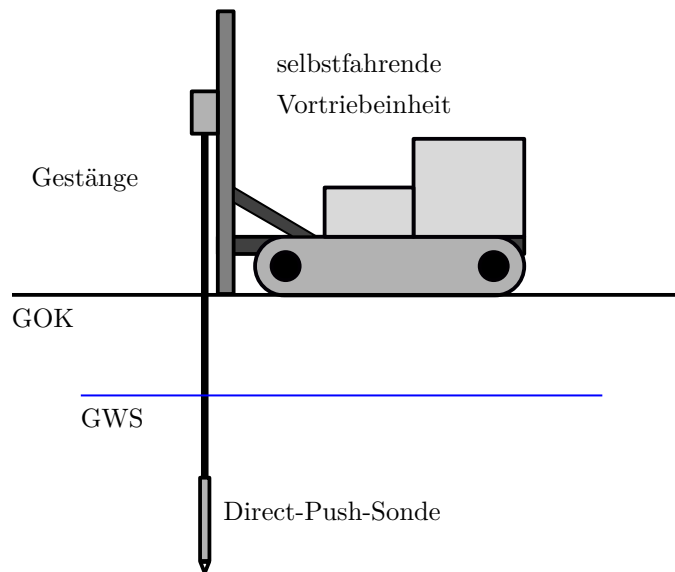


Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung der Durchführung einer Direct-Push-Sondierung mit einer selbstfahrenden Vortriebseinheit. Die Vortriebseinheit treibt den Sondierkopf mit Hilfe eines Gestänges in den Untergrund. Je nach Verfahren können dabei Messungen ober- und unterhalb des Grundwasserspiegels (GWS) durchgeführt werden.

Bei einigen Varianten des DP-Verfahrens kann die Messung kontinuierlich während des Vortriebs erfolgen, z.B. beim Cone Penetrometer Test (CPT) und Hydraulic Profiling Tool (HPT). Bei anderen Varianten muss der Vortrieb für die Messung unterbrochen werden, wie etwa beim DP Injection Logging (DPIL). Neben der Sondierung ist es möglich, den Einbau von Messstellen (temporär wie stationär) durchzuführen sowie Proben des Untergrundes zu erhalten.

Für das vorgestellte Testfeld wurden folgende DP-Messungen durchgeführt: HPT gekoppelt mit Gleichstromgeoelektrik (EC-Log) und ein mit einem Water Content Profiler (WCP) gekoppelter CPT. Abschließend wurden Sedimentproben via Liner gewonnen.

Die hydraulische Charakterisierung erfolgte über HPT und DP-Slug-Tests. Für HPT-Messungen wurde dabei Wasser in den Untergrund injiziert und Injektionsrate sowie Injektionsdruck gemessen (McCall et al., 2009). Die relative hydraulische Leitfähigkeit, ein Parameter, der eng mit der absoluten hydraulischen Leitfähigkeit verwandt ist, errechnet sich dann aus dem Verhältnis von Injektionsrate zu Injektionsdruck (z.B. Vien-

ken et al., 2012; Leven et al., 2011). Zusätzlich wurden in fünf unterschiedlichen Tiefen pneumatische DP-Slug-Tests in temporären Messstellen durchgeführt (SPS16). Die Auswertung erfolgte nach Butler et al. (2003) mit einem Modell von McElwee et al. (1992), welches für gespannte Grundwasserleiter genutzt werden kann (vgl. Grundwasserspiegel Abb. 2.3).

Durch die Nutzung von EC-Log und CPT kann auf die Sedimentzusammensetzung geschlossen werden. Dafür wird während des EC-Logs kontinuierlich ein Strom in den Untergrund eingespeist und die resultierende Spannung gemessen (z.B. mit Elektroden in Wenner-Anordnung). Dies ermöglicht die schnelle Identifizierung von Schichten mit unterschiedlichen Tongehalten, wobei davon ausgegangen wird, dass unter nicht salinaren Bedingungen ein Anstieg im Tongehalt mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit einhergeht (z.B. Leven et al., 2011; Schulmeister et al., 2003). Im Gegenzug dazu wird bei CPT die Plastizität des Untergrundes ermittelt. Eine CPT-Messung erfordert den kontinuierlichen Vortrieb eines Penetrometers, mit 2 cm s^{-1} , in den Untergrund. Dabei werden zeitgleich Spitzendruck, Mantelreibung und Porenwasserdruck gemessen. Das CPT-Reibungsverhältnis, also das um den Porenwasserdruck korrigierte Verhältnis von Mantelreibung und Spitzendruck, kann dann als einfacher Parameter zur Beschreibung der Plastizität des Untergrundes genutzt werden (z.B. Lunne et al., 1997).

Über den WCP, der mit dem CPT gemeinsam genutzt werden kann, kann der Wassergehalt über die Frequency-Domain-Technique bestimmt werden (z.B. Vienken et al., 2013; Hilhorst, 1998). Dabei gilt, dass der volumetrische Wassergehalt in der gesättigten Zone gleich ihrer Porosität ist.

Zusätzlich wurden Liner für die Probengewinnung gezogen. Dies erfolgte ebenfalls über DP, wobei ein Leerrohr in einem Schneidschuh in den Untergrund getrieben wurde. Die Liner wurden in 0,2 m Intervalle zerlegt. Aufgrund der starken Störung und Kompaktierung der Probe wurde der Liner von 12,2 bis 13,4 muGOK (Meter unter Geländeoberkante) als eine Probe behandelt. Die Proben wurden anschließend im Labor mit einem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät, KD2Pro (Decagon Devices Inc., 2014), in Einfach-Nadel-Konfiguration untersucht.

2.3.2. Testfelderkundung durch Sedimentansprache

Die zweite genutzte Technik zur Testfeldcharakterisierung ist die Sedimentansprache. Sie erfolgte anhand zweier unterschiedlicher Bohrungen. Die erste Ansprache erfolgte für eine Endlosschneckenbohrung mit einer Endtiefe von 17 m, die für die Einrichtung eines der Piezometer für einen Wärmetracerversuch angelegt wurde. Die zweite Anspra-

che wurde nicht im Zuge dieser Arbeit durchgeführt und erfolgte durch Thomas Vienen im Zuge des SAGS-Projektes (Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme) an einer Kernbohrung. An den Kernen wurden, ebenfalls im Zuge des SAGS-Projektes, durch Manuel Kreck Wärmeleitfähigkeitsmessungen durchgeführt. Die Daten werden hier mit freundlicher Genehmigung gezeigt.

Das geologische Profil, abgeleitet aus dem Bohrgut der Endlosschneckenbohrung zur Setzung der Grundwassermessstellen, hat aufgrund des genutzten Bohrverfahrens eine Ungenauigkeit von ungefähr einem halben Meter. Die Bohrung wurde bis in eine Tiefe von 17 m abgeteuft. Der Grundwasserspiegel wurde bei 9,97 muGOK angetroffen. Der Untergrund setzt sich unterhalb des Mutterbodens (ab 0,3 m) bis zur Endtiefe aus quartären Sedimenten zusammen. Dabei dominieren bis ungefähr 10,1 muGOK Silt und Lehm mit geringmächtigen Lagen aus Fein- und Mittelsand, die zwischen 5,0 und 5,5 muGOK und 7,0 bis 8,0 muGOK eingeschaltet sind. Die erste Einschaltung wurde auch von EC-Log und HPT durch verringerte elektrische Leitfähigkeit sowie erhöhte relative hydraulische Leitfähigkeit detektiert. Die zweite Einschaltung zeigte kein klares Signal für EC-Log und HPT. Der anschließende Grundwasserleiter setzt sich überwiegend aus quartären Sanden mit Kies und Tonanteilen zusammen. Zwischen 10,1 und 13 muGOK förderte der Liner überwiegend kiesigen, schluffigen Sand zutage. Dabei wies der Grundwasserleiter mit zunehmender Tiefe weniger Feinanteile auf. Von 14 bis 15 muGOK wurde eine sandige, tonige Schluffschicht angetroffen, die auch von EC-Log, HPT und, durch erhöhte Reibungsverhältnisse, auch von CPT abgebildet wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.3 zur besseren Übersicht visualisiert.

Da die geologischen Untersuchungen gezeigt haben, dass der Untergrund eine starke Heterogenität aufweist, wurde eine Kernbohrung für die drei im Zuge des SAGS-Projektes installierten EWS durchgeführt. Die Rammkernbohrung wurde auf 25 m abgeteuft und für die Bestimmung der Sedimentzusammensetzung sowie der Wärmeleitfähigkeit genutzt (vgl. Abb. 2.4). Beide Bohrungen zeigen eine gute Übereinstimmung für die abgedeckten Bereiche. Die Untergrundbereiche, die nur durch die Rammbohrung abgedeckt werden, zeigen einen von Sand/Kies dominierten Untergrund.

Der hydraulische Gradient auf dem Testfeld wurde auf 0,003 bis 0,004 bei Fließrichtung Nordwest bestimmt. Aufgrund des Abstandes der beiden Messstellen für den Wärmetrauertest von nur 1,4 m konnten die Werte nicht aus Grundwasserspiegelmessungen in den beiden Messstellen ermittelt werden. Stattdessen wurden Messstellen in der Umgebung genutzt.

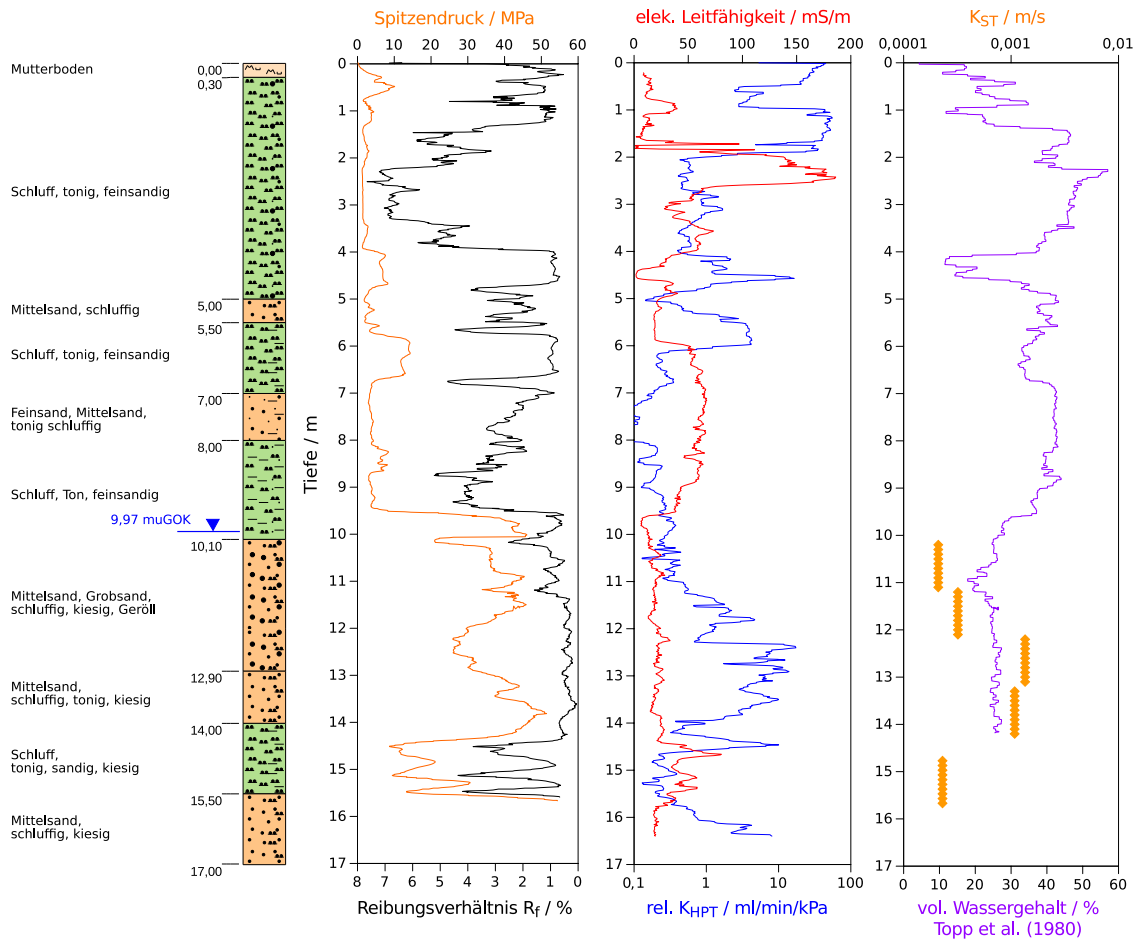


Abbildung 2.3.: Charakterisierung des Testfelds aus Bohrgut- und Direct-Push-Messungen. Für eine ausführliche Beschreibung siehe Text.

Die verbauten EWS und die Lichtwellenleiter (LWL) sind wie in Abb. 2.5 schematisch aufgezeigt zueinander räumlich verortet. Die Kabel mussten über die Straße geführt werden, da die DTS-Technik sowie das Kalibrierbad auf der anderen Seite untergebracht waren. Im Januar 2017 wurden die LWL zerstört, was zu einem vorübergehenden Ausfall der Messanordnung führte. Dies zeigt die Fragilität von DTS-Messanordnungen, die trotz größtmöglicher Umsicht nicht vollständig vor mechanischer Belastung geschützt werden konnten, was zu mehreren Brüchen des LWL führte.

2.4. Experimentell genutzte Wärmeeintragsquellen

Um Temperaturveränderungen messen zu können, bedarf es eines Wärmeeintrages/- austrages in/aus den/dem Untergrund. Dazu wurden in dieser Arbeit zwei unterschied-

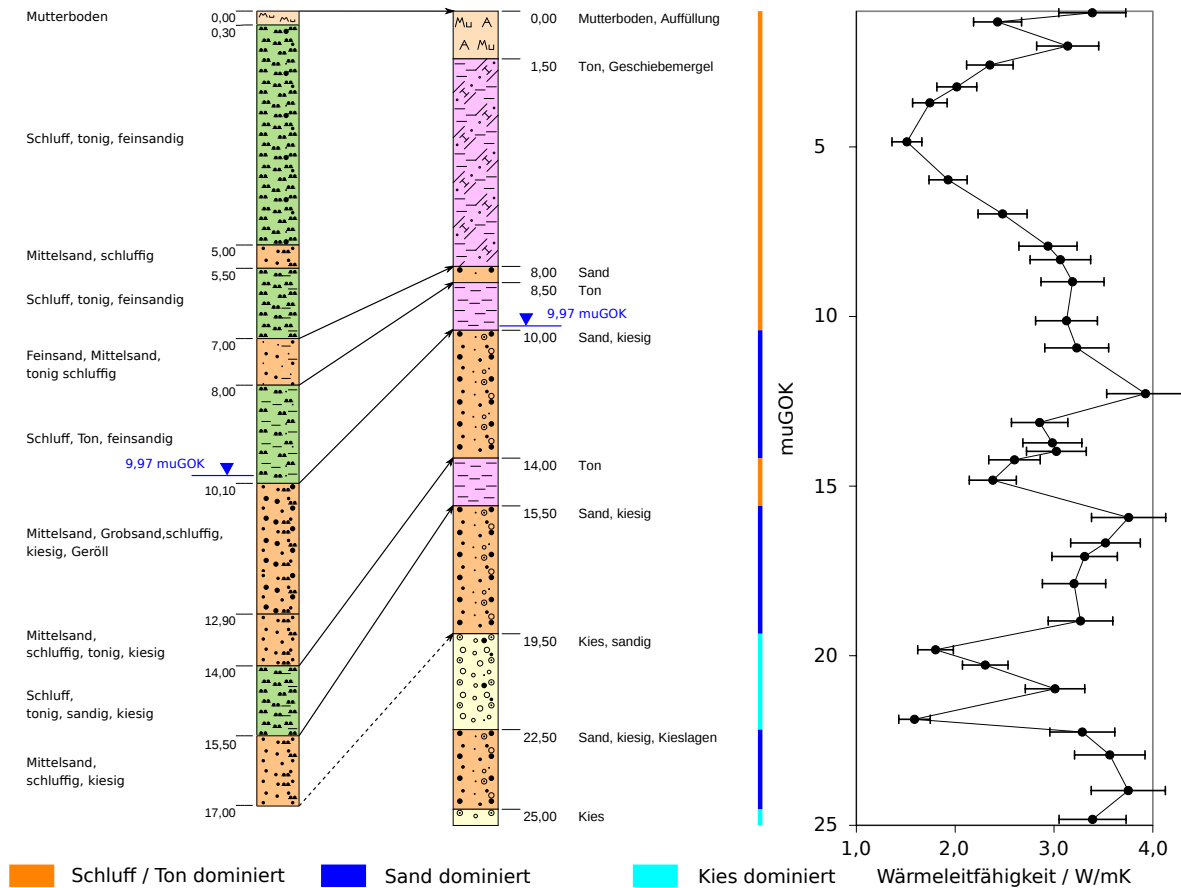


Abbildung 2.4.: Gegenüberstellung der Schichtverzeichnisse der beiden Bohrungen und der Wärmeleitfähigkeitsmessungen. Die Bohrungen zeigen eine gute Übereinstimmung (Auswertung der zweiten Bohrung sowie Wärmeleitfähigkeitsmessung wurden im Zuge des SAGS-Projekts durchgeführt, s.T.)

liche Wärmeintragsquellen genutzt. Bedingung für deren Auswahl war, dass die Quellen während eines Standardeinbaus einer EWS verfügbar sind. Bei den Quellen handelt es sich um den Explorationsansatz Thermal Response Test und die Zementhydratation der Hinterfüllung.

2.4.1. Thermal Response Test

Die Nutzung des Thermal Response Tests, kurz TRT, als Wärmeintragsquelle beruht auf dem Fakt, dass er das aktuelle Standardverfahren zur Ermittlung relevanter Wärmetransportparameter in der geothermischen Erkundung ist. Zielparameter sind die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und der thermische Bohrlochwiderstand (R_b).

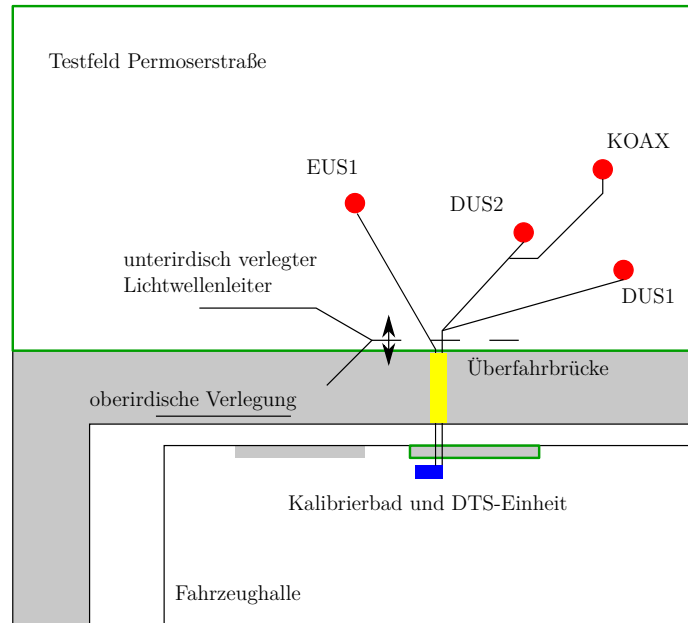


Abbildung 2.5.: Schematische Darstellung der Lage der Sonden zueinander, sowie die Art der LWL-Führung. Nicht maßstabsgetreu.

Die Berechnung der genannten Parameter kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine einfache und weit verbreitete Methode zur Berechnung stellt das Verfahren der unendlichen Linienquelle dar (engl. infinite line source) (z.B. Liebel et al., 2011; Sanner et al., 2005; Gehlin, 2002). Das Linienquellenverfahren basiert dabei auf dem bei konstanter Wärmeabgabe (q) pro Längeneinheit linearen Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Wärmeträgerfluidtemperatur und dem natürlichen Logarithmus der Zeit (t). Eine konstante Wärmeabgabe wird angenommen, wenn der Heizer mit kontinuierlicher Leistung betrieben wird. Damit ergibt sich für die Auswertung nach Liebel et al. (2011):

$$T_f(t) = k \ln(t) + m \quad (2.7)$$

dabei ist:

$$k = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (2.8)$$

und:

$$m = q \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\lambda}{r_b^2 S_{VC}} \right) - 0,5722 \right) \right] + T_0 \quad (2.9)$$

Dabei ist r_b der Bohrradius, S_{VC} die volumetrische Wärmekapazität des Gesteins und T_0 die ungestörte Untergrundtemperatur. T_f ist die durchschnittliche Wärmeträgerfluidtemperatur und berechnet sich nach (Glg. 2.10):

$$T_f = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (2.10)$$

Wird nun T_f über den natürlichen Logarithmus der Zeit aufgetragen, kann die Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Dazu wird Gleichung 2.8 nach λ umgestellt. k ist dabei die Steigung einer Geraden durch den konstanten Bereich des $\ln(t)$ -Plots. Die Steigung kann dabei z.B. durch lineare Regression ermittelt werden.

Über den experimentellen Teil des TRT werden dabei die benötigten Temperaturen für die Berechnung von T_f ermittelt. Zu diesem Zweck wird der Rohrleitungskreislauf geschlossen und Wasser umlaufend gepumpt. Sobald die ermittelte Fluidtemperatur konstant geworden ist (T_0), wird ein Heizelement aktiviert, welches eine definierte, konstante Leistung an das Wasser abgibt (s. Abb. 2.6). Die resultierende Temperaturveränderung des Wassers in Vorlauf T_{in} und Rücklauf T_{out} wird über alle Zeiten des Versuches erfasst. Es wird davon ausgegangen, dass ein TRT nach spätestens 72 h beendet werden kann (z.B. VDI, 2010; Gehlin, 2002). Abweichende Mindestdurchführungszeiten werden in Liebel et al. (2011) auf 24 - 36 h festgelegt, eine maximale Durchführungszeit wurde nicht gefunden.

Eine Limitierung, die bereits von Gehlin (2002) thematisiert wird, ist, dass der herkömmliche TRT lediglich eine effektive Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Sondenlänge abbilden kann. Eine tiefenabhängige Ableitung der Wärmetransportparameter kann ohne Vorliegen von tiefenintervallspezifischen Temperaturen nicht durchgeführt werden. Liegen diese Temperaturen jedoch vor, können sogenannte enhanced (verbesserte) TRT (eTRT) durchgeführt werden (z.B. Acuña und Palm, 2013; Raymond et al., 2011; Fujii et al., 2009). Für diesen Zweck sind besonders verteilte Temperaturmessverfahren von Interesse, wie es die Raman-Spektrum basierte Temperaturmessung auf Glasfasern ist.

2.4.2. Zementhydratation

Der zweite genutzte Wärmeeintragsprozess entstammt der exothermen chemischen Reaktion des Zementleims zu Zementstein, genannt Hydratation. Im eigentlichen Sinne beschreibt der Begriff Hydratation in der Chemie die Anlagerung von Wasser an eine chemische Bindung unter Hydratbildung. Die Zementhydratation ist in der Zementchemie

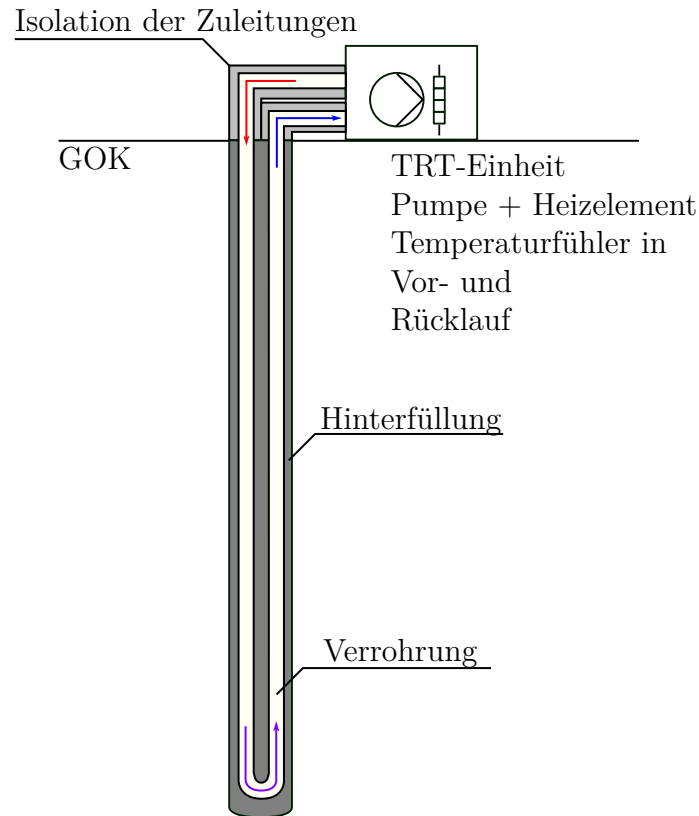


Abbildung 2.6.: Typische Versuchsanordnung eines TRT, bei welchem die Temperatureauslenkung über Energiezugabe funktioniert.

jedoch die Summe der chemischen Prozesse, die zur Aushärtung der Zementsuspension nach Wasserzugabe zum Zement ablaufen (Adam, 2006).

Die Wärmeentwicklung und die damit messbare Temperaturerhöhung im Bohrloch resultiert dabei aus der exothermen Hydrationsreaktion, die bei Kontakt des Zements mit Wasser auftritt. Diese läuft in unterschiedlichen Perioden ab, die sich in Initialperiode, dormante Periode (Induktionsperiode) und Hauptperiode gliedern (vgl. Abb. 2.7). Über diese Perioden hinweg nimmt die Festigkeit des gebildeten Zementsteins zu.

Die Periode I ist dabei durch eine hohe Wärmefreisetzung gekennzeichnet, die aus einer schnellen, lösungskontrollierten Reaktion herrührt. Die anschließende dormante Periode ist durch Keimbildung gekennzeichnet und verläuft unter geringerer Abgabe von Wärme entsprechend langsamer. Mit Beginn der Periode III beginnt die Bildung von Kalziumsilikathydrat-Phasen, welche zuerst lösungskontrolliert unter stärkerer Wärmeabgabe abläuft und dann in eine deutlich langsamer ablaufende, diffusionskontrollierte

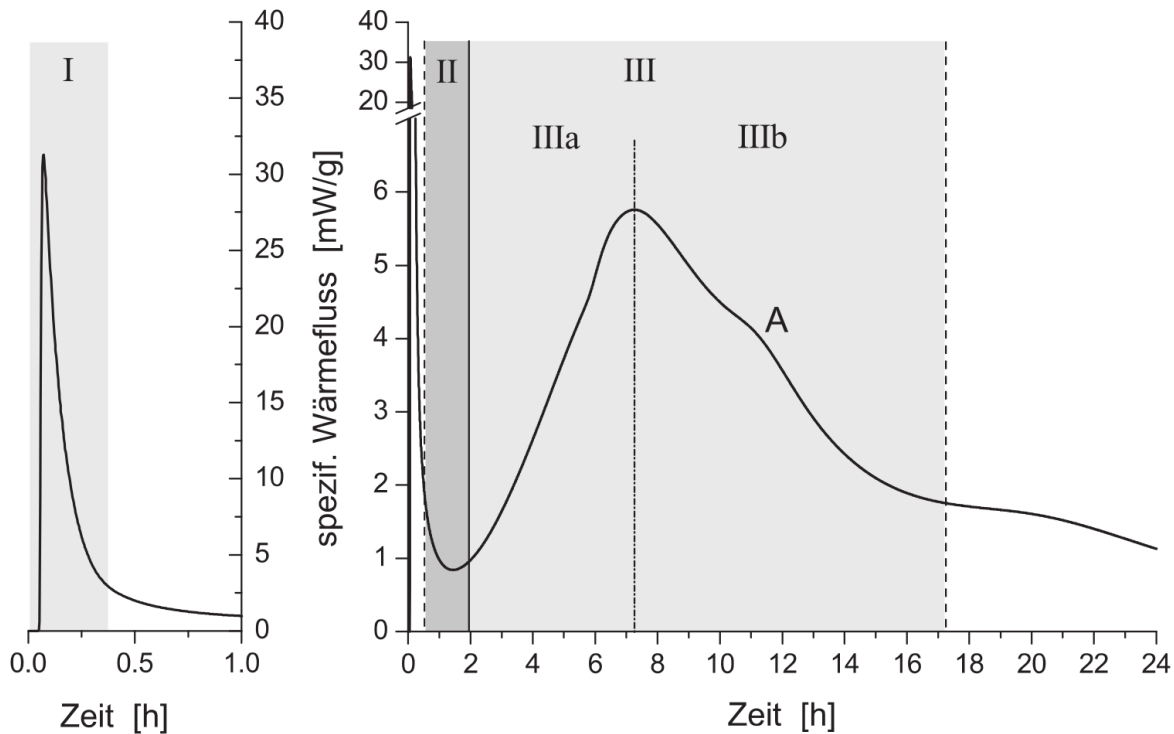


Abbildung 2.7.: Beispielhafter zeitlicher Verlauf der frühen Zementhydratation eines Portlandzements entsprechend der freiwerdenden Wärme. I Initialperiode (~0 – 30 min), II dormante Periode, III Hauptperiode, untergliedert in IIIa die Beschleunigungsperiode und IIIb die Abklingperiode (aus Hesse, 2009, S. 15)

Reaktion übergeht, gekennzeichnet durch immer weiter abnehmende Reaktionswärme-freisetzung (Adam, 2006).

2.5. Raman-Spektrum basierte, verteilte Temperaturmessung (DTS)

Um die Temperaturen, die aus der Wärmezufuhr resultieren, zu messen, wurde das verteilt messenden Temperaturmessverfahren DTS genutzt. Der für alle vorgestellten Arbeiten verwendete Temperatursensor ist hierbei ein AP-Sensing N4386-A Sensor (Agilent Technologies, 2007). Bei diesem Sensor handelt es sich um einen Raman-Spektrum basierten Temperatursensor. Die Nutzung dieses Verfahrens in den Umwelt- und Geowissenschaften hat in den letzten beiden Dekaden deutlich zugenommen (z.B. Liu et al., 2013; Hausner et al., 2011; Moffet et al., 2008; Selker et al., 2006). Der Grund hierfür wird in seiner Eigenschaft gesehen, kontinuierliche Temperaturprofile entlang von mehreren

Kilometern Glasfaser mit einer räumlichen Auflösung im Meter- bis Submeter-Bereich zu ermöglichen. Die kontinuierliche Verbesserung der Sensortechnik erlaubt inzwischen Messauflösungen von unter einem halben Meter (z.B. SILIXA Ltd, 2015).

2.5.1. Messprinzip

Die Temperaturmessung selbst erfolgt auf Glasfasern, in welche ein Laserpuls eingekoppelt wird. Der Laserpuls wird in der Glasfaser an den Atomen, Molekülen und Elektronen rückgestreut und gelangt anschließend zum eigentlichen Sensor, einem Photonenzähler. Die Rückstreuung der Glasfaser wird dabei in zwei Bereiche unterteilt. Zum einen ist dies die elastische Rückstreuung, auch Rayleigh-Rückstreuung genannt, und zum anderen sind das die unelastischen Brillouin- und Raman-Rückstreuungen (van de Giesen et al., 2012; Hausner et al., 2011; Selker et al., 2006). Für die Messung von Temperaturen wird die Raman-Rückstreuung der Brillouin-Rückstreuung gegenüber vorgezogen. Das liegt daran, dass die Temperaturabhängigkeit des Raman-Signals bei Unterschreitung der Grenzintensität des Laserpulses überwiegend durch eine Amplitudenänderung des Signals gekennzeichnet ist (s. Abb. 2.8). Im Gegensatz dazu verändert sich das Brillouin-Signal mit der Temperatur in seiner Frequenz, was deutlich komplexere Sensoren zur Erfassung erfordert.

Die Temperatur wird hierbei aus dem Stokes- und dem Anti-Stokes-Signal der Raman-Maxima berechnet. Beide Maxima sind temperaturabhängig. Jedoch ist die Amplitude des Anti-Stokes-Signals (P_{as}) deutlich stärker von der Temperatur des Mediums abhängig als die Amplitude des Stokes-Signals (P_s). Die Berechnung der Temperatur an der Position z , $T(z)$, kann dabei nach folgender Gleichung (z.B. Hausner et al., 2011) erfolgen:

$$T(z) = \frac{\gamma}{\ln \frac{P_s(z)}{P_{as}(z)} + C - \Delta\alpha z} \quad (2.11)$$

γ ist hierbei die Energiedifferenz (in K) der Photonen des eingehenden Laserpulses und der Rückstreuung. Der dimensionslose Kalibrierparameter C hingegen setzt sich aus den Sensor- und Lasereigenschaften des DTS-Gerätes zusammen. Schlussendlich werden die Dämpfungseigenschaften der beiden Signale in der Faser durch $\Delta\alpha$ beschrieben. Der Ursprung des Signals, z , kann über Signallaufzeitinversion ermittelt werden.

Das erhaltene Temperatursignal ist dabei immer ein über eine definierte Messstrecke gemitteltes Signal. Dies resultiert daraus, dass die DTS-Sensoren die Photonen für einen Glasfaserabschnitt erfassen. Damit ist das Temperatursignal immer eine Zusam-

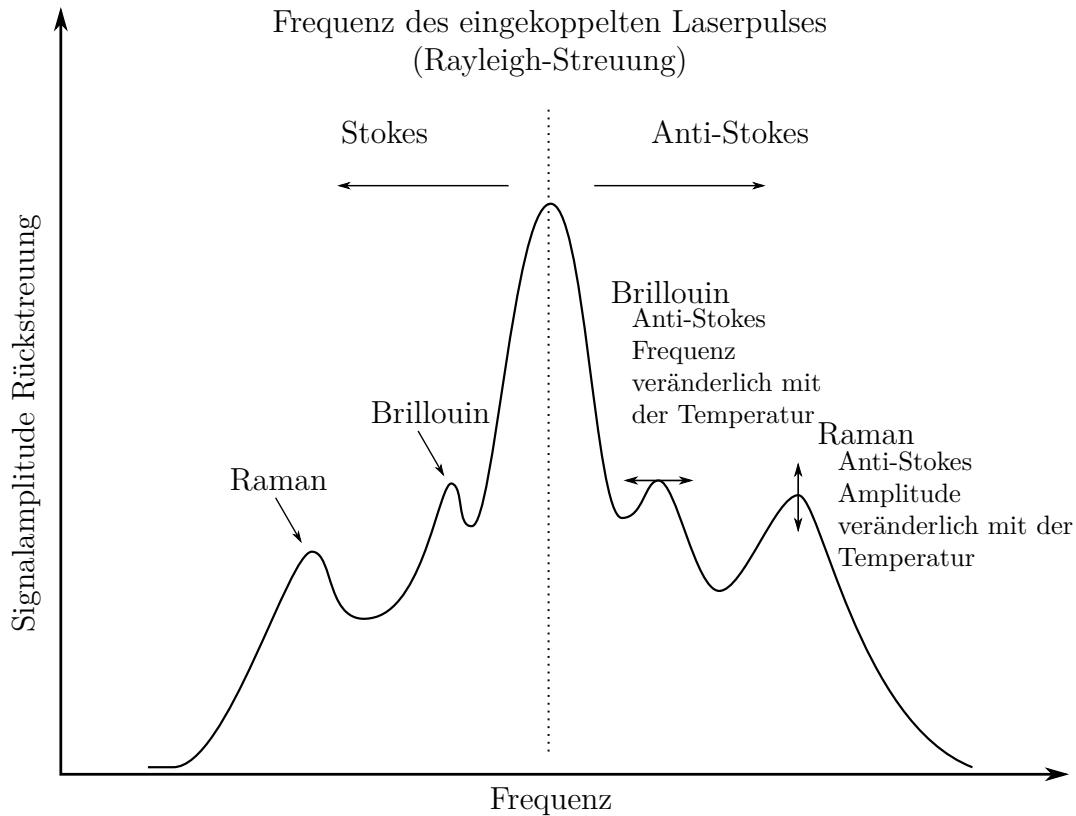


Abbildung 2.8.: Die Anti-Stokes-Signale der unelastischen Streuung der Photonen zeigen unterschiedliches Temperaturabhängigkeitsverhalten. Das Brillouin-Maximum verändert seine Frequenz, das Raman-Maximum seine Amplitude. Abbildung übersetzt und verändert nach Selker et al. (2006).

mensetzung der Temperaturen entlang der gewählten Erfassungstrecke. Je kleiner dieses Intervall ist, desto besser ist die räumliche Auflösung des Sensors. Für den N4386-A ist das kleinste Abfrageintervall ein Meter.

2.5.2. DTS-Messkonfigurationen

Entsprechend der Messanforderung werden DTS-Messungen auf zwei unterschiedlichen Wegen durchgeführt. Diese sind single-ended und dual-ended Messungen, was einer offenen oder einer Ringmessung der Faser entspricht.

Bei der single-ended Messung wird die Faser nur in eine Richtung gemessen, vom Sensor zum Faserende hinführend. Dabei wird das Faserende, wenn möglich, in einem Immersionsöl oder eng aufgewickelt gelagert oder es wird ein Abschlusschnitt gesetzt (Agilent Technologies, 2007). Dies dient dazu, mögliche Reflexionen durch das Faser-

ende zu reduzieren/verhindern, indem es dem Laserpuls ermöglicht wird, die Faser zu verlassen, entweder durch Diffusion oder aber durch Unterschreitung des Totalreflexionswinkels (z.B. Hausner et al., 2011; Tyler et al., 2009; Agilent Technologies, 2007). Die single-ended Messungen unterliegen in der Regel stark differentiellen Dämpfungsverlusten der Stokes- und Anti-Stokes-Signale und benötigen deshalb neben der Offsetkorrektur ebenfalls eine Dämpfungskorrektur. Die Messergebnisse nehmen mit Entfernung zum Sensor in ihrer Qualität ab (z.B. Tyler et al., 2009).

Die Alternative stellt eine dual-ended oder Ringmessung dar. Bei dieser wird das Faserende wieder der DTS-Einheit zugeführt (Stecker, direktes Anspießen). Zur Durchführung einer dual-ended Messung werden zwei aktive Kanäle an der DTS-Einheit benötigt. Die Kanäle werden während des Messvorganges abgewechselt, sodass die Messstrecke in beide Richtungen erfasst wird. Durch die Mittlung der Werte wird eine Negierung von dämpfungbedingter Messungenauigkeiten angestrebt (z.B. Tyler et al., 2009; Selker et al., 2006). Diese Messungen sind nahe der Mitte der Konfiguration am genauesten und nehmen zu den beiden Enden hin, nahe des Sensors, ab. Für Langzeitmessungen > einer Woche empfehlen sowohl van de Giesen et al. (2012) als auch Tyler et al. (2009) die Installation von dual-ended Konfigurationen.

Neben der Konfiguration für single- oder dual-ended kann für Messungen, die Messauflösungen unterhalb von einem bzw. einem halben Meter benötigen, z.B. in Labormessungen an EWS-Modellen, das Aufwickeln des Lichtwellenleiters genutzt werden. Dieser Ansatz wurde bereits in anderen Studien verwendet (z.B. Liu et al., 2013; Vogt et al., 2010) und für die vorgestellten Arbeiten übernommen. Dabei wird der Lichtwellenleiter auf einen Zylinder, z.B. Pegelmaterial, aufgebracht und gleichmäßig so gewickelt, dass ein Meter Lichtwellenleiter auf einem definierten Längenintervall des Zylinders zu liegen kommt. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Messung von einer Linienmessung in eine Flächen- bzw. Volumenmessung umwandelt.

2.5.3. Kalibrierung

Um verlässliche Temperaturmesswerte zu erhalten, ist eine Kalibrierung des Sensors notwendig. Für die Kalibrierung gibt es unterschiedliche Ansätze. So leiten van de Giesen et al. (2012) und Hausner et al. (2011) die Kalibrierparameter aus Parallelmessungen in Temperaturbädern ab und berechnen die Temperaturen anschließend nach Glg. 2.11. Der verwendete DTS-Sensor, N4386-A von AP-Sensing, gibt im Standardbetrieb bei Nutzung der beigefügten Sensorkontrollsoftware die Raman-Amplituden nicht direkt aus. Eine interne Routine berechnet aus den ermittelten Amplituden eine Temperatur und gibt diese

zusammen mit den Anpassungsparametern und ihrer Position auf der Glasfaser aus. Von Seiten des Nutzers besteht lediglich die Möglichkeit, die Verstärkung, die Dämpfung und den Offset zu kalibrieren. Die Verstärkung ist in der Regel werksseitig eingestellt. Dämpfung und Offset dagegen hängen direkt mit der gewählten Glasfaser, den Steckverbindern und möglichen Spleißstellen ab. Stehen, wie hier aufgezeigt, lediglich die Temperatursignale zur Verfügung, kann dieser Ansatz in leicht abgewandelter Form ebenfalls genutzt werden. Zu diesem Zweck werden die Temperaturen für eine entsprechend lange Strecke jeweils durch einen zweiten, kalibrierten Sensor (z.B. Pt₁₀₀-Temperatursensor) miterfasst und eine Offsetkorrektur für jeden Zeitschritt durchgeführt.

Beide Kalibrierverfahren benötigen Temperaturbäder an unterschiedlichen Positionen der Glasfaser. Dabei können Konfigurationen wie in Hausner et al. (2011) (vgl. Abb. 2.9) genutzt werden, bei welchen unterschiedlich temperierte Bäder ausreichend lange Abschnitte der Glasfaser erfassen. Beim N4386-A sind dies eine Mindeststrecke von 20 m pro Temperaturbad. Im Optimalfall werden die Temperaturbäder so gewählt, dass der eingefasste Temperaturbereich den erwartbaren Messbereich abdeckt. Die Temperaturmessungen in den Geowissenschaften werden durch Grenzen, die aus der Nutzung von Eiswasser und einem beheizten Becken resultieren, in den meisten Fällen ausreichend abgedeckt.

Je nach Lage des Versuches und der verfügbaren Infrastruktur kann eine weitere Vereinfachung bei den Temperaturbädern notwendig werden. Diese setzt nur noch ein Temperaturbad voraus, welches in einem stark isolierten Behälter kontinuierlich umgewälzt wird, um einer Dichteschichtung vorzubeugen (vgl. Abb. 2.9). Die zeitlich synchrone Temperaturmessung durch einen weiteren Sensor erlaubt dann eine Offsetkorrektur der erhaltenen Temperaturen. Durch eine Überprüfung eines zweiten Glasfaserabschnittes hinter der Messstrecke kann dann auf dämpfungsbedingte Veränderungen des Temperatursignals geprüft werden.

Bei der Kalibrierung der Sensoren ist darauf zu achten, dass für jeden Abschnitt, der einen sogenannten step-loss aufweist, eine eigene Kalibrierung durchgeführt werden muss. Der step-loss bezeichnet dabei kleinskalige Dämpfungsveränderungen, die z.B. auf mechanische Beschädigung der Faser oder aber auf Spleißstellen sowie Steckverbindungen zurückzuführen sind.

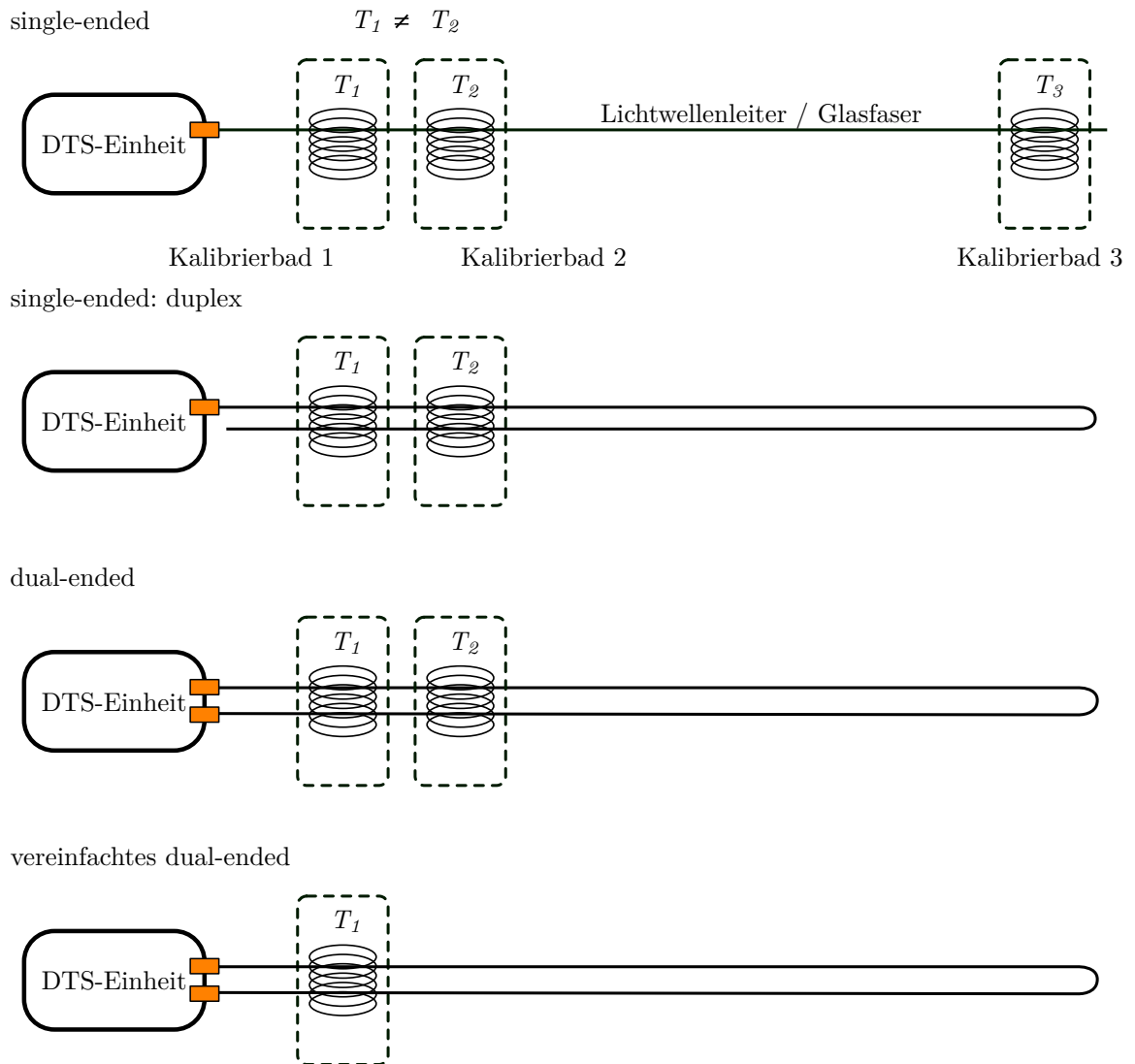


Abbildung 2.9.: Von oben nach unten typische DTS-Messkonfigurationen. Die ersten drei Verfahren (aus Hausner et al., 2011, angepasst und übersetzt) nutzen mehrere unterschiedliche Temperaturbäder für die Kalibrierung der Daten. Das letzte Verfahren kann genutzt werden, wenn die Vorhaltung unterschiedlicher Temperaturbäder nicht möglich ist. Der vierte Ansatz kann in gleicher Form für single-ended Messungen genutzt werden.

3. Vergleichbarkeit von Thermal Response Tests an benachbarten Erdwärmesonden im Feld

3.1. Einleitung

Der TRT ist, wie eingangs erwähnt, das aktuelle Standardwerkzeug (Stand der Technik) bei der Ermittlung der thermischen Parameter des Untergrundes (z.B. Borinaga-Treviño et al., 2013; Sanner et al., 2005). Dabei werden in jüngerer Zeit auch Fragen der Vergleichbarkeit von TRT adressiert sowie diese z.B. im GeoPLASMA-CE Projekt (Shallow Geothermal Energy Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe - GeoPLASMA-CE) untersucht. Dabei werden auf den Workshops unter anderem die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Datenerhebungsgeräte sowie die Wiederholbarkeit der Messungen diskutiert. Die Zielsetzung resultiert dabei wahrscheinlich aus der üblichen Erkundungspraxis, den TRT an lediglich einer Sonde durchzuführen. Dabei bleibt jedoch die Frage offen, wie vergleichbar die TRT unterschiedlicher Sonden im gleichen Sondenfeld sind und entsprechend wie viel Aussagekraft ein einzelner TRT haben kann.

Um die Vergleichbarkeit von TRT an unterschiedlichen EWS in enger Nachbarschaft zu untersuchen, wurden im Zuge des SAGS-Projektes drei EWS in Nachbarschaft zu einer bereits bestehenden EWS installiert. Zur Durchführung tiefenorientierter eTRT (z.B. Fujii et al., 2009; Acuña und Palm, 2013) wurden alle EWS mit Glasfasern ausgestattet, welche sich auf der Außenseite der Verrohrung befinden. Damit ist es möglich, das Temperatursignal der EWS zu allen Zeitpunkten nach Verbringung der EWS im Untergrund zu erfassen. Dabei wurde auf bestehende Arbeiten aufgebaut, die sich mit TRT-Temperaturfolgeentwicklungsuntersuchungen auseinandersetzen und deren Erkenntnisse in das Experiment eingeflossen sind (z.B. Read et al., 2013; Liebel et al., 2011; Hurtig et al., 1994).

Grundannahme der Experimente war, dass der TRT unabhängig vom Sondentyp bei vergleichbaren thermischen Untergrundparametern vergleichbare Ergebnisse erzielen sollte. Das genutzte Testfeld ist in diesem Sinne von besonderem Interesse, da sowohl die drei typischen EWS-Typen Einfach-U-, Doppel-U- und Koaxialsonde vorliegen, als auch, dass zwei Doppel-U-Sonden zum direkten Vergleich zur Verfügung stehen. Gleichzeitig liegt eine heterogene geologische Zusammensetzung sowie eine, in Bezug auf die Gesamtlänge der Sonden, lange Sondenstrecke im ungesättigten Bereich vor. Dies ist in Bezug auf die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten von besonderem Interesse, da die ungesättigten Bereiche und geringleitende Bereiche, welche in der Planung häufig vernachlässigt werden (angemerkt z.B. in Dehkordi und Schincariol (2012) und unter anderem gültig für den weit verbreiteten Earth Energy Designer (Buildingphysics, 2008)). Die Auswertung wurde immer an dem aktuellen Stand der Technik gehalten, um eine Vergleichbarkeit zum Einbaualltag in Deutschland zu bewahren. Dabei sind neben den tatsächlich ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten auch die Temperaturverteilungen von Interesse, da diese bei vergleichbarer Umgebung ebenfalls vergleichbar sein sollten.

Ebenfalls verzichtet wurde auf die gezielte Einbringung von Fehlstellen, wie dies z.B. bei den Arbeiten von Riegger (2013) und Jäger (2013) der Fall war. Die vier Erdwärmesonden wurden hier lediglich in Auftrag gegeben und ihr Einbau sowie ihre Verpressung überwacht. Von Seiten des Autors und der Auftraggeber wurde geringstmöglicher Einfluss auf den Installationsprozess genommen. Die DTS-Messungen wurden alsbald nach Installation gestartet und von der Hydratation bis über die TRT hinaus laufen gelassen. Ergebnisse und Erfahrungen, die im Vorhinein an einem maßstabsgetreuen EWS-Modell an der TU Dresden erzielt wurden, sind mit in die Ergebnisinterpretation eingeflossen.

Des Weiteren wird im folgenden Kapitel immer von Wärmeleitfähigkeit gesprochen. Diese bezeichnet, wenn nicht anders beschrieben, immer die effektive Wärmeleitfähigkeit, die aus TRT ermittelt wird. Diese Vereinfachung dient der besseren Lesbarkeit.

Die DTS Daten zu den Versuchen sind auf dem Archivserver (<https://www.ufz.de/record/dmp/archive/6446/de/>) in den Ordnern Experiment_3BHE_Leipzig, Experiment_EUS_Leipzig und Experiment_BHE_Physical_Model_Dresden abgelegt (vgl. Appendix A).

3.2. Methodik

3.2.1. Erdwärmesondeninstallation und TRT

Die Installation der Erdwärmesonden erfolgte in zwei Zügen. Die Einfach-U-Sonde wurde im Herbst 2015 eingebaut. Die drei weiteren Sonden, eine Koaxialsonde und zwei Doppel-U-Sonden, wurden im Zuge des SAGS-Projektes im Herbst 2016 installiert. Die Installation erfolgte dabei durch drei unterschiedliche Firmen, wobei jeweils drei unterschiedliche Bohrverfahren zum Einsatz kamen. Im Folgenden wird auf die Einbaubedingungen sowie die Parametrisierung der Sonden eingegangen.

Einfach-U-Sonde (EUS)

Die Einfach-U-Sonde wurde in eine Bohrung mit einem Bohrdurchmesser von 160 mm eingebracht. Bei der Bohrung handelte es sich um eine Endlosschneckenbohrung, bei welcher das Bohrloch durch ein Stützgestänge offen gehalten wurde. Die Bohrungstiefe lag zwischen 16 und 17 m. Die mit LWL-Kabel versehene Erdwärmesonde wurde auf 16 m eingelassen und anschließend verpresst. Während der Verpressung wurde offensichtlich, dass nicht genügend Zement vorgehalten wurde, um die Verpressung in einem Zug durchführen zu können. Der Vorgang wurde aus diesem Grund unterbrochen und am Vormittag des Folgetages abgeschlossen. Eine Zusammenfassung der Sondenparameter ist in Tab. 3.1 gezeigt.

Tabelle 3.1.: Übersicht der relevanten Informationen über die Einfach-U-Sonde

Parameter	Wert
Sondentyp	Einfach-U
Länge	16 m
Material	PE-HD-100, 34 mm
Hinterfüllung	RAUGEO Fill Weiß
Abstandshalter	keine
Zentrierhilfe	keine
Bohrdurchmesser	160 mm
Bohrtyp	Endlosschnecke mit Stützgestänge
Sondenfuß	werksseitig verschweißt

Doppel-U-Sonde 1 (DUS1)

Die erste verbaute Doppel-U-Sonde, DUS1, wurde in das Bohrloch der Kernbohrung eingebracht. Die Kernbohrung erfolgte als Rammbohrung für einen Kerndurchmesser von 100 mm, der Gesamtbohrungsdurchmesser betrug 160 mm. Verbaut wurde eine HD-PE-100 Doppel-U-Sonde, bei der alle vier Stränge der EWS mit LWL versehen waren. Durch Einbringungsschwierigkeiten bei 5 bis 7 m brach einer der LWL-Umläufe am Sondenfuß. Die Verpressung erfolgte in einem Durchgang, die Einbautiefe betrug 21 m. Als Besonderheit ist zu nennen, dass das Verpressrohr gezogen wurde. Am nächsten Tag war der Zementspiegel um ca. 35 cm gefallen. Die Bedingungen des Kontraktorverfahrens wurden zu keiner Zeit verletzt. Eine Zusammenfassung der Sondenparameter ist in Tab. 3.2 gezeigt.

Tabelle 3.2.: Übersicht der relevanten Informationen über die Doppel-U-Sonde DUS1

Parameter	Wert
Sondentyp	Doppel-U
Länge	21 m
Material	PE-HD-100, 34 mm
Hinterfüllung	Schwenk Füllbinder® L
Abstandshalter	ja, alle 2 m
Zentrierhilfe	keine
Bohrdurchmesser	160 mm
Bohrtyp	Rammkernbohrung
Sondenfuß	werksseitig verschweißt

Doppel-U-Sonde 2 (DUS2)

Die zweite verbaute Doppel-U-Sonde, DUS2, wurde in eine Spühlbohrung eingebracht. Die Bohrung wurde auf 23 m abgeteuft und hatte einen Durchmesser von 160 mm. Es handelte sich ebenfalls um eine HD-PE-100-Sonde, bei welcher alle vier Stränge mit LWL versehen wurden. Während des Einbaus brach der LWL des vierten Umlaufs. Der Grund hierfür ist unbekannt, es traten keine Schwierigkeiten beim Einbau auf. Die Verpressung erfolgte in einem Durchgang. Die Einbautiefe betrug 22 m. Die Bedingungen des Kontraktorverfahrens wurden nicht verletzt. Der Sondenfuß wurde auf der Baustelle angeschweißt. Eine Zusammenfassung der Sondenparameter ist in Tab. 3.3 gezeigt.

Tabelle 3.3.: Übersicht der relevanten Informationen über die zweite Doppel-U-Sonde, DUS2.

Parameter	Wert
Sondentyp	Doppel-U
Länge	22 m
Material	PE-HD-100, 34 mm
Hinterfüllung	Schwenk Füllbinder [®] L
Abstandshalter	ja, auf Nachfrage hin eingebaut
Zentrierhilfe	keine
Bohrdurchmesser	160 mm
Bohrtyp	Spülbohrung
Sondenfuß	baustellenseitig verschweißt

Koaxialsonde (KOAX)

Die Koaxialsonde war die zuletzt verbaute Sonde und wurde ebenfalls in eine Spülbohrung eingebracht. Die Parameter der Bohrung entsprechen denen von DUS2. Der LWL wurde hier als ein einfacher Umlauf auf den Außenleiter aufgebracht. Er ist nicht gebrochen. Die Verpressung erfolgte in einem Durchgang, das Kontraktorverfahren wurde nicht verletzt. Im Gegensatz zu DUS2 wurde nicht nur der Fuß auf der Baustelle angeschweißt, sondern alle einzelnen Segmente der Koaxialsonde, was in mehreren Schweißstellen entlang der Koaxialsonde resultierte. Aufgrund der genutzten Muffen liegen die LWL im Bereich der Muffen nicht direkt an der EWS. Eine Zusammenfassung der Sondenparameter ist in Tab. 3.4 gezeigt.

Tabelle 3.4.: Übersicht der relevanten Informationen über die Koaxialsonde, KOAX.

Parameter	Wert
Sondentyp	koaxial
Länge	21 m
Material	unbekannt, Außenleiter 100 mm
Hinterfüllung	Schwenk Füllbinder [®] L
Abstandshalter	nur für Innenleiter von Interesse, nicht genutzt
Zentrierhilfe	keine
Bohrdurchmesser	160 mm
Bohrtyp	Spülbohrung
Sondenfuß	baustellenseitig verschweißt

(e)TRT

Alle TRTs wurden mit einer Mindestheizzeit von 72 h betrieben. Dabei wurde das Wasser vor dem eigentlichen TRT jeweils 0,5 – 1 h umgewälzt, um eine Angleichung der Temperaturen zu erreichen und einen Messwert für die ungestörte Untergrundtemperatur zu erhalten. In Tab. 3.5 ist eine Übersicht über die TRTs und ihre Laufzeit gegeben.

Tabelle 3.5.: Übersicht über die TRT-Laufzeiten der Sonden EUS, DUS1, DUS2 und KOAX für alle drei Zyklen.

Sonde	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3
EUS	96 h		95 h
DUS1		143 h	120 h
DUS2		91 h	163 h
KOAX		95 h	

3.2.2. Modell-Erdwärmesonde an der TU Dresden

An der TU Dresden wurde für Studien der Temperaturentbreitung entlang der Verrohrung ein 5 m hohes EWS-Modell gebaut. Dieses hat einen Innendurchmesser von 230 mm. Auf die Verrohrung (Pegelmateriäl HD-PE-100) wurde LWL derart aufgewickelt, dass eine räumliche Auflösung von 0,1 m erreicht wurde. Die DTS-Messstrecke ist dementsprechend 96 m lang und besteht aus 960 Windungen. Diese wurden per Hand für beide Stränge getrennt aufgebracht und anschließend am Sondenfuß verspleißt. Beim Einbau in das Stützrohr wurden keine Zentrierhilfen verwendet, aber Abstandshalter mit einem Spreizdurchmesser von 45 mm. Der Zementkörper wird durch ein PVC(Polyvinylchlorid)-Rohr gestützt. Auf der Außenseite der Säule wurden, wie in den Laborversuchen zur Hydrationswärme, Wechsellagen aus Rettungsdecken und Isolationsmaterial (hier: Steinwolle) genutzt. Als Hinterfüllung wurde Schwenk Füllbinder genutzt (SCHWENK Spezialbaustoffe GmbH & Co. KG, 2014). Der Aufbau ist in Abb. 3.1 dargestellt.

Für die hier vorgestellten Arbeiten ist ausschließlich die Untersuchung des Grenztemperaturverhaltens zwischen EWS-Verrohrung und Hinterfüllung bei Isolation der EWS von Interesse. Die Isolation wurde für diesen Versuch zuerst entfernt (mit Ausnahme der Rettungsdecke auf der Säule selbst) und anschließend nur im mittleren Bereich wieder angebracht, sodass die Säule darunter und darüber nicht isoliert war. Dies entspricht,

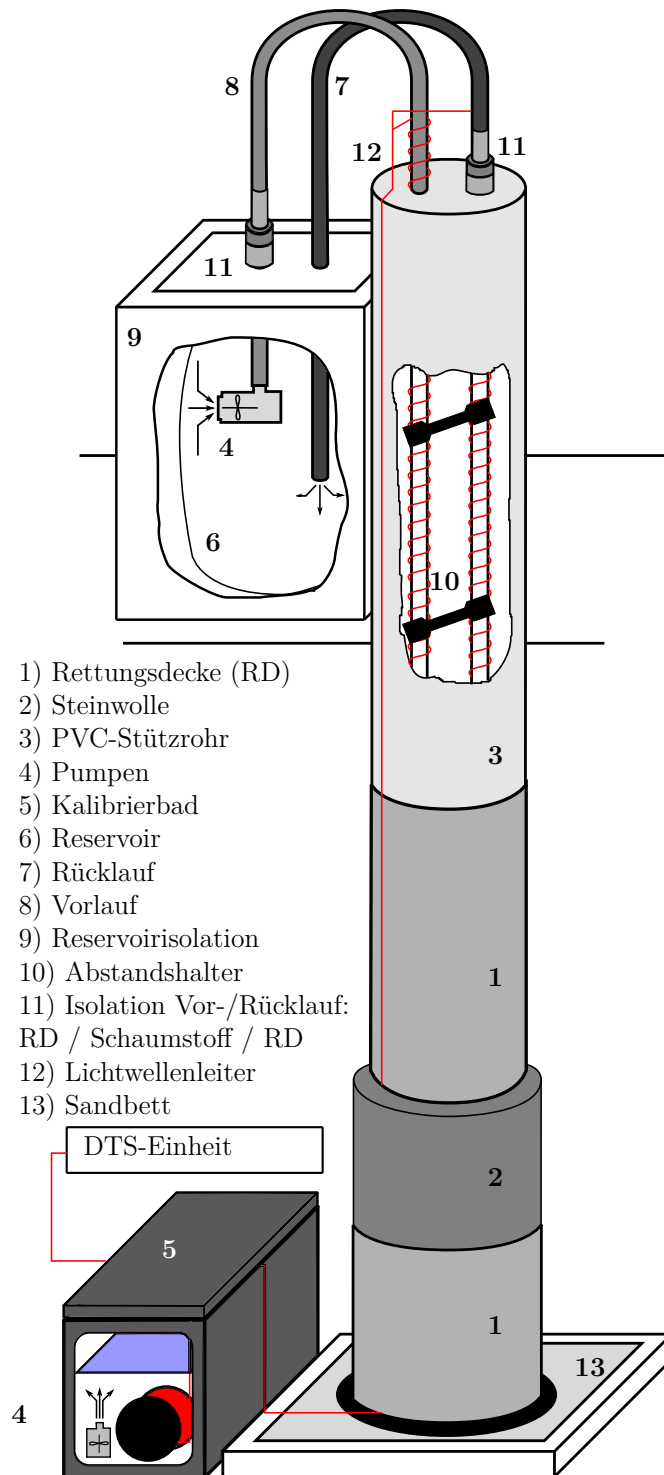


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus an der TU Dresden zur Untersuchung der Auswirkung partieller Isolation. Nicht maßstabsgetreu.

in extremer Form, der experimentellen Abbildung einer thermisch schlecht leitenden geologischen Schicht.

3.2.3. DTS-Konfiguration

Für die durchgeführten Versuche wurden die in Tab. 3.6 gezeigten DTS-Konfigurationen verwendet. Dabei sind folgende Besonderheiten zu erwähnen: Es wurde nach Möglichkeit eine dual-ended bzw. Ringleitung genutzt. Zudem wurden alle Daten außer den Daten von EUS mit einer Temperaturparallelmessung kalibriert. Aufgrund der LWL-Brüche in DUS1 und DUS2 wurden KOAX und DUS2 seriell und single-ended an Kanal 1 gemessen. DUS1 wurde dementsprechend an dem zweiten Kanal gemessen. So war es möglich, alle drei Sonden trotz der LWL-Brüche gleichzeitig zu messen.

Tabelle 3.6.: Übersicht über die Messanordnung der DTS-Konstruktionen. Die Anzahl an Messpunkten entspricht den verbauten Metern LWL.

Sonde	Konfiguration	DTS Messpunkte
EUS	dual-ended, nicht kalibriert	32
DUS1	single-ended, kalibriert	60
DUS2	single-ended, seriell zu KOAX, kalibriert	72
KOAX	single-ended, seriell zu DUS2, kalibriert	42
EWS-Dresden	dual-ended, gewickelt, kalibriert	96

3.2.4. Auswertung (enhanced) Thermal Response Test

Die Auswertung der TRT erfolgte einmal klassisch wie in Liebel et al. (2011) und in Anlehnung an Acuña und Palm (2013) für eTRT. Beim zweiten Ansatz wurden einzelne Tiefenintervalle sukzessive als TRT ausgewertet. In Acuña und Palm (2013) wird zudem eine Korrektur des Leistungseintrages anhand der Fluidtemperaturen durchgeführt. Dies ist hier nicht der Fall, da für kein Tiefenintervall die Fluidtemperaturen vorliegen. Dementsprechend wurde nur der Leistungseintrag pro Sondenmeter q nach VDI (2010) unkorrigiert als Leistungseintrag für jeden Sondenmeter genutzt. Folglich ist das eTRT-System entsprechend des TRT vereinfacht, bei welchem ein konstanter Leistungseintrag pro Sondenmeter angenommen wird.

Die Auswertung erfolgte entsprechend Glg. 2.8 nach dem einfachsten Ansatz, der laut Liebel et al. (2011) einer der am weitesten verbreiteten ist und den Empfehlungen von

Gehlin (2002) folgt (Verfahren basiert auf Ingersoll (1948)). T_f wurde aufgrund fehlender Fluidtemperaturen durch T_{DTS} ersetzt. T_{DTS} ist dabei die in der Hinterfüllung durch das DTS-System gemessene Temperatur. Dabei wurden gleiche Tiefenintervalle von Vor- und Rücklauf genutzt. Je nach Anzahl der verfügbaren LWL-Stränge wurden bis zu vier Temperaturwerte für die Ermittlung von T_{DTS} verwendet. Von diesem Ansatz wurde auch für KOAX nicht abgewichen, obwohl hier die Temperaturen lediglich am Vorlauf gemessen wurden. Für die Auswertung wurde der gesamte lineare Anteil des Datensatzes verwendet. Es erfolgte keine Einschränkung der Daten nach Versuchslänge, wie z.B. die ausschließliche Verwendung der Daten zwischen Beginn des linearen Abschnittes und 72 h. Eine Anpassung von Glg. 2.9 an Bohrlochwiderstand oder volumetrische Wärmekapazität wurde nicht vorgenommen. Diese Entscheidung beruht darauf, dass sich auf die Wärmeleitfähigkeit als Vergleichsparameter zwischen den Sonden beschränkt wurde. Die von den Auftragnehmern zur Verfügung gestellten Temperaturlogs an Vor- und Rücklauf wurden ebenfalls nach obigem Schema ausgewertet. Dabei wurde jedoch nur der klassische TRT-Ansatz genutzt, da durch die Auftragnehmer keine eTRT durchgeführt wurden.

3.3. Ergebnisse

Temperaturverteilungen der TRT-Feldversuche

Die Temperaturverteilungen über die Zeit des TRT von EUS sind in Abb. 3.2a dargestellt. Dabei wurden unterschiedliche Temperaturverteilungen für Vor- und Rücklauf gemessen. Die Temperaturen wurden nicht kalibriert und geben somit nur eine qualitative Aussage. Der TRT zeigte maximale Temperatursenkungen bis größer $40\text{ }^\circ\text{C}$, wobei mit zunehmender Tiefe die Temperaturen abnahmen und ihr Minimum am Sondenfuß erreichten. Im Tiefenintervall des Temperaturminimums, zwischen 14 und 16 μGOK , kam es zudem zu einer deutlich langsameren Aufheizung des Untergrundes. Neben dem Temperaturmaximum nahe der Oberfläche war ein zweites Maximum zwischen 8 und 11 μGOK ausgeprägt, welches ebenfalls Temperaturen um $40\text{ }^\circ\text{C}$ aufwies. Beide Temperaturmaxima waren im Rücklauf weniger stark ausgeprägt und wiesen Differenzen von bis zu 2 K zum Vorlauf auf (vgl. Abb. 3.2a). Aufgrund der mangelnden Kalibrierung ist die Standardabweichung der Messung, ermittelt aus der Nulllinie, mit 0,3 K hoch im Vergleich zur Angabe des Herstellers (bis zu 0,1 K). Die Messung zeigte Schwankungen in den Temperaturen, die synchron über alle Tiefen auftraten und somit dem Sensor

zugeschrieben wurden. Diese vorübergehenden Schwankungen wiesen Amplituden von bis zu 1 K auf.

Die gemessenen Temperaturverteilungen während des TRT für DUS1 sind in Abb. 3.2b dargestellt. Der TRT zeigte vier Temperaturbereiche, in welche der Untergrund eingeteilt werden kann. Der erste Bereich lag zwischen 1,5 und 8 muGOK und war am Vorlauf durch hohe Temperaturen von über 45 °C gekennzeichnet. Die Temperaturen am Rücklauf waren um bis zu 2,54 K niedriger. Darunter, von 8 bis 11 muGOK, lag sowohl für Vor- als auch Rücklauf ein Bereich niedriger Temperaturen mit Maximalwerten von 43 °C vor, wobei die Differenz nur noch 1 K betrug. Während die Temperaturen des Rücklaufs mit zunehmender Tiefe kaum eine Änderung aufwiesen, zeigte sich für den Vorlauf zwischen 11 und 15 muGOK ein weiteres Temperaturmaximum mit Temperaturen von bis zu 44,5 °C. Während die Vorlauftemperatur weiter auf ihr Minimum von 41 °C zum Sondenfuß hin abfiel, bildete sich am Rücklauf unterhalb von 15 m ein Temperaturmaximum von 43 °C aus (Abb. 3.2b TRT).

Im Gegensatz zu den U-Sonden hat bei der KOAX nicht jeder Strang eine eigene Hinterfüllungstemperatur. Aufgrund des coaxialen Designs wird hier in einem Umlauf lediglich der Außenleiter gemessen, was dem Vorlauf entspricht. Die beiden Datensätze zeigen also den gleichen geotechnischen Sachverhalt. Während des TRT zeigten beide LWL Temperaturen um 40 °C, wobei der abwärts führende LWL 1 - 1,3 K kühler war als der aufwärts führende LWL. Im Bereich von 14 - 17 muGOK kehrte sich diese Verteilung um, sodass der aufwärts gerichtete LWL bis zu 1,5 K kälter war als der abwärts gerichtete (vgl. Abb. 3.2c). Insgesamt heizte sich die Umgebung des abwärts gerichteten LWL jedoch langsamer auf.

DUS2 ist jene Doppel-U-Sonde, bei der die Datenerfassung auf dem längsten Teil der Sonde möglich war. Aus diesem Grund werden hier, soweit erfasst, die Daten aller vier Rohrleitungen gezeigt. Der durchgeführte TRT zeigte für die Rückläufe ähnliche Temperaturverteilungen mit einem Temperaturminimum zwischen 10 und 15 muGOK. Dieses wurde in größeren und kleineren Tiefen von erhöhten Temperaturen bis 35 °C eingefasst. Vorlauf 1 zeigte im gleichen Tiefenintervall ein Maximum von 35 °C und auch Vorlauf 2 zeigte in diesem Tiefenintervall erhöhte Temperaturen. Das tatsächliche Temperaturmaximum von Vorlauf 2 lag jedoch zwischen 4 und 7 muGOK (vgl. Abb. 3.3) und damit in der ungesättigten Zone.

Obwohl auch für den dritten Messzyklus DTS-Messungen durchgeführt wurden, konnten diese aufgrund des Auslaufens des Projektes nicht mehr vollständig ausgewertet wer-

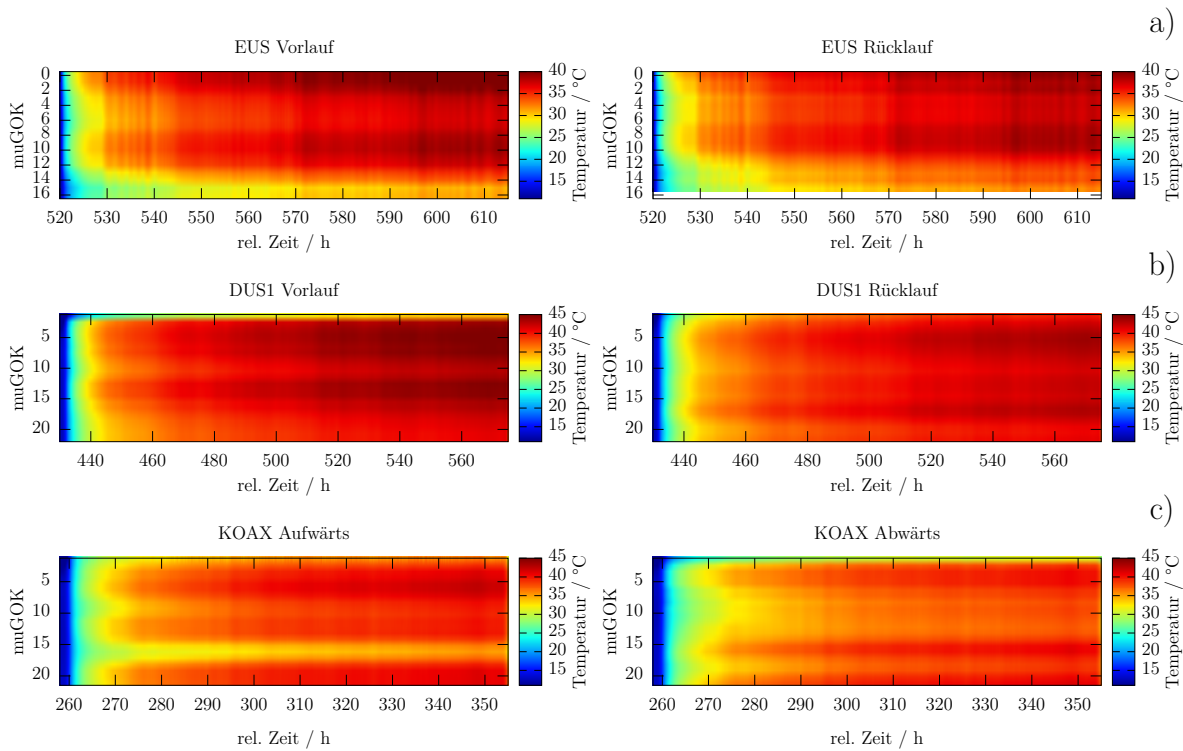


Abbildung 3.2.: Ergebnisse der DTS-Messungen an EUS (a, Daten aus (Mess-)Zyklus 1), DUS1 (b, Daten aus (Mess-)Zyklus 2) und KOAX (c, Daten aus (Mess-)Zyklus 2) während des TRT. Links: Vorlauf; rechts: Rücklauf. Weiße Bereiche in den Rücklaufdaten sind ausgesparte, doppelte Daten des Vorlaufs. Für KOAX sind anstelle von Vor- und Rücklauf der aufsteigende und der absteigende Ast des LWL gezeigt. Die Zeit ist angegeben in Stunden relativ zum Messbeginn.

den. Temperaturverteilungen wurden folglich nicht mehr aufbereitet. Eine Auswertung der TRT, nicht der eTRT, hat dennoch stattgefunden.

3.3.1. Ergebnisse der eTRT

Die Auswertung der Temperaturverteilungen als eTRT lieferte die in Abb. 3.4 gezeigten Profile. Für jede Sonde ergab sich ein unterschiedliches Verteilungsprofil. Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten lagen dabei für EUS (ohne den Ausreißer in Sondenfußnähe) zwischen $2,6$ und $2,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Der Bereich der Wärmeleitfähigkeiten für DUS1 zeigte Werte von $2,7$ bis $2,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Die Wärmeleitfähigkeiten nehmen für DUS1 mit der Tiefe zu. DUS2 zeigte deutlich höhere Werte von $3,6$ bis $3,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, wobei nahe der Oberfläche und im Bereich 13 bis 16 m eine leichte Reduktion der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten vorlag. Die größte Spanne an ermittelten Wärmeleitfähigkeiten wurde für

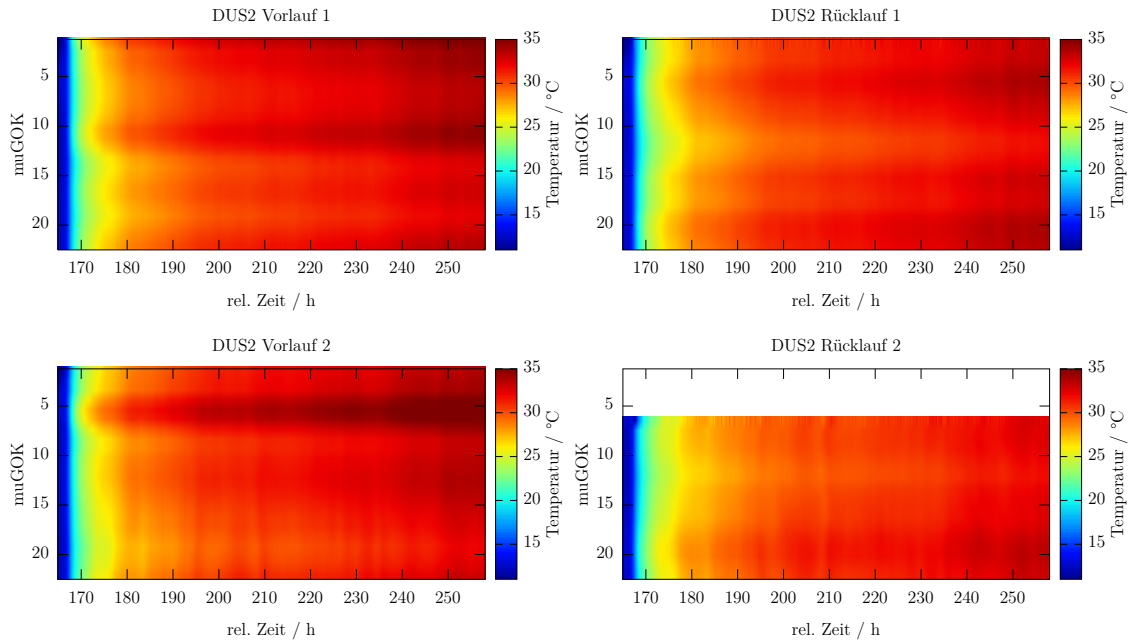


Abbildung 3.3.: Ergebnisse der DTS-Messungen in DUS2 aus (Mess-)Zyklus 2. Darstellung der Temperaturverteilungen aller vier LWL-Stränge während des TRT. Weiße Bereiche kennzeichnen Bereiche, die von Datenverlust betroffen sind. Die Zeit ist angegeben in Stunden relativ zum Messbeginn.

KOAX ermittelt. KOAX zeigte Wärmeleitfähigkeiten zwischen $2,7$ und $3,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Dabei lagen die höchsten Werte im Bereich zwischen 12 und 15 m .

Die Wärmeleitfähigkeiten, die aus den Fluidtemperaturen der Auftragnehmer berechnet wurden, sind in Tab. 3.7 dargestellt. Die Ergebnisse unterteilen sich dabei in die Zyklen, in welchen die TRT durchgeführt wurden.

Tabelle 3.7.: Ergebnisse der klassischen TRT-Auswertung; in Klammern eigene Auswertung. Alle Wärmeleitfähigkeiten in $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Sonde	Zyklus 1 λ	Zyklus 2 λ	Zyklus 3 λ
EUS	2,4 (3,3)		3,4 (3,7)
DUS1		1,9 (2,8)	2,6 (2,6)
DUS2		2,8 (3,9)	3,0 (3,3)
KOAX		2,0 (3,2)	

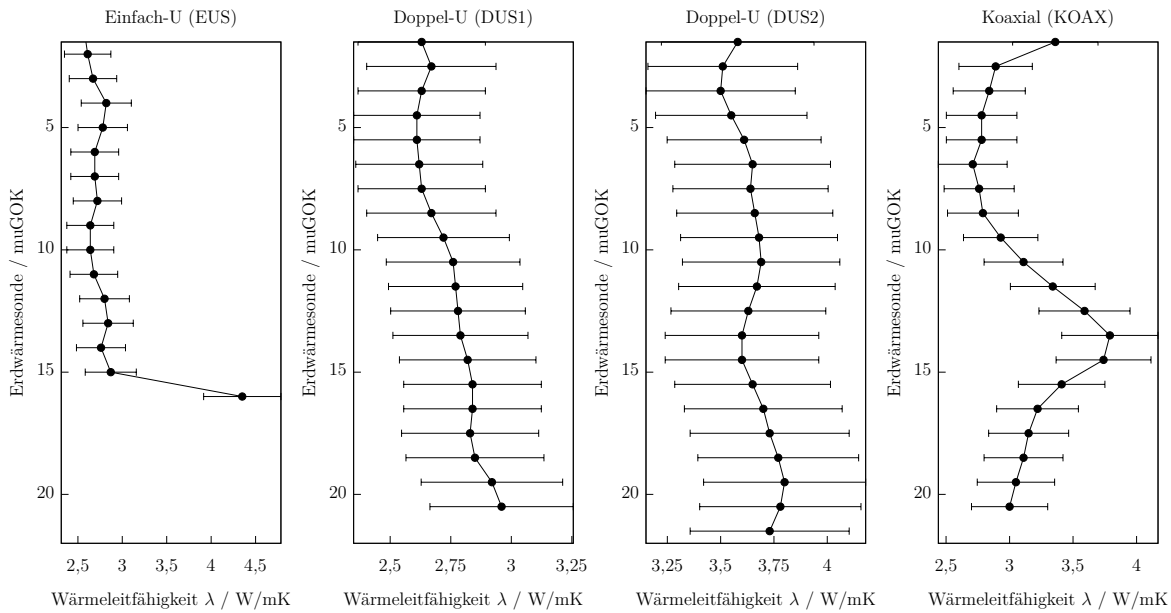


Abbildung 3.4.: Wärmeleitfähigkeitsprofile abgeleitet aus den eTRT. Von links nach rechts: EUS, DUS1, DUS2, KOAX. Das angegebene Fehlerintervall entspricht 10 % des Ergebnisses.

3.3.2. EWS-Modell an der TU Dresden

Aus dem Versuch an der TU Dresden werden nur die Daten für den Teilisoliationsversuch gezeigt. Im Gegensatz zu den Feldversuchen waren die erreichten Temperaturänderungen deutlich geringer. Die Temperaturunterschiede zwischen Vor- und Rücklauf lagen überwiegend im Bereich der Messungenauigkeit. Die Temperaturen im Bereich der Isolation, von 1,9 bis 3,5 m von der Säulenoberkante, lagen um 0,2 bis 0,25 K über den Temperaturen der Nachbarbereiche. Dieser Temperaturunterschied liegt sehr dicht an der ermittelten Abweichung der Temperaturwerte von $\pm 0,15$ K. Zum Sondenfuß hin nahm die erfasste Temperatur deutlich ab (vgl. Abb. 3.5).

3.4. Diskussion: (e)TRT

Auch wenn die DTS-Daten von Messzyklus 3 nicht mehr vollständig ausgewertet werden konnten, so waren die DTS-Messungen trotz mehrerer LWL-Brüche erfolgreich und haben einen großen Temperaturdatensatz für unterschiedliche EWS-Typen (Verbaugemetrien) zur Verfügung gestellt. Die Diskussion der Ergebnisse des TRT erfolgt dabei in zwei Schritten. Dies ist zu einem die Betrachtung der Temperaturverteilungen und zum anderen diejenige der ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten. Die Betrachtung der

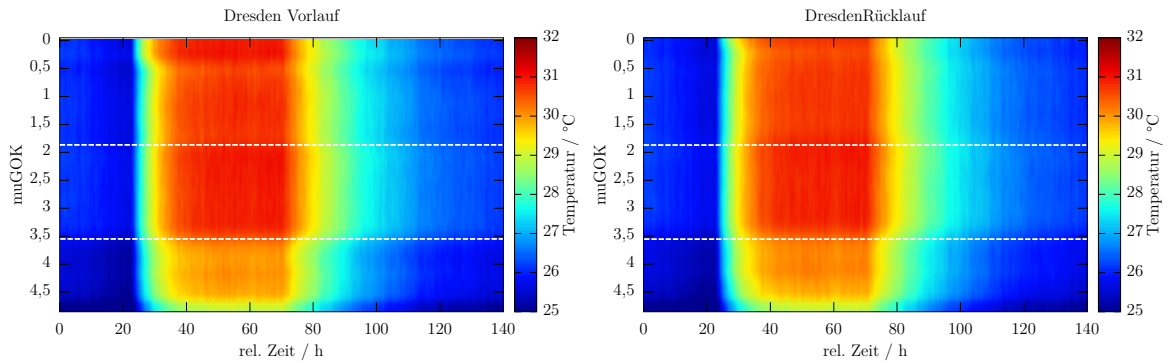


Abbildung 3.5.: Ergebnisse der DTS-Messungen am teilisolierten EWS-Modell an der TU Dresden. Gezeigt sind die Temperaturen während einer Aufheizung. In weiß eingefasst ist der isolierte Bereich des Modells. Die Zeit ist angegeben in Stunden relativ zum Messbeginn.

Temperaturverteilungen muss deshalb erfolgen, da die Versuche gezeigt haben, dass die in der Hinterfüllung gemessene Temperaturdifferenzen zum Teil deutlich größer sind als die an Vor- und Rücklauf erfassten Temperaturen.

Temperaturverteilungen während der TRT

Die Temperaturverteilungen der TRT weisen mehrere Gemeinsamkeiten bei allen Sonden auf. So wurden folgende Kernbeobachtungen gemacht: a) Ausbildung von lokalen Temperaturmaxima/-minima entlang der Verrohrung während der Aufheizung; b) benachbarte LWL-Stränge können negative Temperaturdifferenzen aufweisen. Damit ist gemeint, dass die Temperatur im Grenzbereich von Verrohrung und Hinterfüllung für den Vorlauf niedriger als für den Rücklauf sein kann; c) die TRT erreichen selbst für vergleichbare Sondengeometrien sowie den angenommenen gleichen geologischen Untergrund deutlich voneinander verschiedene Endtemperaturen.

Sowohl die Beobachtungen a) als auch b) werden auf die Interaktion zwischen Wärmefluss aus dem Fluid und der Umgebung zurückgeführt. Es wurde besonderes Augenmerk auf unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten zwischen Hinterfüllung und Untergrund gerichtet. Für den Idealfall wird dabei Folgendes angenommen: In einer idealen EWS entspricht die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung jener des Untergrundes und es liegt eine bestmögliche Ankopplung der Hinterfüllung an den Untergrund vor. Dies führt zu kleinstmöglichen Wärmewiderständen. Wärmestaueffekte durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten zwischen Untergrund und Hinterfüllung entfallen dann, die Wärme fließt gleichmäßig aus dem Wärmeträgerfluid ab. Auf Baustellen kann dieser Zustand

aktuell jedoch nicht erreicht werden. Dies begründet sich darin, dass aus praktischen Gründen nur eine bestimmte Hinterfüllung für die gesamte EWS genutzt wird. Auf diese Weise wird auf Baustellen nicht auf die Wärmeleitfähigkeitsverteilung des Untergrundes eingegangen. Für diese Arbeit stellt sich damit die Frage, warum Wärmeleitfähigkeitsverteilungen und potentielle Wärmestaus überhaupt von Interesse sind, obwohl es bei klassischen TRT unbeachtet bleibt (z.B. VDI, 2010; Sanner et al., 2005). Die intensive Auseinandersetzung mit dieser Frage leitet sich dabei aus der Versuchskonfiguration ab. Streng genommen gilt die TRT-Auswertung nur für die Fluid-Temperaturen. Diese liegen hier jedoch nicht vor, sondern werden durch Hinterfüllungstemperaturen ersetzt. Dabei müssen aber die unterschiedlichen Bedingungen in Hinterfüllung und Fluid beachtet werden. Das Wärmeträgerfluid sollte unter der Annahme, dass in turbulenten Verhältnissen advective Mischung stattfindet und dass thermische Kurzschlusseffekte (wie z.B. in Li et al., 2014; Galgaro und Cultrera, 2013; Zanchini et al., 2010; Zeng et al., 2003, beschrieben) vernachlässigbar sind, im Falle einer Wärmeabführung in den Untergrund (TRT) kontinuierlich über die EWS-Länge auskühlen. Dagegen steht die Hinterfüllung, welche sich nicht bewegt und für die angenommen werden kann, dass alle Wärmetransportprozesse durch Wärmeleitung dominiert werden. Entsprechend müssen zwar auch hier die Temperaturen über die Sondenlänge in der Summe abnehmen, aufgrund des mangelnden advectiven Transportes kann dies jedoch deutlich heterogener erfolgen.

Der zweite wichtige Aspekt ist, dass, im Falle des TRT, die Umgebungstemperatur immer niedriger als die Fluidtemperatur ist. Das bedeutet, dass der Wärmefluss, bei TRT mit Aufheizung, immer aus dem Fluid in den Untergrund/die Umgebung gerichtet ist. Dies bedeutet für die hier gezeigten Versuche, dass die gemessenen Hinterfüllungstemperaturen auch immer niedriger sein müssen als die Fluidtemperaturen des gleichen Tiefenintervalls (z.B. Gehlin, 2002). Dies kann die in Abb. 3.2 und 3.3 beobachtbaren „Überschneidungen“ erklären, bei welchen die Vorlauftemperaturen anscheinend niedriger sind als die Rücklauftemperaturen, was für das vorgestellte Szenario physikalisch unmöglich ist. In Bereichen mit solchen Überschneidungen (z.B. Abb. 3.2c 15 – 20 m oder 3.3 Vor-/Rücklauf 1 5 – 10 m) dürften die höheren gemessenen Temperaturen dichter an den tatsächlichen Wärmeträgerfluidtemperaturen liegen. Gründe hierfür bleiben noch zu finden.

Ein möglicher Erklärungsansatz leitet sich aus dem Ergebnis der Temperaturverteilungsmessungen in Dresden ab. Bei diesen wurde ein vergleichbares Szenario an einem physikalischen Modell generiert. Die Temperatursauslenkung erfolgte dabei analog zum

TRT. Im Zuge unterschiedlicher Messungen wurde versucht, bestimmte Säulenabschnitte durch Isolationsmaterialien thermisch stärker von der Umgebung zu entkoppeln und somit die Wärmeabgabe an die Umgebung zu reduzieren. Ein Teilergebnis dieser Versuche ist in Abb. 3.5 gezeigt. Eingefasst in die weißen Begrenzungen ist der isolierte Bereich. Die Isolation führt hierbei zu einem Wärmestau, was wiederum dazu führt, dass die Temperaturen im isolierten Bereich erstens im Vergleich zu darüber liegenden Bereichen ansteigen und zweitens dichter an die tatsächliche Wärmeträgerfluid-Temperatur heranreichen. Diese Beobachtung von symmetrischen Temperaturspitzen konnte im Feld ebenfalls gezeigt werden (s. Abb. 3.2a) 8 – 12 m und b) 3 – 8 m). Dieses Ergebnis ist erwartbar, wenn das Nahfeld der Sonde als radialsymmetrisch angenommen werden kann (keine vertikale Schichtung). In diesem Fall können die geologischen Bedingungen einen Wärmestau auslösen. Aus geologischer Sicht sollte unter solchen Bedingungen eine asymmetrische Ausbildung von Temperaturspitzen nicht möglich sein.

Die dennoch deutlich in den Daten zu sehenden Überschneidungen von Vor- und Rücklaufttemperaturen sind somit von besonderem Interesse, da sie der Theorie nach nicht auftreten sollten. Aus den Ergebnissen aus Dresden abgeleitet kann diesem Verhalten eine Teilisolation zugrunde liegen. Da mehrere Sonden dieses Verhalten in unterschiedlichen Tiefen zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt weniger stark abhängig vom Untergrund als von der Sonden(installations)geometrie ist. Diese Schlussfolgerung wird daraus abgeleitet, dass die Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem KD2Pro im Zuge des SAGS-Projektes für das Testfeld Wärmeleitfähigkeiten zwischen $1,5$ und $4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ergeben haben, die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung jedoch nur ca. $1,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ beträgt. Damit ist die EWS selbst geringer wärmeleitend als der sie umgebende Untergrund. Das heißt, die Hinterfüllung selbst stellt eine Art von Isolation dar. In einer vollständig symmetrischen, Leitungs-zentrierten EWS mit radialsymmetrischem Untergrund würden lediglich die Wärmetransportparameter der Umgebung das Temperaturregime in der EWS bestimmen. In den hier vorgestellten Sonden wurden jedoch keine Zentrierer verwendet. Folglich konnten sich die Rohrleitungen während des Einbaus in ihrer Lage verschieben (z.B. dezentriert oder zusammengedrückt werden). Vorausgesetzt, die Abstandshalter zwischen den Rohrleitungen arbeiten wie vorgesehen, bedeutet dies bei einer Dezentrierung, dass ein Teil des Sondenbündels tiefer in den Zement gebettet wurde und folglich ein anderer Teil nun deutlich dichter an der Bohrlochwand liegt oder diese sogar berührt. Auf gleichen Wärmetransportwegen wäre dementsprechend die mittlere Wärmeleitfähigkeit der bohrlochwandnahen Rohre/LWL höher als bei jenen, die tief im Zement liegen.

Eine Vielzahl von Prozessen kann zu einer Verlagerung des Temperaturfühlers, dem LWL, führen. Für eine bessere Übersicht sind sie in Abb. 3.6 abgebildet. Zudem kann es während des Einbaus zusätzlich zu unerwünschten Ereignissen wie Bohrlochkollaps (Eintrag von Fremdkörpern) oder einer Ausschlagung (vergrößertes Zementvolumen) kommen. Diese führen ebenfalls zu einer Veränderung der Wärmetransportparameter im Rohr und damit in LWL-Nähe. Möglich ist auch, dass es lediglich zu einem Kontaktverlust von LWL und Rohrleitungen kommt, sich also nur die Lage des LWL und nicht die Lage der EWS verschoben hat. Der Effekt ist jedoch im Feld nicht unterscheidbar. Interpretationserschwerend kommt hinzu, dass sich diese Prozesse beliebig überlagern können.

Die Betrachtung der Temperaturverteilungen innerhalb der Hinterfüllung von EWS während der Durchführung von TRT hat also folgende Erkenntnisse gebracht: a) Bei Temperaturmessungen in der Hinterfüllung von EWS ist es möglich, augenscheinlich widersprüchliche Signale zu empfangen (z.B. kälterer Vorlauf als Rücklauf während der Aufheizung). Diese wurden hier anhand von Feld- und Laborexperimenten gezeigt und auf Isolationseffekte zurückgeführt (relative Wärmetransportparameterveränderung); b) Die Isolationseffekte wurden hier sowohl auf die geologische Umgebung als auch auf die relative Lage der Rohrleitungen/LWL innerhalb der Hinterfüllung zurückgeführt; c) Es war nicht möglich, während des TRT zu identifizieren, welche Form (oder Kombination) von Isolationseffekt(n) zu den gemessenen Signalen führte.

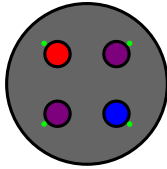
(enhanced) Thermal Response Test

Die ermittelten und bereits diskutierten Temperaturverteilungen wurden anschließend dazu genutzt, eine eTRT-Auswertung durchzuführen. Auch die durch die Auftragnehmer aufgezeichneten TRT-Daten wurden ausgewertet. Dabei waren folgende Forschungsfragen von besonderem Interesse: a) Wie vergleichbar sind TRT bei Sonden in direkter Nachbarschaft zueinander, bei welchen davon ausgegangen werden kann, dass die Untergrundwärmetransportparameter sich nicht wesentlich im Bereich der Sonden ändern; b) wie vergleichbar sind die eTRT-Wärmeleitfähigkeitsprofile sowie die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten der unterschiedlichen Auftragnehmer zwischen den Sonden; c) welche Zusammenhänge bestehen zwischen unterschiedlichen gemessenen und errechneten Werten?

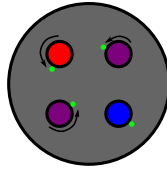
Die erste Frage wurde aus der Beobachtung abgeleitet, dass selbst für EWS-Felder keine Regel existiert, die vorschreibt, den TRT an mehreren Sonden durchzuführen. Der TRT wird aktuell überwiegend zur Bestimmung der Wärmetransportparameter genutzt,

Unterschiedliche Lagepositionen der
Lichtwellenleiter bedingt durch Einbau;
Querschnittsdarstellung

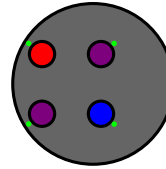
Fehlerfreie Lage von
Lichtwellenleiter und
Verrohrung



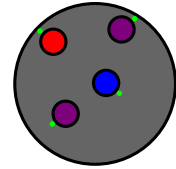
Rotation der Verrohrung
führt zur Lageänderung des
Lichtwellenleiters



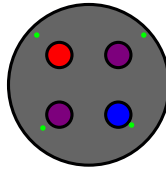
Lageänderung der
Lichtwellenleiter durch
Dezentrierung



Chaotische Lagerung der
Verrohrung in der
Hinterfüllung

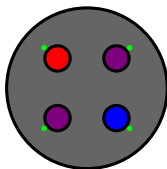


Kontaktverlust von
Lichtwellenleiter und
Verrohrung

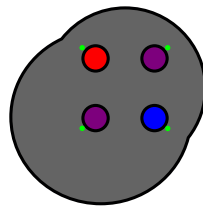


Mögliche Fehlstellenausprägungen;
Querschnittsdarstellung

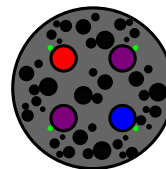
Symmetrisches Bohrloch
ohne Fremdkörper oder
Ausschlagungen



Asymmetrisches Bohrloch
ohne Fremdkörper



Symmetrisches Bohrloch mit
homogener
Fremdkörperverteilung



Symmetrisches Bohrloch mit
inhomogener
Fremdkörperverteilung

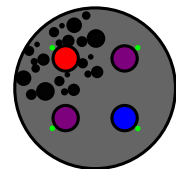


Abbildung 3.6.: Darstellung möglicher Lageveränderungen von Verrohrung und LWL in einer EWS sowie Darstellung möglicher Fehlstellen, die Einfluss auf das ermittelte Temperatursignal nehmen können.

jedoch nur selten als qualitätssichernde Maßnahme und auch nur dann, wenn die Anlage bestimmte Leistungsgrenzen überschreitet. Die Frage, welche Aussagekraft ein TRT für

benachbarte Sonden hat, ist dabei nur unzureichend geklärt, gewinnt aber mit der verstärkt einsetzenden Nutzung großer (urbaner) Areal für die Wärmenutzung zunehmend an Bedeutung. Dies gilt vor allem dort, wo mehr als hundert EWS auf engem Raum installiert sind (z.B. Stadt Köln), die nicht zwangsläufig zur selben Anlage gehören und somit nicht für alle Sonden TRT durchgeführt werden bzw. die Leistungsentnahme einen TRT am Einzelsystem nicht rechtfertigt, in der Summe der genutzten EWS eines Areals aber durchaus eine Leistungsentnahme durchgeführt wird, die die Durchführung von TRT voraussetzt.

Beim Vergleich der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten haben sich dabei zwei interessante Aspekte ergeben: a) Die Wärmeleitfähigkeiten, die durch die Auftragnehmer übermittelt wurden, unterscheiden sich zum Teil erheblich; b) die selbst ermittelten Wärmeleitfähigkeiten sind immer größer gleich derjenigen der Auftragnehmer. Dabei gilt, dass die Wärmeleitfähigkeiten aus Tab. 3.7 jeweils aus demselben Datensatz erhoben wurden. Dabei wurde für alle Werte ein Fehler von $\pm 10\%$ angenommen, der vergleichbar mit der Bestimmungsgenauigkeit des TRT ist (9% nach Liebel et al. (2011)) und der Unsicherheit der KD2Pro-Wärmeleitfähigkeitsmessungen entspricht. Dabei liegen die durch die Auftragnehmer ermittelten Werte zwischen $1,9$ und $3,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, die selbst ermittelten Werte zwischen $2,6$ und $3,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Stellt man diese Werte den VDI4640-Werten gegenüber, so wird ersichtlich, dass alle selbst ermittelten Wärmeleitfähigkeiten im oberen Bereich bzw. höher sind (vgl. Abb. 3.7) als die Werte der VDI4640 für die angenommene sedimentäre Zusammensetzung des Testfelds.

Der Unterschied zwischen VDI-Werten (VDI, 2010) und selbst ausgewerteten Daten kann dabei auf den Grundwasserstrom zurückgeführt werden. Nach Huber et al. (2014) nimmt die effektive Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Grundwasserfluss zu. Da die Werte aus der VDI4640 aber ohne Grundwasserstrom im Labor ermittelt werden, kann der effektive Wärmeleitfähigkeitsgewinn durch die VDI4640 nicht berücksichtigt werden, wohl aber durch den TRT. Da alle EWS in das Grundwasser reichen, kann davon ausgegangen werden, dass die erhöhten gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten aus dem Grundwasserstrom resultieren. Die selbst ausgewerteten Daten der Zyklen 1 – 3 stimmen dabei gut überein und liegen jeweils im Bereich der Bestimmungsgenauigkeit von 10%. Das bedeutet, dass die Auswertung aller Datenpunkte des linearen Anteils der Kurve, bei Vernachlässigung von künstlich festgelegten Maximallaufzeiten, eine gute Übereinstimmung in allen sieben durchgeführten TRT zeigt. Die Ergebnisse liegen dabei in einem Bereich, der von Huber et al. (2014) für wasserführende Sande zu erwarten ist,

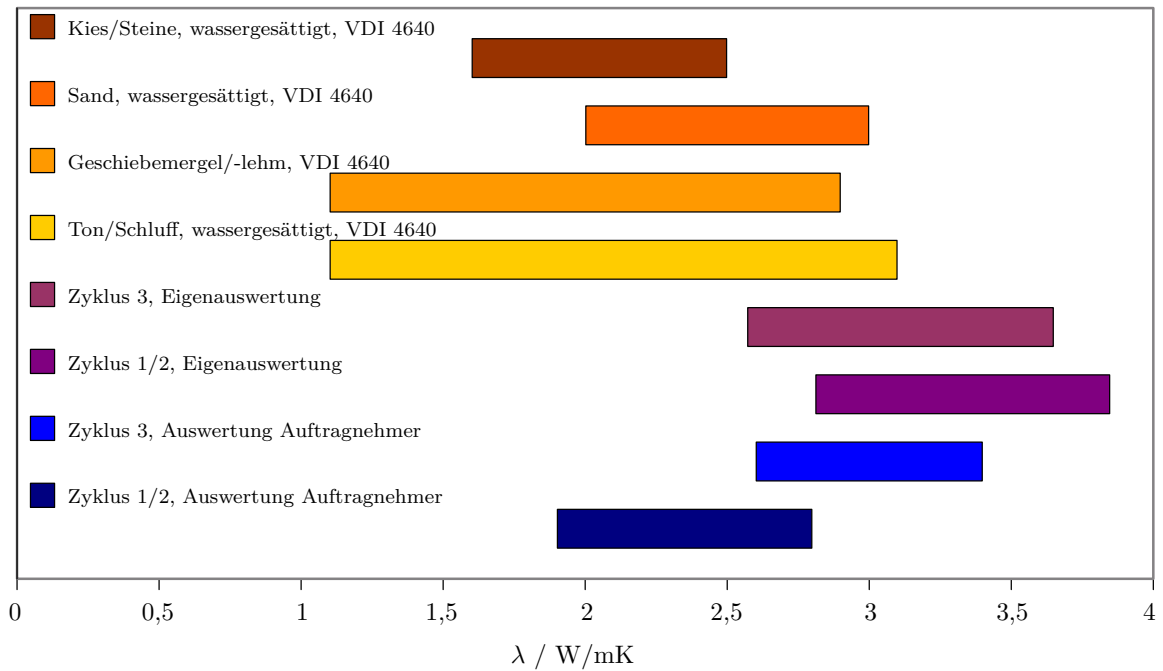


Abbildung 3.7.: Wärmeleitfähigkeitsbereiche, die durch die Auswertung der Temperaturdaten nach TRT ermittelt wurden, verglichen mit typischen Wärmeleitfähigkeiten für Lockerseimente aus der VDI4640 (VDI, 2010) (VDI-Werte und deren Erhebung sind nicht genauer spezifiziert).

was gut mit der erkundeten Sedimentzusammensetzung übereinstimmt, zumindestens was den Grundwasserleiter selbst (ab 10 muGOK) betrifft.

Die selbst ausgewerteten TRT stimmen auch gut mit den Ergebnissen des Auftragnehmers des dritten Zyklus überein. Dies gilt jedoch nicht für die Ergebnisse der Auftragnehmer aus den Zyklen 1 und 2. Diese Ergebnisse bilden zwar eine Bereich von Wärmeleitfähigkeiten ab, der der erkundeten Geologie entspricht, sie sind jedoch deutlich niedriger als die Ergebnisse der selbst ausgewerteten TRT sowie derjenigen von Zyklus 3. Das Grundwasser käme hier als Ursache für die Unterschiede in Frage, da auf dem Testfeld durchaus Schwankungen im Grundwasserspiegel sowie der Fließrichtung aufgezeigt werden konnten. Unter der Annahme jedoch, dass die VDI-Werte ohne Grundwasserströmung erhoben wurden, würde dies bedeuten, dass während der TRT keinerlei relevante Grundwasserströmung vorgelegen hätte. Das wurde zwar nicht getrennt untersucht, ist aber bei einer sonstigen angenommenen Fließgeschwindigkeit von 0,8 bis 1 m d⁻¹ (ermittelt aus benachbarten Piezometern) als unwahrscheinlich zu betrachten. Größtes Problem dieses Vergleiches ist jedoch, dass unbekannt ist, wie die

Auftragnehmer aus den Zyklen 1 und 2 die Auswertung tatsächlich durchgeführt haben. Bekannt ist dies nur für den Auftragnehmer 3, der im dritten Zyklus die Durchführung und Erstauswertung der TRT durchgeführt hat. Aus der Rückentwicklung der Ergebnisse sowie den Erläuterungen des Gutachtens ist zu anzunehmen, dass hier eine sukzessive Anpassung des linearen Anteils bis zum Zeitpunkt 72 h nach Versuchsbeginn vorgenommen wurde. Ein Nachvollziehen dieser Auswertetechnik zeigt die vom Auftragnehmer übermittelten Ergebnisse. Warum der Auftragnehmer sich dagegen entschieden hat, den ganzen Datensatz zu verwenden (z.B. für DUS1 120 h), ist nicht bekannt. Dabei wird hier, analog zu Pumpversuchen, davon ausgegangen, dass eine längere Versuchszeit das erfasste Volumen vergrößert und somit eine bessere Abschätzung der effektiven Untergrundwärmeleitfähigkeit hätte ermöglichen können.

Die im Anschluss durchgeführte Auswertung der Temperaturverteilungen der Zyklen 1 und 2 als eTRT lieferte dann die in Abb. 3.4 & 3.8 (mit/ohne Abweichungsintervall) dargestellten Verteilungen. Aus der Abb. 3.8 wird ersichtlich, dass die errechneten Profile trotz vergleichbarem Untergrund deutlich voneinander verschieden sind und die Abweichungen im überwiegenden Teil innerhalb der Bestimmungsgenauigkeit liegen, was eventuelle Aussagen über die Verteilungen deutlich abschwächt.

In den Bereichen, die gemeinsam von den vier EWS abgedeckt werden, besteht gute Übereinstimmung in den Wärmeleitfähigkeiten für die ungesättigte Zone zwischen EUS, DUS1 und KOAX mit Werten zwischen $2,6$ bis $2,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Die Werte sind hierbei höher als die im Labor ermittelten Werte, aber niedriger als die Werte, die für DUS 2 ermittelt wurden. Interessant ist diese Beobachtung für DUS1 und DUS2 insofern, als dass es sich um zwei EWS quasi gleichen Bautyps handelt (Doppel-U-Sonden, 20 – 21 m lang). Beide Sonden zeigen hier jedoch einen vergleichbaren Trend von zunehmenden Wärmeleitfähigkeiten mit zunehmender Tiefe. Dabei liegt im Bereich des durch die Bohrungen angenommenen und durch DP bestätigten Grundwassergeringleiters für DUS2 eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeiten vor, die in keiner der anderen Sonden aufgetreten ist. Für KOAX ist dies ganz im Gegenteil der Bereich mit den höchsten erfassten Wärmeleitfähigkeiten. KOAX ist auch die EWS, die als einzige eine deutliche Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit Erreichen des Grundwasserspiegels bei 10 muGOK aufweist.

Durch die gegebene, nur bedingte Vergleichbarkeit der Profile untereinander sowie die zueinander unterschiedlichen ermittelten Wärmeleitfähigkeiten muss anschließend die Frage geklärt werden, inwieweit der eTRT das Ergebnis des TRT abbildet. Dies wurde als notwendig erachtet, da der TRT eine über die Länge gemittelte effektive

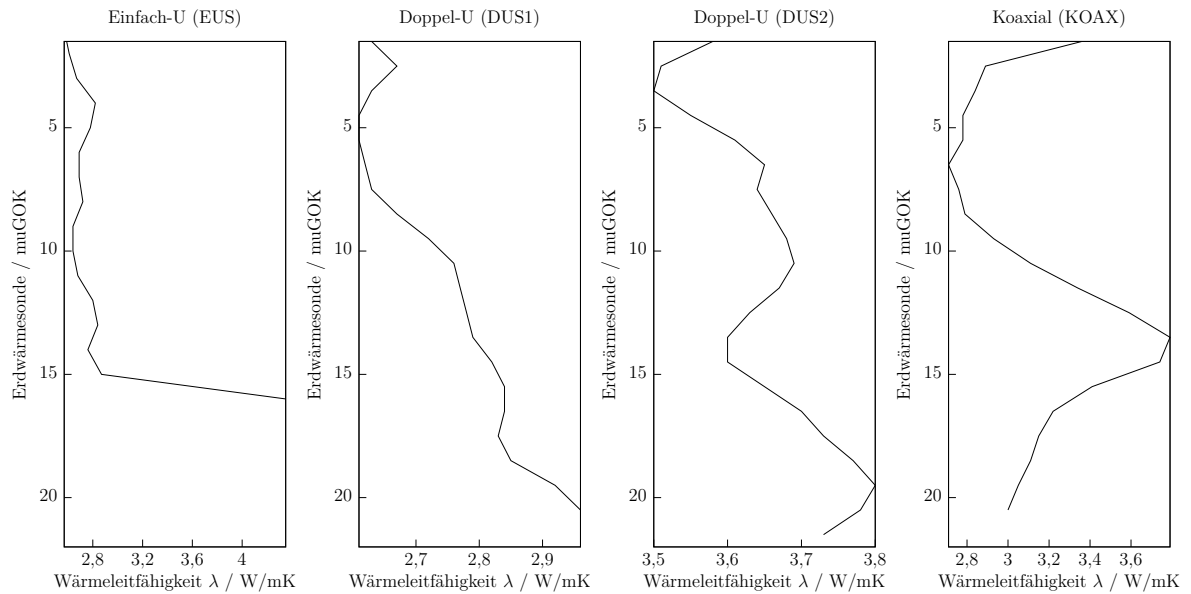


Abbildung 3.8.: Wärmeleitfähigkeitsprofile über die Länge der Erdwärmesonden, ermittelt aus der eTRT-Auswertung. Von links nach rechts: EUS, DUS1, DUS2 und KOAX

Wärmeleitfähigkeit ausgibt, also mit dem gemittelten eTRT theoretisch übereinstimmen müsste. Zu diesem Zweck wurde das harmonische Mittel der eTRT gebildet und den TRT-Ergebnissen gegenübergestellt (s. Tab. 3.8). Die Abweichungen reichen von $0,1 - 0,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und pendeln sich zwischen den niedrigeren und den höheren Werten der unterschiedlichen Zyklen ein.

Tabelle 3.8.: Gegenüberstellung der TRT-Werte der Auftragnehmer sowie der Eigenauswertung und dem harmonischen Mittel der eTRT. Alle Einheiten in $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; Zx entspricht den Zyklen aus Tab. 3.7.

Sonde	λ Auftragnehmer			λ Eigenauswertung			λ eTRT
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	harm. Mittel
EUS	2,4		3,4	3,3		3,7	2,8 (Z1)
DUS1		1,9	2,6		2,8	2,6	2,7 (Z2)
DUS2		2,8	3,0		3,9	3,3	3,7 (Z2)
KOAX		2,0			3,2		3,1 (Z2)

Als abschließender Punkt der TRT-Messungen wird hier noch auf die Feststellung eingegangen, dass in den drei gut vergleichbaren TRT von DUS1, DUS2 und KOAX des Zyklus 2 (gleicher angestrebter Leistungseintrag für die EWS) deutlich unterschiedliche Maximaltemperaturen erreicht wurden. Die maximalen Fluidtemperaturen für DUS1,

DUS2 und KOAX liegen bei 50, 40 und 55 °C. Aufgrund der direkten Nähe der EWS zueinander sowie der gerechtfertigten Annahme, dass die geologischen Bedingungen im Nahfeld der Sonde vergleichbar und zumindest DUS1 und DUS2 vom gleichen Typ sind, überraschen diese Werte sehr. Es wurden ähnlichere Maximaltemperaturen erwartet. Dass die unterschiedlichen Temperaturen von der leicht unterschiedlichen Länge der Sonden (ca. +/-1 m) herrühren, gilt als unwahrscheinlich. Dementsprechend wurde eine Untersuchung verschiedener möglicher Zusammenhänge durchgeführt. Dabei wurde zuerst überprüft, ob tatsächlich mit Schwankungen des Leistungseintrages eine messbare Temperaturänderung einhergeht. Dafür wurde angenommen, dass die erreichten Maximaltemperaturen steigen, wenn der Leistungseintrag steigt. Dieser Zusammenhang konnte für die TRT bestätigt werden (vgl. Abb. 3.9a). Entsprechend sollten niedrige erreichte Temperaturen auf eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit hindeuten, da die Wärme besser abgeführt wird und der Anstieg der Temperaturen entsprechend reduziert ist. Dieser Zusammenhang kann genau genommen mit den vorliegenden Daten der TRT nicht gezeigt werden, da sich die Wiederholungsmessungen lediglich auf ein Testfeld beziehen, auf dem die Wärmetransportparameter als konstant angenommen werden. Vorsicht ist dementsprechend geboten, da sich hier aus den TRT der Auftragnehmer anscheinend der direkte lineare Zusammenhang ableitet, dass mit abnehmender Endtemperatur eine steigende Wärmeleitfähigkeit einhergeht (vgl. Abb. 3.9b). Es muss aber beachtet werden, dass hier nur unzureichende Informationen über die Auswertetechnik vorliegen und dass das übermittelte Ergebnis der Auftragnehmer unter Umständen nur von der Auswertetechnik abhängt, nicht jedoch von den tatsächlichen Gegebenheiten. Die deutlichen Unterschiede zwischen den Sonden legen ebenfalls nahe, dass ausbaubedingte und unter Umständen unbekannte Parameter, wie Fehlstellen, einen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Aus diesem Grund wurde überprüft, ob der gezeigte Zusammenhang bestehen bleibt, wenn man nur einen Auswertungsansatz zugrunde legt (vgl. Abb. 3.9c). Dies war für den klassischen TRT nicht der Fall, was den Erwartungen für das Testfeld entspricht. Wird angenommen, dass die unterschiedlichen TRT-Maximaltemperaturen nicht aus der Verteilung der Wärmetransportparameter resultieren, welche auf dem Testfeld als konstant angenommen werden und auch nicht von der Versuchsdurchführung herrühren, so müssen sie ein direkter Indikator für die Ausführungsqualität der EWS sein.

Für die eTRT gelten aber andere Bedingungen, da hier aufgrund der tiefenzugehörigen Abbildung von Wärmeleitfähigkeit und Maximaltemperatur mehr Datenpunkte sowie eine tatsächliche Differenzierung des Testfeldes in unterschiedliche Tiefenbereiche vorliegt. Dabei zeigte sich, dass ein guter linearer Zusammenhang zwischen der erreich-

ten Endtemperatur des eTRT und der ermittelten Wärmeleitfähigkeit besteht, insofern hohe Maximaltemperaturen ein Indikator für reduzierte Wärmeleitfähigkeit sind (vgl. Abb. 3.9d). Fehlstellen würden hier miterfasst, sind aber nicht differenzierbar.

Folgende Aussagen können folglich abschließend aus den durchgeführten TRT abgeleitet werden: a) Die Vergleichbarkeit von TRT von in enger Nachbarschaft zueinander stehender EWS, in quartären Sedimenten, ist eingeschränkt und hängt neben den geologischen Bedingungen auch vom Ausbau der einzelnen Sonden sowie der genutzten Auswertetechnik ab; b) Die durchgeführten eTRT bilden die Ergebnisse der TRT ausreichend gut ab, liefern jedoch für dieses Feld nur beschränkt zusätzliche Informationen, genauer wird auf diesen Punkt in der folgenden Fehlerbetrachtung eingegangen; c) Die Auswertung legt einen Zusammenhang zwischen erreichten hohen Endtemperaturen und der niedrigen Wärmeleitfähigkeiten nahe. Dieser kann aufgrund eines Mangels an Daten für unterschiedliche Testfelder nicht für die einzelnen TRT gezeigt werden, er zeigt sich aber im eTRT; d) Der Grundwasserstrom erhöht die gemessenen (effektiven) Wärmeleitfähigkeiten, was vorhergehende Arbeiten bestätigt; e) Aufgrund der Beobachtung in a) ist es notwendig, für größeren EWS-Felder entweder TRT an unterschiedlichen Sonden zu wiederholen oder verstärkten Aufwand in das Qualitätsmanagement der EWS zu investieren, da sonst ein einzelner TRT unter Umständen nur sehr wenig Aussagekraft für das EWS-Feld hat und zu Überschätzung entnehmbarer Leistung führen kann. Für das hiesige Testfeld hätte eine Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit anhand von DUS2 zu einer deutlichen Überschätzung im Vergleich zu DUS1 und KOAX geführt.

Fehlerbetrachtung

Aufgrund des Umfangs der Datenerhebung in der (e)TRT-Versuchsserie sowie den unterschiedlichen Auswertungsansätzen erfolgt die Fehlerbetrachtung für die Messungen erst an dieser Stelle. Dabei lassen sich die möglichen Fehlerquellen grob in zwei Bereiche unterteilen: Fehlerquellen, die mit dem Sensor, also der tatsächlichen Messung (gültig für alle vorgestellten Messungen mit dem Sensor, auch jene, die nicht an diesen Versuch gekoppelt sind), zusammenhängen und Fehlerquellen, die einen Einfluss auf die Interpretation der Ergebnisse haben können, aber nicht direkt mit dem Sensor verknüpft sind, wie vor allem die Auswertung und entsprechende Begleitumstände.

Ausschließlich mit dem Sensor verknüpft sind vor allem Fehler wie Offset(-schwankungen), die Dämpfung und die Signalverstärkung. Zusätzlich gibt es noch Fehler, die durch den LWL erzeugt werden, wie Faserbrüche, step-losses und Faserendreflexionen. Während im Methodikteil ausführlich auf die Behandlung der Offsetkorrektur einge-

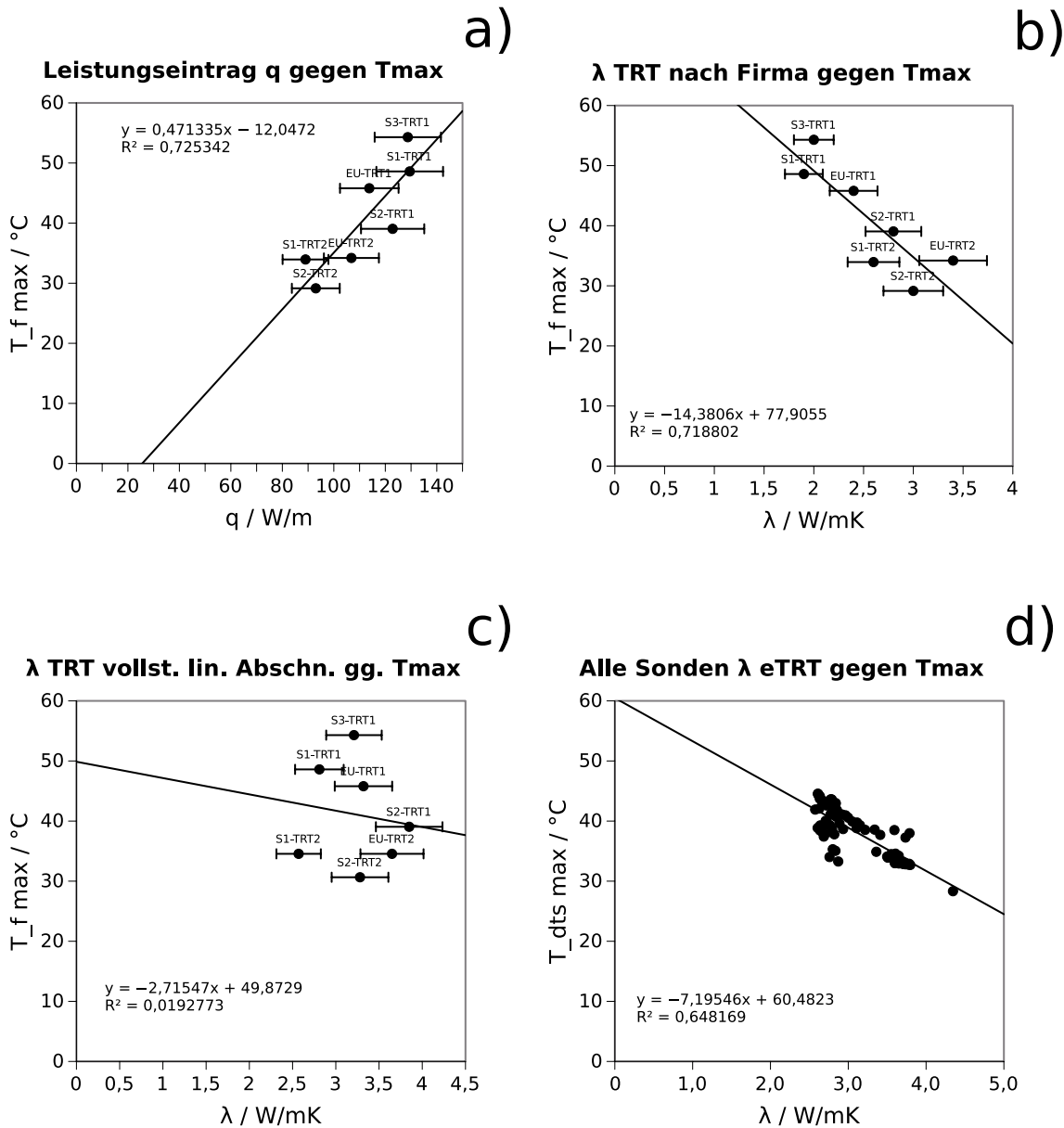


Abbildung 3.9.: Korrelationen zwischen gemessenen Maximaltemperaturen und unterschiedlichen Parametern: a) Eingangsheizleistung q ; b) λ , wie durch die Auftragnehmer angegeben; c) aus dem Ansatz von Liebel et al. (2011) ermittelte Wärmeleitfähigkeiten; d) λ aus den eTRT

gangen wurde, ist für diese Messung vor allem die Betrachtung möglicher Fehler durch Faserbrüche von Interesse. Während für die Untersuchung des relativen Wärmespeichervermögens das Faserende fachgerecht bearbeitet werden konnte und für die Messungen an den Säulen sowie EUS dual-ended Konfigurationen zum Einsatz kamen, kam es bei

der Verlegung der LWL für DUS1,2 und KOAX zu ungewollten Kabelbrüchen für DUS1 und 2. Daraus resultierend liegen unbehandelte Faserenden in beiden EWS vor. Aus Agilent Technologies (2007) ist bekannt, dass Reflexionen an unbehandelten Faserenden die Messergebnisse verfälschen können. Es wird empfohlen, einen 20 m langen Faserbereich zwischen Faserende und Messstrecke bereitzustellen. Beides ist für DUS1 und 2 nur bedingt möglich. Da DUS1 am Sondenfuß gebrochen ist, wurde der ca. 20 m lange Teilbereich hinter dem Bruch, der einem kompletten LWL-Strang entspricht, verworfen, da die Messqualität sehr gering war und der Vergleichsstrang nicht gemessen werden konnte. Für DUS2 wurde dies nicht gemacht, da hier noch 2/3 des ersten Umlaufes nach dem Bruch verfügbar waren. Aus diesem Grund wurde die schlechtere Messqualität in Kauf genommen, da somit der zweite Vorlauf und Rücklauf auf einer Gesamtlänge von ca. 14 m verglichen werden konnten. Als Resultat unterliegen die Bereiche des zweiten Umlaufes von DUS2 jedoch stärkeren Schwankungen und haben mit einer Standardabweichung der Messung im Bereich von 0,25 bis 0,35 K eine deutlich größere Variation als die anderen Bereiche, deren Standardabweichungen nur im Bereich von 0,15 bis 0,25 K liegen.

Über mögliche Dämpfungseffekte entlang der Faser kann keine fundierte Aussage getroffen werden, da eine ungestörte Nullmessung des Untergrundes aufgrund der Tatsache, dass die LWL zusammen mit der EWS eingebracht wurde, nicht durchgeführt werden konnte. Ein kontinuierlicher Anstieg der Temperaturen, der oberhalb der erwarteten Messungenauigkeit liegt, wurde jedoch nicht festgestellt. Aus diesem Grund wird angenommen, dass Dämpfungseffekte vernachlässigbar sind. Ebenfalls dafür spricht, dass die gesamte Konstruktion, einschließlich der EWS, pro Kanal eine Länge von 400 m nicht überschreitet, was lediglich 20 % der Maximalreichweite des Sensors entspricht.

Zusätzlich zu den möglichen Sensorfehlern wird die Interpretation der Daten noch von den einbaubedingten Unsicherheiten sowie den Unsicherheiten in Bezug auf die tatsächliche Tiefenlage der einzelnen Messintervalle beeinflusst. Dabei sind beide Fehlerquellen mit Temperaturmessungen nur bedingt nachvollziehbar. Das liegt daran, dass eine messbare Veränderung des Temperatursignals nicht zwangsläufig auf eine Fehlstelle in der Bohrung oder Hinterfüllung, sondern auch auf eine Fehlpositionierung des Sensors zurückgeführt werden kann. Dabei führt der Verlust des Kontaktes zwischen LWL und Verrohrung zu einem besonderen Problem: So ist es unmöglich festzustellen, wo die aktuelle Temperaturmessung stattgefunden hat. Das Tiefenintervall kann zwar relativ zuverlässig bestimmt werden, die Lage der Messung in der XY-Ebene jedoch nicht, da die Positionen von LWL und Verrohrung zueinander verschoben sein können. Erschwerend

kommt hinzu, dass alle in Abb. 3.6 dargestellten Einbaufehler in beliebiger Kombination zusätzlich auftreten können. Dabei hat die Beobachtung des Einbauprozesses gezeigt, dass es äußerst komplex ist sicherzustellen, dass die Faser in der angestrebten Position bleibt. Je nach Umgebungstemperatur sind die Rohrleitungen unterschiedlich steif. Je kälter es ist, desto steifer sind die Rohrleitungen. Dadurch, dass die Leitungen in der Regel auf Spindeln aufgewickelt sind, liegen sie häufig bereits in verdrillter Form vor. Selbst für diese Arbeit, wo die relativ kurzen Sonden im Vorhinein abgewickelt wurden, was eigentlich aufgrund der Möglichkeit, sie zu beschädigen, nicht gestattet ist, zeigte sich, dass trotz aller Bemühungen die Endlage der Faser unbekannt ist. Während des Versenkens der EWS in der Bohrung kam es hörbar zur Verschiebung der LWL. Des Weiteren konnte eine Torsion der einzelnen LWL-Stränge oberhalb der Geländeoberkante beobachtet werden. Die Torsion hielt sich zwar in Grenzen, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es auf weiten Teilen der EWS zu Lageverschiebungen der LWL gekommen ist. Dabei ist nicht gesagt, dass dies für alle Abschnitte der EWS gleichgerichtet erfolgte. Unterschiedliche Bereiche der EWS können sich in unterschiedliche Richtungen gedreht haben. Da jedoch nur die Faser für DUS2 fernab des Sondenfußes gebrochen ist, kann davon ausgegangen werden, dass keine vollständige Rotation eines Stranges erfolgte, da sonst die Faser an den Abstandshaltern gebrochen wäre. Aufgrund der Sondengeometrie von KOAX entfällt dort diese Problematik. Jedoch spielt bei KOAX das Berühren der Bohrlochwand aufgrund der einseitigen Verpressung mit Zement eine deutlich größere Rolle. Dadurch wird der Zement gezwungen, um die Sonde herumzuffießen und einseitige Zementverteilungen werden wahrscheinlicher.

Es darf zudem nicht vergessen werden, dass die Messauflösung der gezeigten Messungen an den EWS lediglich 1 m beträgt. Dementsprechend kann der eTRT keine Strukturen auflösen, die kleiner als ein Meter sind. Dies bedeutet ebenfalls, dass das tatsächliche Tiefenintervall um +/- 1 m von dem hier bestimmten abweichen kann. Für die gezeigten Sonden sind dies immerhin im Schnitt ein Zwanzigstel der Messstrecke pro Verrohrungsabschnitt. Tatsächlich sind die hier gezeigten Sonden allerdings auch unüblich kurz. Dies resultiert daraus, dass eine tatsächliche Nutzung für eine Beheizung oder Kühlung nicht angestrebt wurde, also auch keine Leistungswerte erreicht werden mussten. Je kleiner die Fehlstelle oder die geologische Struktur ist, die man abbilden möchte, desto kleinere Messintervalle muss das genutzte DTS haben. Bei modernen Geräten liegen diese meist schon unterhalb von 0,5 m, womit bereits sehr kleinskalige Fehlstellen, bzw. geologische Variationen, aufgezeigt werden können.

Zusätzlich zu den beschriebenen Fehlern kommen Unsicherheiten in der Auswertung hinzu. Für den Vergleich der TRT untereinander ist dies vor allem der Aspekt der Unwissenheit über die tatsächliche Auswerterroutine der Auftragnehmer, die es unmöglich macht, die übermittelten Ergebnisse aus den Zyklen 1 und 2 nachzuvollziehen. Hinzu kommt die Nutzung des einfachst möglichen Ansatzes zur Auswertung von TRT, der hier auf eTRT übertragen wurde. Für den eTRT gehen damit unterschiedliche Fehlerquellen einher. Die entscheidende dabei ist, dass keine Aussage über den tatsächlichen Leistungseintrag für jedes Tiefenintervall getroffen werden kann, da keine Informationen über die Wärmeträgerfluidtemperatur für die unterschiedlichen Intervalle vorliegen. Entsprechende Temperaturen sind jedoch notwendig, wenn der Leistungsaustrag aus der Sonde, ohne Kenntnis über die Wärmetransportparameter, berechnet werden soll. Diese Problematik wird durch das äußerst komplexe Temperatursignal der unterschiedlichen LWL-Stränge der EWS verstärkt. Dies bedeutet, dass die Auswertung mit der vereinfachten Annahme des Leistungseintrags des TRT arbeitet, welche einen potentialabhängigen Wärmefluss über die Länge der EWS und damit unterschiedlichen Leistungseintrag nicht abbilden kann. Dies verzerrt die Profile, da die unter Umständen unterschiedlichen Bedingungen der vadosen Zone nicht abgebildet werden können, was somit die Aussagekraft der Ergebnisse schwächt. Gleichzeitig liegt der Großteil der gemessenen Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Bestimmungsgenauigkeit von 10 %, was im Endeffekt als kein gemessener Unterschied gedeutet hätte werden können. Da diese Variationen aber über einen längeren Zeitraum, also viele Messzyklen, erhalten bleiben, wird das Signal jedoch als tatsächlicher Messunterschied gewertet.

4. Untersuchung des relativen Untergrundwärmespeichervermögens als Werkzeug der flachen geothermischen Erkundung

Die im Folgenden dargelegten Erkenntnisse wurden im Zuge der Durchführung eines Wärmetracertests gewonnen und in Seibertz et al. (2016) veröffentlicht. Ziel war die hochauflösende Aufzeichnung der Temperaturverteilungen im Untergrund während eines Wärmetracertests und die anschließende Beobachtung des Abkühlens in der Messstelle zur Charakterisierung des relativen Untergrundwärmespeichervermögens. Der Versuch kann als Grundlage für eine mobile Erkundung von Wärmetransportparametern in bereits bestehenden Piezometern gesehen werden und stellt damit ein Werkzeug in der Erkundung von Projekten der flachen Geothermie dar.

4.1. Einleitung

Der vorgestellte Versuch wurde ursprünglich im Kontext der Energiespeicherung und der entsprechenden Erkundung des Untergrundes durchgeführt, um eine alternative Erkundungsmöglichkeit für TRT bereitzustellen. Dabei geht es nicht nur um die Speicherung, sondern indirekt auch um die Regeneration des Temperaturpotentials für die nächste geothermische Entzugsperiode (z.B. Dickinson et al., 2009). Systeme, die Wärme im Untergrund für die spätere Nutzung zwischenspeichern, gehören zu den bidirektionalen Systemen. Der Vorgang als solcher wird in der Fachliteratur im Allgemeinen als underground thermal energy storage (UTES) bezeichnet (z.B. Lee, 2010; Novo et al., 2010). Wird dies über die Einbringung erwärmten Wassers in Grundwasserleiter erreicht, wird der Vorgang auch als aquifer thermal energy storage (ATES) bezeichnet (z.B. Sommer et al., 2014; Bloemendal et al., 2014).

Um das thermische Speichervermögen des Untergrundes zu charakterisieren, wird häufig auf numerische Modelle zurückgegriffen (z.B. Bridger und Allen, 2014; Lee, 2010). Für diese müssen die den Transport definierenden Untergrundparameter bekannt sein. Während es eine große Auswahl an Verfahren zur hydraulischen Charakterisierung des Untergrundes gibt, wie etwa Slug-Tests, Pumpversuche, Korngrößenanalysen und Tracerversuche (z.B. Bakker et al., 2015; Vienken et al., 2012; Chia-Shyun und Ching-Rung, 2006; Butler et al., 2003), ist die Auswahl an thermischen Charakterisierungsmöglichkeiten begrenzt. In der Regel wird auf Laboranalysen von Bohrgut, Kartierungen oder Literaturwerte zurückgegriffen (z.B. VDI, 2010; Hamada et al., 2002). Ergänzt wird diese Palette um den bereits vorgestellten Thermal Response Test (TRT), mit dessen Hilfe die effektive Wärmeleitfähigkeit entlang einer Erdwärmesonde *in situ* ermittelt werden kann (z.B. Beier et al., 2013; Sanner et al., 2005; Gehlin, 2002). Durch die Anwendung des eTRT (enhanced TRT) ist dies auch für unterschiedliche Intervalle der EWS möglich (z.B. Acuña und Palm, 2013; Raymond et al., 2011; Fujii et al., 2009). Dies ist vor allem interessant für sehr flache Systeme mit Sondenstrecken von nur 30-40 m, wo kleinskalige Veränderungen im Untergrund größeren Einfluss auf die Systemeffizienz nehmen können (z.B. Sommer et al., 2013; Ferguson, 2007).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung und Auswertung des Abkühlens eines heterogenen, quartären Grundwasserleiters nach thermischer Anregung durch einen Wärmetracertest gezeigt. Das Testfeld und der Untergrund ist dabei identisch zu den TRT-Versuchen aus dem Kapitel 3. Die thermische Anregung erfolgte hierbei im Grundwasserleiter selbst über ein elektrisches Heizkabel (in-aquifer), um die Veränderung des Druckspiegels durch Wasserzugabe zu vermeiden. Das normalisierte Abkühlen der Temperatur über die Zeit wird dann hinsichtlich Abkühlmuster untersucht und die Temperaturverteilungen mit Bohrdaten und Direct-Push(DP)-Messungen verglichen. Der Versuch imitiert damit partiell einen TRT, bietet jedoch den Vorteil, dass a) bestehende Grundwassermessstellen für die Erkundung genutzt werden können und b) die Konstruktion mobil ist, also wieder genutzt werden kann. Dies bietet die Möglichkeit, die für die hydraulische Erkundung von potentiellen Standorten von EWS bereits bestehenden Piezometer zur Erhöhung der Datendichte, in Bezug auf den Wärmetransport, zu nutzen. Das im Anschluss an die TRT, vorgestellt in Kapitel 3, gemessene Abkühlen der EWS wurde ebenfalls für die Auswertung genutzt. Dies ist vor allem für bidirektionale Systeme eine wichtige Ergänzung zum TRT, da damit die Wärmespeichereigenschaften der EWS zusätzlich erfasst werden können.

Alle mit Bezug zu DTS ausgeführten Arbeiten wurden vom Autor, Klodwig Seibertz, durchgeführt. Die Widerstandstemperaturmessungen wurden von Andrei Chirila durchgeführt. Die Auswertung und Aufbereitung der gezeigten DP-Daten wurden durch Manuel Kreck und Thomas Vienken ausgeführt.

Die DTS Daten zu den Versuchen sind auf dem elektronischen Speichermedium in den Ordnern Experiment_3BHE_Leipzig, Experiment_EUS_Leipzig und Experiment_BHE_Physical_Model_Dresden sowie Experiment_Heat_Tracer abgelegt (vgl. Appendix A).

4.2. Methodik

4.2.1. Wärmeinjektion und Temperaturmessung

Das Experiment wurde wie in Abb. 4.1 dargestellt installiert. Zu diesem Zweck wurden zwei Grundwassermessstellen mit einer Tiefe von 15,5 m eingerichtet (Innendurchmesser: 38,1 mm; Außendurchmesser: 51 mm). In jede Grundwassermessstelle wurde eine DTS-Konstruktion eingelassen. Die DTS-Konstruktionen bestehen aus 31,1 mm Pegelmaterial, auf welches der Lichtwellenleiter aufgebracht wurde. Sowohl die eigentlichen stationären Piezometer als auch die temporären DTS-Konstruktionen bestehen aus HD-PE100 (high density, also hoch-dichtes Polyethylen).

Die Aufbringung des Lichtwellenleiters erfolgte durch Wicklung der Art, dass pro zehn Zentimeter Pegel ein Meter Lichtwellenleiter zu liegen kam. Damit konnte die räumliche Auflösung von einem Meter auf zehn Zentimeter verbessert werden. Durch enges Aufwickeln von 20 m Faser auf dem letzten halben Meter der DTS-Konstruktion wurden reflexionsbedingte Störungen der Messung vermieden. Beide DTS-Konstruktionen wurden in der single-ended Konfiguration betrieben (vgl. Abb. 2.9). DTS1 war dabei die oberstromige Grundwasserbeobachtungsstelle, die auch das selbstregulierende elektrische Heizkabel enthielt. Sie war fünf Meter lang und hatte 45 Messintervalle. DTS2 war nur vier Meter lang und hatte dementsprechend nur 35 Messintervalle. Das Messgerät N4386-A misst seine Kanäle in Serie. Da single-ended gemessen und für jeden Kanal eine Messzeit von 60 s vorgesehen wurde, ergab sich ein Messzyklus von 120 s.

Im Inneren der beiden DTS-Konstruktionen war jeweils eine Pt₁₀₀-Messkette untergebracht. Diese hat eine Temperaturauflösung von 0,05 K und eine räumliche Auflösung von 0,5 m, was sich aus den 15 verfügbaren Sensoren auf einer Länge von sieben Metern

ableitet. Der Messzyklus betrug hier drei Sekunden gefolgt von 120 s Pause, um zeitliche Synchronisation mit der DTS-Messung zu erreichen.

Zusätzlich zu der Pt₁₀₀-Messkette befand sich in der oberstromigen DTS-Konstruktion, DTS1, das Heizkabel. Es handelte sich dabei um ein selbstregulierendes elektrisches Heizkabel, welches die Wärmequelle für den Wärmetracertest darstellte. Selbstregulierend bedeutet in diesem Fall, dass der leitende Kern im Zentrum des Heizkabels seinen Widerstand und damit seine Leistungsabgabe in Abhängigkeit von der Temperatur lokal ändern kann. Die Nutzung des selbstregulierenden Heizkabels sollte es ermöglichen, das lokale Fließfeld des Grundwasserleiters geringstmöglich zu stören und dabei gleichzeitig gleiche Heizendtemperaturen für jede Tiefe bereitzustellen. Geheizt wurde von 10,5 bis 15,5 muGOK.

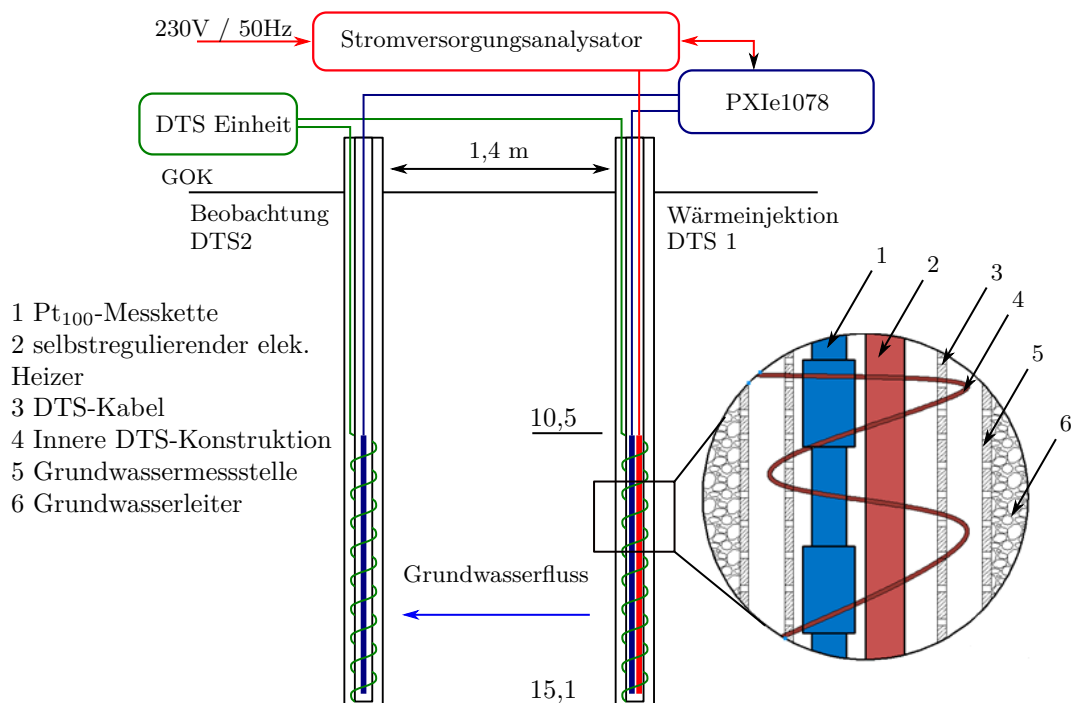


Abbildung 4.1.: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung des Wärmetracerversuches. Nicht maßstabsgetreu, verändert nach Seibertz et al. (2016), Originalabbildung von Andrei Chirila.

Der Versuch begann mit einer dreitägigen Aufzeichnung der Nulllinie. Die Nulllinie wird zur Berechnung der Temperaturänderungen benötigt und wurde hier auch genutzt, um eine Offsetkorrektur der DTS-Daten mit den Pt₁₀₀-Daten durchzuführen. Im An-

schluss wurde eine 4,5 d Heizperiode angeschlossen. Das anschließende Abkühlen des Grundwasserleiters wurde über einen Zeitraum von zwei Wochen beobachtet.

4.2.2. Aufbereitung und Auswertung der Temperaturdaten

Aufgrund eines Faserrisses im Beobachtungsbrunnen, der bei laufendem Betrieb nicht behoben werden konnte (die Pt₁₀₀-Messkette hätte mitgegeben werden müssen), kam es zu totalem Datenverlust für die Beobachtungsmessstelle DTS2. Aus diesem Grund werden hier nur die DTS-Temperaturdaten aus DTS1 vorgestellt. Wegen der guten räumlichen Auflösung von 0,1 m wurden ausschließlich die DTS-Daten für eine Temperaturabklingauswertung genutzt. Die Pt₁₀₀-Daten wurden für die Kalibrierung und einen Vergleich der Temperaturen am Ende der Heizperiode genutzt sowie für die Beobachtung des Wärmetransportes zwischen DTS1 und DTS2. Das Ende der Heizperiode ist der Anfang des Abkühlversuches, weshalb im Folgenden von Anfangstemperaturen oder Anfangssignal gesprochen wird.

Die DTS-Daten werden als Traces von dem Gerät gespeichert. Ein Trace enthält dabei alle Temperaturen und Dämpfungswerte für jeden Lichtwellenleitermeter, der gemessen wurde. Ein Trace entspricht dabei einem Zeitschritt. Unterschiedliche Kanäle werden in single-ended Konfiguration in unterschiedlichen Traces gespeichert. Die Dämpfung ist hierbei der Signalverlust, der durch Diffusion des Lasers aus dem Lichtwellenleiter auftritt und der in dB/km beschrieben wird. Die Traces werden mittels eines Bash-Skripts zusammengefasst und um Informationen zur Durchschnittstemperatur der Nulllinie sowie den tatsächlichen Tiefenmetern ergänzt. Dies ist notwendig, um die weitere Datenaufbereitung durchführen zu können. In einem zweiten Schritt wird die Dämpfung auf mögliche Sprünge (step-losses) hin untersucht, um potentielle Temperaturmessfehler an Spleißen oder des Lichtwellenleiters zu finden.

Aus den letzten 300 Werten der Nullmessung wurden Durchschnittstemperaturen sowie die Standardabweichung der Temperaturmessung ermittelt. Für DTS1 wurden dabei Standardabweichungen von 0,2 bis 0,5 K ermittelt. Für DTS2 liegen die Werte mit 0,5 bis 1,2 K deutlich höher. Die beiden Pt₁₀₀-Messketten zeigten nur sehr geringe Abweichungen von 0,05 K. Es wird davon ausgegangen, dass der Unterschied zwischen den DTS-Konstruktionen sowie in einer DTS-Konstruktion auf das enge Wickeln zurückzuführen ist, das zur Erreichung der Auflösung von 0,1 m gewählt wurde.

Die Temperaturdurchschnittswerte, die sich aus den 300 Messwerten der Nullmessung errechnen (für DTS und Pt₁₀₀), wurden anschließend für eine Offsetkorrektur der DTS-Messwerte genutzt. Zu diesem Zweck wurden die gemittelten Pt₁₀₀-Messwerte für

jede Kette linear interpoliert und somit eine Temperaturverteilung mit gleicher räumlicher Auflösung wie die DTS-Daten erzeugt. Anschließend wurden die DTS-Werte von den Pt₁₀₀-Werten subtrahiert und die Differenz zur Offsetkorrektur der DTS-Werte genutzt. Als Grundannahme, damit dieser Ansatz genutzt werden kann, wurde davon ausgegangen, dass das Gerät keine Offsetdrift besitzt. Aus den Dämpfungsdaten konnte ebenfalls ermittelt werden, dass auftretende Temperaturdrift nicht aus Veränderungen der Dämpfung abzuleiten sind. Dabei wurde die Offsetkorrektur ausschließlich durchgeführt, um die DTS-Temperaturen mit den Pt₁₀₀-Temperaturen vergleichen zu können. Für die folgende Normalisierung sind die Temperaturänderungen ohne Kenntnis über die tatsächliche absolute Temperatur ausreichend.

Die Temperaturabklinganalyse wurde für die Normalisierung für jedes Tiefenintervall von DTS1 (Aufheizmessstelle) durchgeführt, welches für das Anfangssignal eine Temperaturänderung von $\Delta T \geq 15$ K aufwies. Entsprechende Traces wurden nach Glg. 4.1 normalisiert. T_{norm} ist dabei die normalisierte Temperatur, T_{max} die Maximal- bzw. Anfangstemperatur und T die gemessene Temperatur zu einer beliebigen Zeit.

$$T_{norm} = \frac{T}{T_{max}} \quad (4.1)$$

Anhand der normalisierten Temperaturen wurde dann die Tauglichkeit der Temperaturabklingverhaltensverteilungen zur qualitativen Charakterisierung des relativen Untergrundwärmespeichervermögens untersucht. Grundannahme dieses Ansatzes ist dabei, dass in permeablen, gesättigten Schichten das Abklingen des Temperatursignals von Advektion dominiert ist. Um die Zonen unterschiedlicher Advektion voneinander unterscheiden zu können, wurden die normalisierten Daten auf die Zeitpunkte, an denen 20, 50 und 66 % des Signals während des Abkühlens abgeklungen sind, eingeschränkt.

4.3. Ergebnisse

Eine Übersicht über alle mit DTS gemessenen Temperaturen während des Versuches ist in Abb. 4.2, untergliedert in die drei Hauptphasen Nulllinie, Heizvorgang und Abkühlen, dargestellt.

Die Temperaturmessungen der Basislinie zeigten zunehmende Temperaturen mit der Tiefe. Die Temperaturänderungen sind jedoch so klein, dass sie in der Übersichtsabbildung 4.2 nicht erkennbar sind. Für die DTS-Messung bedeutet das eine Temperaturzunahme von 11,99 °C auf 12,4 °C von 10,6 muGOK bis 15,1 muGOK. Die Pt₁₀₀-Messkette

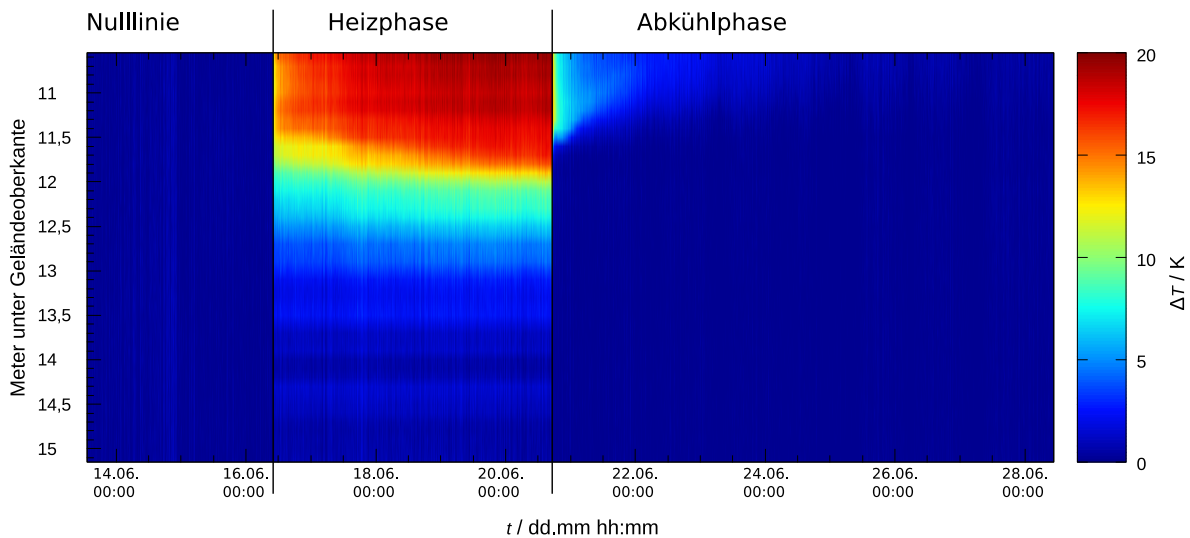


Abbildung 4.2.: Verlauf der Temperaturänderungen während des Wärmetracertests. Aufgezeichnet wurden die Nulllinie, der Aufheizvorgang und im Anschluss das Abkühlen.

zeigte eine Zunahme von $11,9^{\circ}\text{C}$ auf $12,39^{\circ}\text{C}$ von $10,5\text{ muGOK}$ bis 15 muGOK . Alle diese Werte entstammen der Mittlung der Nullmessungstemperaturen.

Während des Heizvorgangs betrug die maximale Temperaturzunahme in DTS1 für die DTS-Messung $19,83\text{ K}$ in einer Tiefe von $10,6\text{ muGOK}$, aufgezeichnet nach 103 h des Heizens. Für die Pt_{100} -Messkette lag das zeitgleiche Temperaturmaximum von $23,22\text{ K}$ bei $10,85\text{ muGOK}$. Mit zunehmender Tiefe sanken die maximal erreichten Temperaturen in DTS1, sodass in einer Tiefe von 15 muGOK nur noch eine Temperaturänderung von $0,22\text{ K}$ für DTS und $1,32\text{ K}$ für die Pt_{100} -Messkette gemessen wurden. Der vollständige Maximaltemperaturverlauf für die beiden Sensoren über die Tiefe ist in Abb. 4.3a dargestellt. Beide Sensoren bilden einen ähnlichen Temperaturverlauf über die Tiefe ab, es bestehen jedoch Temperaturunterschiede von bis zu 6 K zwischen den beiden Sensoren.

Das Abkühlen des Untergrundes wurde im direkten Anschluss an das Heizen über einen Zeitraum von $305,5\text{ h}$ beobachtet. Die Messung wurde nur kurzzeitig, für wenige Minuten, aufgrund von Wartungsarbeiten unterbrochen. Wegen des erwähnten DTS-Ausfalls in DTS2 und den dort aufgezeichneten niedrigen Temperaturen durch die zweite Pt_{100} -Messkette (ΔT von $1,05\text{ K}$, $0,61\text{ K}$ und $0,32\text{ K}$ für die Tiefen 10 , $10,5$ und 11 muGOK), wird der Fokus auf die Temperaturdaten aus DTS1 gelegt.

Die ermittelten, in Abb. 4.3b gezeigten, Abklingzeiten sind in Minuten relativ zum Beginn des Abkühlens angegeben. Dabei wurden für D20 (20 % des Anfangssignal abgeklungen) Zeiten zwischen 4 und 14 min ermittelt, für D50 und D66 jeweils 7 bis 91 min

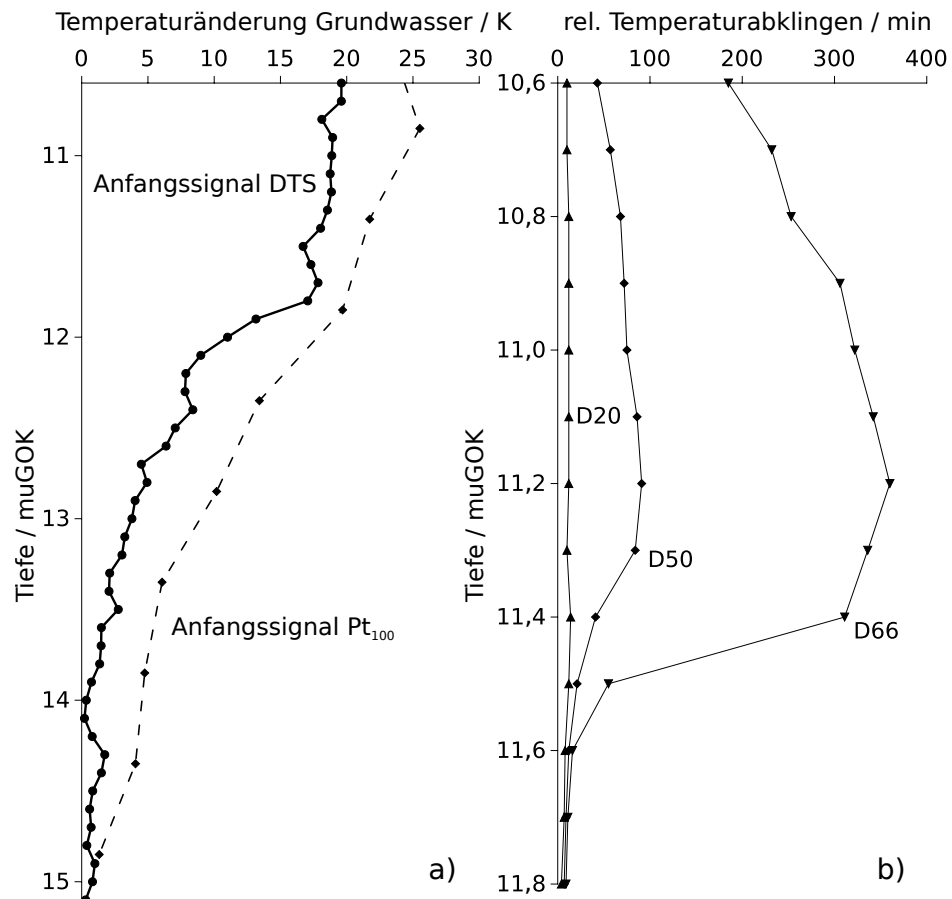


Abbildung 4.3.: Anfangstemperaturen (entsprechen der Maximaltemperatur nach dem Heizen) und relative Temperaturabklingzeiten: a): Anfangssignal für DTS und Pt₁₀₀-Messkette aus der Wärmeintragsmessstelle DTS1. b): Temperaturabklingzeit-Isolinien für Abklingen des Ausgangssignals auf 20, 50 und 66 %. Es sind nur die Tiefen gezeigt, in denen die ursprüngliche Auslenkung mindestens 15 K betrug.

und 9 bis 360 min. Die längeren Abklingdauern lagen dabei im Tiefenintervall von 10,9 bis 11,4 muGOK. Die kürzesten Abklingzeiten wurden für Tiefen größer 11,6 muGOK aufgezeichnet. Aufgrund der nicht vergleichbaren Anfangstemperaturen für größere Tiefen werden diese Tiefen hier nicht betrachtet. Die geringe Temperatursauslenkung führte dabei zu Abklingzeiten, die zeitlich nicht mehr durch das DTS-Gerät getrennt erfasst werden können. Aus diesem Grund sind in Abb. 4.3 nur die Abklingzeiten im Tiefenintervall 10,6 bis 11,8 muGOK gezeigt.

Die durchgeführten Direct-Push-Messungen im Bereich der ausgewerteten Temperaturabklingzeiten sind hierbei die folgenden: Die durch HPT gemessene, relative hydraulische Durchlässigkeit lag im Bereich von 0,2 bis 4,8 mL min⁻¹ kPa⁻¹. Das Verhältnis von

Mantelreibung und Spitzendruck, R_f , abgeleitet aus der CPT-Messung, zeigte Werte zwischen 0,3 und 1,5 (10,9 – 11,6 muGOK). Der WCP zeigte Wassergehalte von 22% – 25% im Bereich der Abklingzeituntersuchung. Die elektrische Leitfähigkeit reichte von 15 bis 25 mS m⁻¹. Die Wärmeleitfähigkeit der durch die Liner gewonnenen Proben hatte ein Minimum bei 1,4 W m⁻¹ K⁻¹, zeigte im Durchschnitt jedoch Werte von 2 bis 2,2 W m⁻¹ K⁻¹. Dies ist vergleichbar mit VDI-Werten (VDI, 2010) für gesättigten Sand und Kies.

Die Liner wurden nicht nur zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten genutzt, sondern auch zur besseren Ansprache der anstehenden Sedimente. Dies erlaubte die Unterteilung des untersuchten Bereiches des Grundwasserleiters in zwei Bereiche. Die erste Zone des Grundwasserleiters besteht überwiegend aus Sand und Kies, welcher mit zunehmender Tiefe schluffiger wird, während die zweite Zone fast nur aus Feinkies besteht. Zwischen den beiden Zonen wurde eine geringmächtige Toneinschaltung gefunden. Eine zweite Serie von Linern konnte diese Toneinschaltung jedoch nicht erneut aufzeigen.

4.3.1. Feldversuch an den Erdwärmesonden

Die Beobachtung des Temperaturabklingens der EWS im Anschluss an die in Kapitel 3 vorgestellten TRT lieferte die im folgenden beschriebenen Ergebnisse. Diese Ergebnisse sind dabei nicht Bestandteil von Seibertz et al. (2016).

Die Beobachtung des Abkühlens von EUS im direkten Anschluss an den TRT zeigte auf, dass die Abkühlungsgeschwindigkeit am langsamsten im Bereich von 0 bis 6 muGOK war, wobei keine deutlichen Unterschiede zwischen Vorlauf und Rücklauf gemessen wurden (vgl. Abb. 4.4 a).

Die Temperaturverteilung in DUS1 während der Abkühlung ließ sich grob in zwei Bereiche unterteilen. Der Bereich von 1,5 bis 10 muGOK wies relativ längere Abkühlzeiten auf, der darunter liegende Bereich, der Aquifer, kühlte deutlich schneller aus. Im Bereich von 17 – 21 muGOK zeigten sowohl Vor- als auch Rücklauf längere Temperaturspeicherung (vgl. Abb. 4.4 b)

KOAX kühlte zwischen 2 und 10 muGOK langsamer aus als in den darunter liegenden Bereichen der EWS. Für den aufwärts gerichteten LWL erfolgte eine schnellere Abkühlung im Bereich von 9 bis 13 muGOK, die für den abwärts gerichteten LWL nicht ermittelt wurde. Mit zunehmender Tiefe stieg die Geschwindigkeit des Abkühlens insgesamt an (vgl. Abb. 4.4 c).

Für DUS2 wurden alle Stränge, die ein Signal aufwiesen, untersucht. In den Messungen zeigten sich zwei Bereiche mit langsamer Abkühlung (5 und 15 muGOK) und zwei

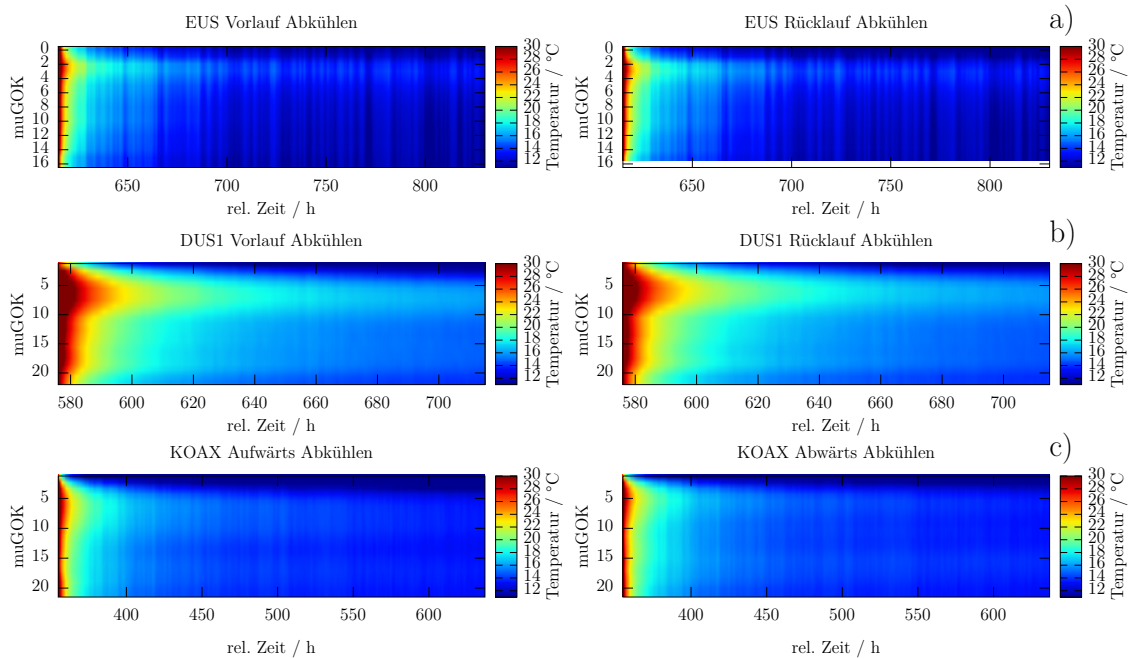


Abbildung 4.4.: Ergebnisdarstellung des beobachteten Abkühlens der EWS: a) EUS (Daten aus Zyklus 1); b) DUS1 (Daten aus Zyklus 2); c) KOAX (Daten aus Zyklus 2) im direkten Anschluss an die in Kapitel 3 vorgestellten TRT. Die Zeit ist angegeben in Stunden relativ zum Messbeginn.

Bereiche mit schnellerer Abkühlung (um 10 und um 20 muGOK). Diese Verteilung ist für alle vier Stränge ähnlich und zeigt nur geringe Abweichung in den ermittelten Tiefen (vgl. Abb. 4.5).

D50-Abklingzeiten der EWS

Die ermittelten D50-Abklingzeiten zeigten die in Abb. 4.6 dargestellten Verteilungen. Dabei lagen die D50-Abklingzeiten für EUS zwischen 4 und 16 h und die für DUS1 zwischen 10 und 28 h. DUS2 zeigte mit D50-Zeiten zwischen 15 und 40 h die größte Spannbreite an gemessenen Abklingzeiten. Für KOAX lagen die D50-Zeiten zwischen 5 und 25 h. Die höchsten D50-Zeiten aller Sonden waren im Tiefenintervall von 1,5 bis 10 muGOK angesiedelt.

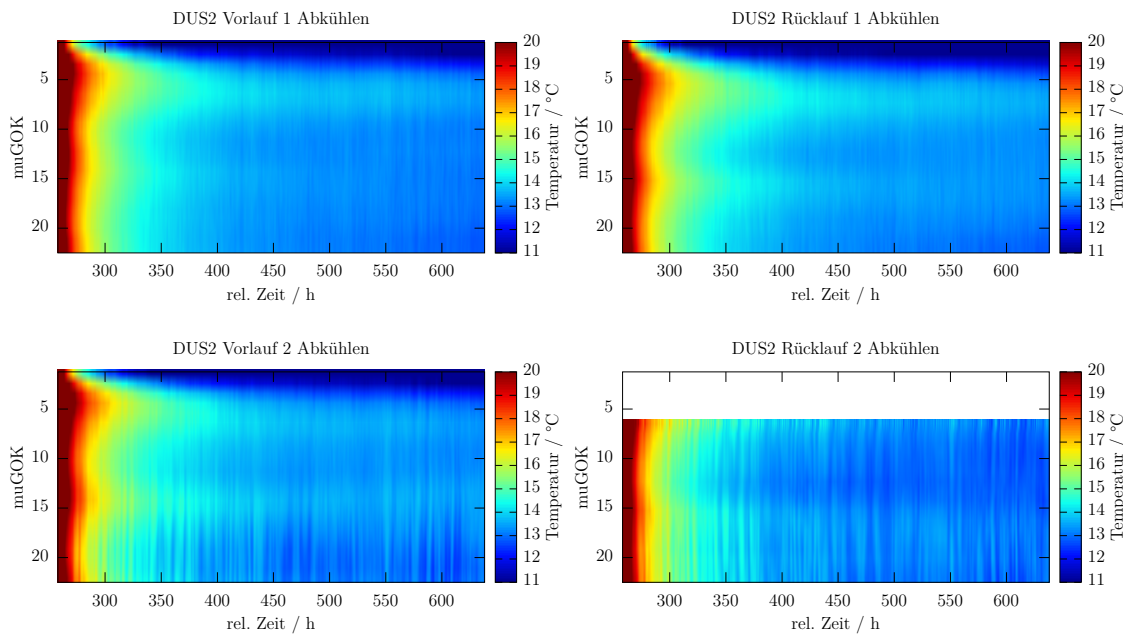


Abbildung 4.5.: Ergebnisse der DTS-Messungen in DUS2 (Daten aus Zyklus 2). Darstellung der Temperaturverteilungen aller vier Stränge während der Abkühlung im Anschluss an den TRT. Weiße Bereiche kennzeichnen Bereiche, die von Datenverlust betroffen sind. Die Zeit ist angegeben in Stunden relativ zum Messbeginn.

4.4. Diskussion: Relatives Untergrundwärmespeichervermögen

Die durch DTS gesammelten Temperaturdaten zeigen deutlich, dass der ursprüngliche Ansatz, ein die Temperatur selbstregulierendes Heizkabel als Quelle vergleichbarer Starttemperaturen in einem Grundwasserleiter zu nutzen, nicht erfolgreich war. Aus Abb. 4.3 wird deutlich, dass die oberen Meter des Grundwasserleiters, von 10,6 bis 11,8 m, deutlich mehr geheizt wurden als die tiefer liegenden Bereiche. Es wird angenommen, dass dies aus dem Zusammenspiel von selbstregulierendem Heizkabel sowie der großen Wärmekapazität von Wasser resultiert. Dabei sorgt die Wärmekapazität des Wassers dafür, dass die Eingangsleistung des Heizers von 480 W bereits in den oberen Metern des Kabels abgegeben werden kann, ohne die Temperatur stark zu erhöhen. Somit steht deutlich weniger Leistung für das Heizen der tieferen Bereiche des Grundwasserleiters zur Verfügung. Die ungleichmäßige Aufheizung wird auch an anderen Stellen in der Literatur untersucht, so z.B. bei Liu et al. (2013) für die Untersuchung unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeiten. Der plötzliche Leistungseintrag von 480 W erklärt den abrupten Temperaturanstieg in der Grundwassermessstelle zu Heizbeginn, welche nach Abzug der

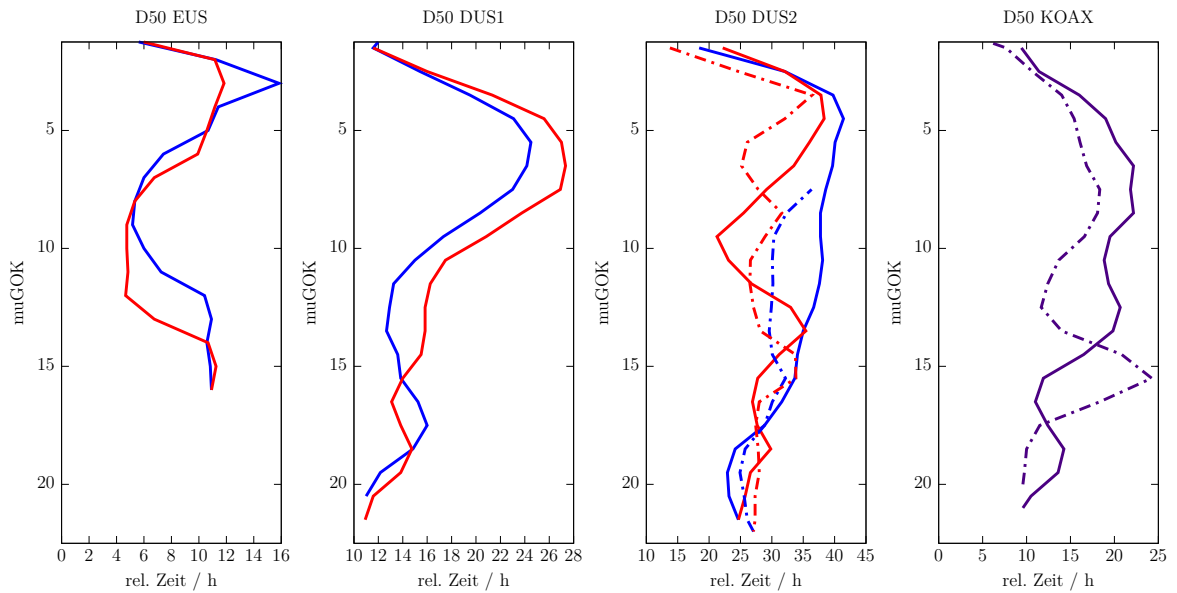


Abbildung 4.6.: Ergebnisse der Abklingzeitenmessung. Rot entspricht dem Vorlauf, blau entspricht dem Rücklauf, gestrichelte Linien entsprechen dem zweiten Umlauf von DUS2. Für KOAX gibt es keine getrennte Messung von Vor- und Rücklauf, hier sind nur die Daten des Außenleiters gezeigt (gestrichelt: aufwärts). Die Zeit ist angegeben in Stunden relativ zum Abkühlbeginn.

Volumina von DTS-Konstruktion, Heizkabel und Pt_{100} -Messkette lediglich ein Volumen von 5,8 L freiem Wasser enthält. Auf der anderen Seite zeigen die Erstankunftszeiten in der Beobachtungsmessstelle (zweite Pt_{100} -Messkette), dass die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers im Bereich von 1 m d^{-1} liegt, was nach Abschaltung des Heizers zu der beobachteten schnellen Abkühlung innerhalb der Messstelle führte.

Für die in Abb. 4.3a gezeigten Unterschiede zwischen dem Anfangssignal für DTS und die Pt_{100} -Messkette wird die räumliche Trennung der beiden Sensoren als Hauptgrund angenommen. Dabei spielt zum einen die Entfernung Sensor–Sensor eine Rolle, zum anderen aber auch die Entfernung Sensor–Heizer. Dabei ist die Pt_{100} -Messkette sehr dicht am Heizer (beide sind zusammen im Zentrum der DTS-Konstruktion), während der Lichtwellenleiter eine Entfernung von 0,025 m zum Heizer hat. Dies führt zu einer bereits stärker fortgeschrittenen Veränderung des Ausgangstemperatursignals, als dies bei der Pt_{100} -Messkette der Fall ist. Hinzu kommt, dass die Messgeometrie unterschiedlich ist. Während die Messung mit der Pt_{100} -Messkette einer Punktmessung an unterschiedlichen Orten entspricht, ausgeführt im Feld durch einen 10 cm langen, 1 cm durchmessenden Zylinder, gilt dies nicht für die kontinuierliche Temperaturmessung durch das DTS-System.

Durch die gewickelte Aufbringung des Lichtwellenleiters auf die innere Konstruktion wird die Durchschnittstemperatur des erfassten Volumens gemessen. Im Kontext von EWS wird dabei davon ausgegangen, dass dies eher die Temperaturen auf der Oberfläche einer Erdwärmesonde abbildet, als dies für die Temperaturen der Pt₁₀₀-Messkette der Fall ist. Das zeigt aber auch, dass Temperaturmessungen, wie die hier vorgestellten, immer kritisch auf die Lage des Sensors hin untersucht werden müssen, vor allem in veränderlichen Umgebungen wie dem Grundwasserstrom.

Bei der Betrachtung der Abklingzeitverteilungen in Abb. 4.3 für die D20 fällt auf, dass diese für alle untersuchten Tiefenintervalle sehr ähnlich sind. Es wird davon ausgegangen, dass es sich hierbei um das Ergebnis einer starken Konvektionszelle zwischen den oberen Bereichen des Grundwasserleiters bis zum Grundwasserspiegel handelt. Durch die Konvektionszelle wird das Wasser hier stark durchmischt und führt somit zu einer vorübergehenden, scheinbar gleich schnellen Abkühlung. Nach dem Zusammenbruch der Konvektionszelle bzw. der Überlagerung durch den horizontalen Grundwasserstrom ist das Rückheizen des Grundwasserleiters die Hauptquelle für die erhöhten Temperaturen in der Grundwassermessstelle.

Auch die Beobachtung der Temperatursignalentwicklung in der Beobachtungsmessstelle DTS2 liefert Hinweise auf eine starke Konvektionszelle in DTS1. Das eintreffende Temperatursignal wurde in DTS2 zwischen den Tiefen 10 und 11 muGOK aufgezeichnet. Das Heizkabel in DTS1 beginnt jedoch erst bei 10,5 muGOK. Damit kann das Signal in DTS2 für 10 muGOK nicht direkt durch Heizen in dem entsprechenden Tiefenintervall entstammen, jedoch kann warmes Wasser durch die Konvektionszelle oberhalb des Heizers in den Grundwasserleiter eingespeist worden sein. Dies kann dann zu einem Temperaturanstieg in DTS2 von 0,6 und 0,3 K für die Tiefen 10 und 10,5 muGOK führen.

Die Temperaturdaten in Abb. 4.2 zeigen kurzzeitige Fluktuationen in den Messwerten, wie sie bei Temperaturdrift der DTS-internen Referenzmessung zu erwarten wären. Als Fluktuation wird hierbei die gesamtheitliche Drift aller Temperaturwerte über die Tiefe für mehrere aufeinanderfolgende Messzyklen betrachtet, welche nicht auf eine plötzliche Temperaturänderung des Messobjekts zurückgeführt werden kann. Sie wird dem Sensor zugeschrieben, weil ausgeschlossen werden kann, dass über alle Tiefen eine zeit- und amplitudengleiche Auslenkung stattfindet. Trotzdem wird davon ausgegangen, dass die Fluktuation tatsächlich auf Temperaturschwankungen der Umgebung zurückzuführen ist. In diesem Fall kann dies zu einer Veränderung der optischen Eigenschaften des Lichtwellenleiters führen, aber auch die interne Referenzmessung des DTS-Gerätes stö-

ren. Dies führt dann zur unregelmäßigen, kurzzeitigen Temperaturdrift, einer Offsetdrift. Aufgrund der zeitlichen Beschränkung sowie der im Vergleich zur erreichten Auflösung und maximalen Amplitude des Temperatursignals geringen Amplituden der Drift von höchstens 0,8 K, wurde für diesen Versuch von einer weiteren Korrektur abgesehen. Diese Entscheidung wird auch durch die Wahl der ausschließlichen Nutzung von Temperaturänderungen gegenüber absoluten Temperaturen beeinflusst. Allerdings ist aus den Daten aus Kapitel 3 bekannt, dass diese Drift in den Daten geglättet werden kann, wenn ein Kalibrieransatz genutzt wird, der einen Kalibrierwert für jedes DTS-Datum bereitstellt.

Für die weitere Auswertung und den Vergleich mit den Direct-Push-Daten wurde die D50-Abklingzeit gewählt. Diese entspricht der Halbwertszeit des Temperatursignals im Untergrund und wurde gewählt, weil angenommen wurde, dass sie nicht mehr durch die Konvektionszelle beeinflusst ist und zeitgleich noch ein scharfes Signal abbilden kann. Der Vergleich zeigte sehr gute Übereinstimmung zwischen den Interpretationen der DP- und der D50-Daten und erlaubte entsprechend die weiterführende Interpretation der DP-Daten.

Im Vergleich der HPT-Daten mit D50-Verteilungen zeigt sich das Potential der relativen hydraulischen Leitfähigkeit, das relative Untergrundwärmespeichervermögen stark zu beeinflussen. Es wird aufgezeigt, wie D50 und damit das relative Wärmespeicherpotential von den Untergrundparametern abhängt. Dabei ist bemerkenswert, dass der gemessene Bereich an relativen hydraulischen Leitfähigkeiten im Tiefenintervall 10,6 bis 11,8 μGOK klein ist gegenüber entsprechenden Variationen über die gesamte Tiefe, die zwischen 0 und $55 \text{ mL min}^{-1} \text{ kPa}$ liegen. Beginnend ab 11,4 m nimmt die relative hydraulische Leitfähigkeit zu und führt zu deutlich kürzeren D50-Zeiten (vgl. Abb. 4.7). Das passt zu der Beobachtung von Liu et al. (2013), dass mit Zunahme des Grundwasserflusses das aktive Heizen in einer Messstelle zu niedrigeren Maximaltemperaturen führt und somit durch schnelleres Abkühlen gekennzeichnet sein muss. In der Gegenüberstellung im Streudiagramm (s. Abb. 4.8) zeigt der logarithmische Fit einen Korrelationskoeffizienten von 0,65.

Der Vergleich von D50 mit dem CPT-Reibungsverhältnis und der elektrischen Leitfähigkeit unterstützt die getroffenen Annahmen durch ähnliches Verhalten weiter. Die Variationen im CPT-Reibungsverhältnis über das untersuchte Intervall (10,6 – 11,8 μGOK , gleiches gilt für die EC-Log-Daten) sind jedoch ebenfalls klein. Für CPT deuten die Reibungsverhältnisse auf nicht-plastisches Untergrundverhalten in diesem Intervall hin (z.B. Olsen, 1988). Dennoch stimmen die gemessenen, kleinen Variationen gut mit Veränderungen in D50 überein, wobei längere D50-Zeiten gut mit größeren Reibungsverhältnis-

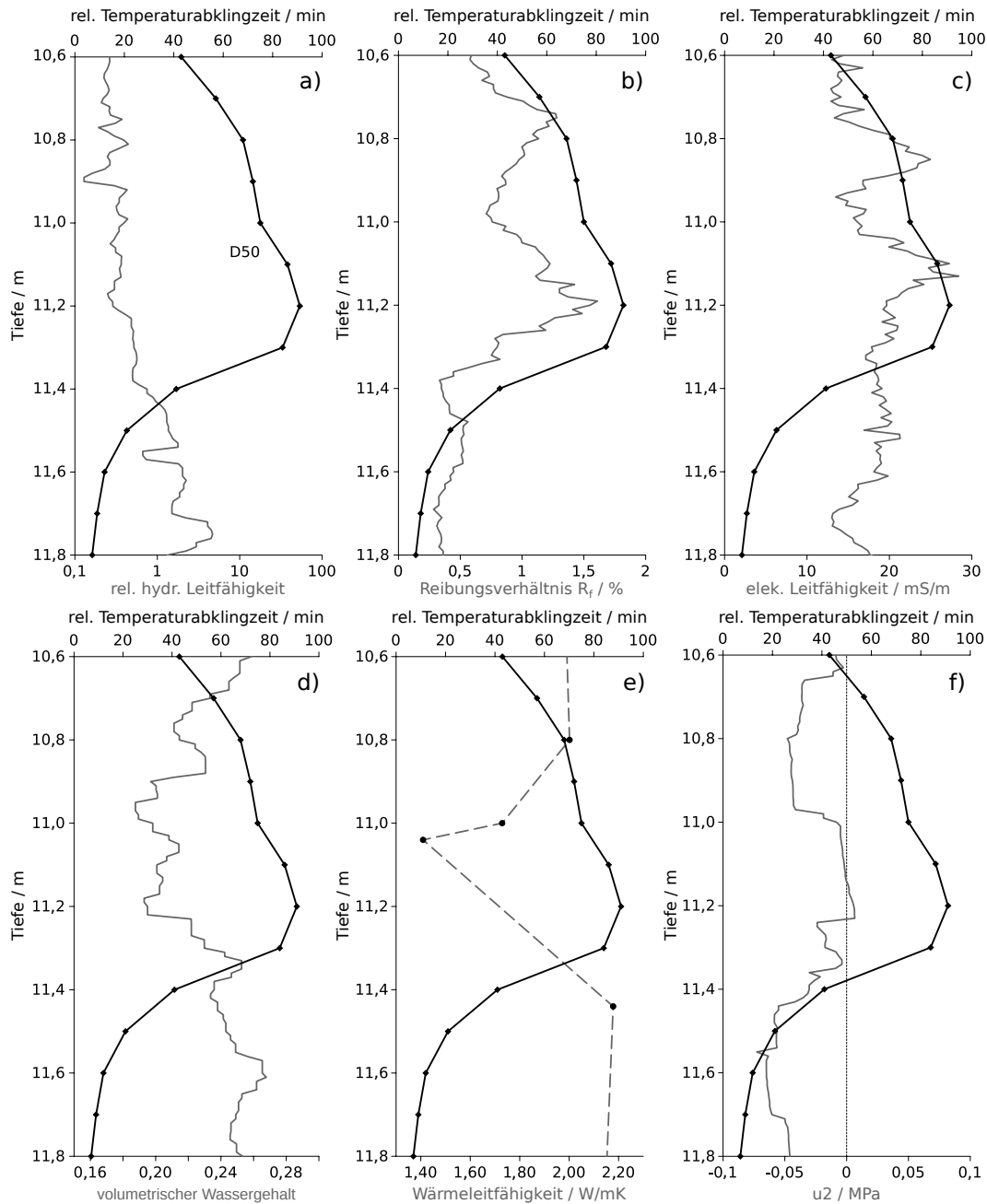


Abbildung 4.7.: Vergleich der D50-Daten mit Labor- und Direct-Push-Daten: a) relative hydraulische Leitfähigkeit; b) CPT-Reibungsverhältnis (R_f); c) elektrische Leitfähigkeit; d) volumetrischer Wassergehalt; e) Labormesswerte der Wärmeleitfähigkeit der Bodenproben; f) dynamischer Porenwasserdruck (u_2).

sen korrelieren ($R = 0,85$, vgl. Abb. 4.7b und 4.8b). Dies ist plausibel, wenn man bedenkt, dass eine Zunahme an Schluff- und Tonanteilen eine Reduzierung der hydraulischen Leit-

fähigkeit nach sich ziehen kann (z.B. Hölting und Coldewey, 2013). Trotzdem muss für diesen Fall beachtet werden, dass die Variationen in R_f klein sind, was dementsprechend auch für die Zunahme an Schluff- und Tonanteilen gilt.

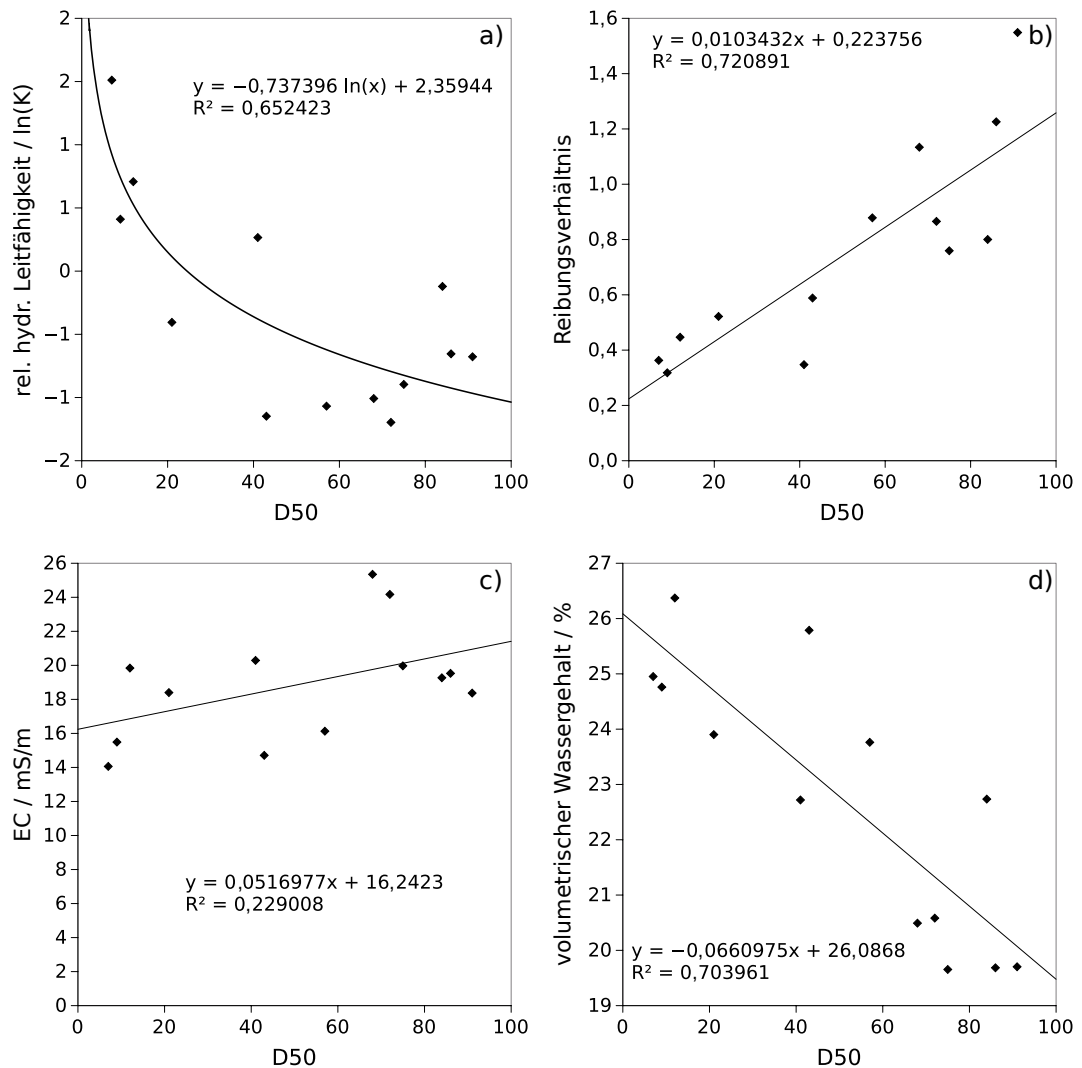


Abbildung 4.8.: Streudiagramme, die die D50-Temperaturabklingzeit gegen Direct-Push auftragen: a) relative hydraulische Leitfähigkeit; b) CPT-Reibungsverhältnis; c) elektrische Leitfähigkeit; d) volumetrischer Wassergehalt.

Ähnliche Beobachtungen wurden für die elektrische Leitfähigkeit gemacht. Auch hier sind die durch das EC-Log ermittelten Variationen im Signal sehr klein. Dies deutet nicht auf das Vorliegen unterschiedlicher geologischer Schichten hin. Im untersuchten Tiefenintervall liegen die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten im Bereich von Sand (Schulmeister et al., 2003). Die gemessenen Variationen liegen dabei in ähnlichen Tiefen

wie die CPT-Daten. Dennoch zeigen die elektrischen Leitfähigkeiten nicht die aus Abb. 4.7c zu erwartende gute Korrelation (vgl. Abb. 4.8c), wie es für das Reibungsverhältnis der Fall war. Als Grund hierfür wird die schwächere Sensitivität des EC-Logs in nicht salinaren Gebieten gegenüber Schluff angenommen. Obwohl auch hier die Zunahme von Schluffanteilen eine Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit nach sich ziehen würde und damit zu einer verbesserten Untergrundwärmespeicherfähigkeit führen kann, kann dies mit EC-Log nicht mit Sicherheit festgestellt werden (Schulmeister et al., 2003).

Der Vergleich der Verteilungen von volumetrischem Wassergehalt und thermischer Leitfähigkeit mit den D50-Werten verhält sich in der Zunahme des relativen thermischen Speicherpotentials gegenläufig zu den Ergebnissen von CPT und EC-Log. Eine Reduktion im volumetrischen Wassergehalt sowie der Wärmeleitfähigkeit führt hier zu einer Zunahme des thermischen Speicherpotentials (vgl. Abb. 4.7a und e). Dabei weist die Korrelation von volumetrischem Wassergehalt und D50 einen Korrelationskoeffizienten von 0,84 auf (vgl. Abb. 4.8). Dies erscheint widersprüchlich, wenn man annimmt, dass das relative Wärmespeichervermögen mit zunehmendem Wassergehalt, aufgrund der großen Wärmekapazität von Wasser, zunehmen sollte. Eine mögliche Erklärung ist hier, dass die Abnahme des Porenraums in dieser geologischen Umgebung zum Beispiel durch Schluff ausgelöst wird. Damit sinkt auch die hydraulische Leitfähigkeit, aufgezeigt durch HPT, und reduziert somit den advektiven Wärmeabtransport. Dies führt zu einer Steigerung des relativen Wärmespeicherpotentials, hängt für diese Untersuchung aber nur indirekt mit dem eigentlichen Wassergehalt zusammen.

Interessanterweise besteht ein gewisser Widerspruch zwischen den HPT- und den CPT-Daten. Aufgrund der niedrigen gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten während des HPT würde man auf eine Grundwasser stauende Schicht schließen. Die CPT- und EC-Log-Daten deuten jedoch auf einen sandigen Untergrund hin, welcher weder plastisch noch tonig ist (10,6 bis 11,4 μGOK). Eine mögliche Erklärung für diesen Widerspruch liefern die dynamischen Porendrücke. Diese sind im untersuchten Intervall überwiegend negativ (vgl. Abb. 4.7f). Solche Porendrücke sind typisch für über-konsolidierte Sedimente, wobei die Verdichtung bei höherer Auflast als der gegenwärtigen erfolgte (z.B. Vienken et al., 2012) oder dilatantes Material vorliegt (z.B. Payne et al., 2008). Aufgrund mangelnden Nachweises von Ton im Untergrund, weder durch CPT noch durch EC-Log, wird darum davon ausgegangen, dass die niedrigen relativen hydraulischen Leitfähigkeiten aus Kompaktion resultieren. Das dilatante Verhalten von Sand und Schluff führt dann zu negativen Porenwasserdrücken während der CPT-Sondierung. Zusätzlich ist es möglich, dass die Kompaktion sowie die angetroffene Heterogenität des Untergrundes

(beobachtet an den Sedimentproben) den Porenraum und damit den gemessenen volumetrischen Wassergehalt reduzieren (z.B. Okazaki et al., 2014; Hölting und Coldewey, 2013).

Trotzdem kann dies nicht abschließend erklären, warum die Temperatursignalübertragung zwischen DTS1 und DTS2 überwiegend im untersuchten Tiefenintervall (10,6 bis 11,8 muGOK) vonstattenging. Die Temperatursignalübertragung zwischen den beiden, 1,4 m voneinander entfernten, Messstellen erfolgte dabei in nur 1,5 d. Ein Vergleich mit einer analytischen Lösung zum Temperatursignaltransport unter der Annahme der ausschließlichen Wärmeleitung (z.B. Kolditz et al., 2012), abgeleitet aus den geringen relativen hydraulischen Leitfähigkeiten des HPT, zeigt, dass der Wärmetransport entgegen der Annahme aus dem HPT überwiegend advektiv erfolgen muss. Ein Signaltransport ausschließlich über Wärmeleitung wäre bei einer Auslenkung der Temperatur in DTS1 von 25 °C nicht möglich gewesen.

Die Vergleiche von D50 und DP-Daten haben hierbei gezeigt, dass bereits kleinere Änderungen in Sedimentzusammensetzung und Kompaktion, welche schwer durch herkömmliches Bohren detektiert werden können, das relative Wärmespeichervermögen des Untergrundes beeinflussen können. Damit konnte gezeigt werden, dass eine alleinige Ansprache von Bohrgut als Explorationswerkzeug für Untergrundwärmespeichervermögen keine direkte Interpretation des potentiellen Wärmespeichervermögens im Untergrund zulässt (vgl. Abb. 2.3, 4.7 und 4.8), da der Bohrvorgang zu einer starken Störung des Gefüges führt.

Die Versuche haben auch gezeigt, wie wichtig die Wahl einer geeigneten Wärmequelle für entsprechende Untersuchungen ist. Die Nutzung von selbstregulierenden Heizquellen hat sich in diesem Versuch nicht bewährt, von einer Nutzung entsprechender Heizkabel für vergleichbare Versuche wird dementsprechend abgeraten. Allerdings ist der beschriebene Versuch auch nicht auf die Durchführung in Grundwasserleitern beschränkt, sondern kann mit entsprechender Anpassung auch in der ungesättigten Zone durchgeführt werden. Vor allem der Ansatz der Temperaturabklingbeobachtung in einer Untergrundbeobachtungsmessstelle kann ohne größere Einschränkungen in ungesättigten oder geringleitenden Grundwasserleitern genutzt werden. Einzige Vorgabe ist hierbei die Bereitstellung einer geeigneten Heizquelle. Unter der Voraussetzung, dass die Zirkulation der freien Wassersäule in der Messstelle eingeschränkt werden kann, kann der Test auch als TRT fungieren. Die hier angestrebte Auflösung ist dabei an die Bedürfnisse anzupassen und z.B. an der Länge der Messstelle zu orientieren. Wie entsprechende Datensätze im Anschluss an einen TRT aussehen, wird im nächsten Abschnitt gezeigt. Der Vorteil

bei der Durchführung solcher Versuche an EWS ist, dass in der Regel die ungesättigte Zone mit erfasst werden kann.

Übertragung auf EWS

Beobachtungen, die während des Abkühlens der EWS im Anschluss an die TRT gemacht wurden, ähneln sowohl der Aufheizperiode aus Kapitel 3 als auch den Ergebnissen aus dem vorhergehenden Diskussionsabschnitt: a) Es wurden Abkühlungszeitmaxima detektiert, welche für unterschiedliche LWL einer EWS unterschiedlich sind; b) die Abklingzeiten der drei gemeinsam durchgeführten Versuche in DUS1, 2 und KOAX sind vergleichbar, weisen zum Teil aber deutliche Unterschiede in der Tiefenlage der Maxima/Minima auf.

Die auffälligste Gemeinsamkeit der vier Sonden ist, dass in der ungesättigten Zone, von 1,5 bis 10 muGOK, über alle Sonden verteilt durchschnittlich die längsten Abklingzeiten pro LWL auftreten. Dabei kommt es in DUS1/2 und KOAX ab 10 muGOK (ungefähre durchschnittliche Lage des Grundwasserleiters) um bis zu 10 h verringerten Abklingzeiten (vgl. Abb. 4.6). Das Abkühlen der EWS und des umgebenden Untergrundes läuft im Bereich des Grundwassers also schneller ab und bestätigt damit die Ergebnisse zur Erfassung des relativen Wärmespeichervermögens und auch die Ergebnisse von (z.B.) Liu et al. (2013). Einzig EUS verhält sich nicht entsprechend. Hier liegt das Minimum der Abklingzeiten weder in Sondenfußnähe noch ausschließlich im Bereich des Grundwasserleiters, sondern bildet sich bereits ab 6 muGOK aus (vgl. Abb. 4.6). Dem Kapitel 5 vorgreifend entspricht das dem aus den Hydratationstemperaturen abgeleiteten Bereich für den Übergang zwischen erstem und zweitem Verpresszyklus. Als Erklärungsansatz kann hierbei die Verklappung von Bohrklein in die Hinterfüllung herangezogen werden. In diesem Fall würde sich die Erklärung aus der erhöhten effektiven Wärmeleitfähigkeit ergeben, die durch die Einbringung des Kieses in den Zement vonstatten geht. Dabei wird hier von einer Erhöhung ausgegangen, da die Minerale und Gesteine, welche den Kies bilden, höhere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen als der genutzte Zement (Beispiel Sandstein oder Granit: 2,3 bis 2,8 W m⁻¹ K⁻¹).

Auch das unterschiedliche und sehr ungleiche Abkühlen der EWS, gemessen durch die unterschiedlichen eingebrachten LWL für Vor- und Rücklauf, war hier Gegenstand der Untersuchung. Dabei fällt vor allem auf, dass kein Zusammenhang zwischen Vorlauf und Rücklauf und der Abkühlgeschwindigkeit zu bestehen scheint. Besonders deutlich wird dies für die Sonden, in denen der Vorlauf deutlich schneller abkühlt als der Rücklauf, wo-

bei als Beispiele EUS und DUS2 zu nennen sind. Hier werden für gleiche Tiefenintervalle D50-Unterschiede zwischen 6 und 17 h detektiert (vgl. Abb. 4.6).

Dabei ist DUS2 aufgrund der vielen Datenpunkte besonders interessant. Für DUS2 zeigen Vor- und Rücklauf 2 ein qualitativ ähnliches Signal, was nicht für Vor- und Rücklauf 1 gilt. Hier zeigt der Rücklauf 1 ein mit der Tiefe abnehmendes D50-Signal sowie ein überwiegend geringeres D50-Signal für den Vorlauf 1. Nur in Sondenfußnähe kehrt sich dieser Trend um, wobei neben der tatsächlichen Überschneidung der D50-Werte hier mehrere Berührungspunkte vorliegen, bei welchen der Vorlauf gleiche D50-Werte wie der Rücklauf zeigt (vgl. Abb. 4.6, durchgezogen 13 – 14 muGOK). Als Erklärung kann eine Verdrehung des Rohres und damit des LWL in Betracht gezogen werden, wie in Kapitel 3 erläutert. Dabei treten in DUS2 die längsten überhaupt gemessenen Abklingzeiten auf. Interessanterweise geht dies mit niedrigen Maximaltemperaturen sowie der höchsten ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit einher. Ein Erklärungsansatz kann dabei sein, dass aufgrund der guten effektiven Wärmeleitfähigkeit eine größere Menge Wärme an den Untergrund abgegeben werden konnte. Die größere Wärmemenge kann dann zu langen Abklingzeiten führen.

Die chaotisch wirkende D50-Zeitenverteilung mit der Tiefe pro Sonde, die in Abb. 4.6 für jede Sonde aufgezeigt ist, erschwert dabei die Interpretation der Ergebnisse. Zum Teil variiert D50 innerhalb eines Tiefenintervalls um bis zu 10 h. Da aufgrund der Fehlerbetrachtung für die TRT aus Kapitel 3 von einem starken Einfluss der Lageposition des LWL auf das Temperatursignal ausgegangen wird, wird hier ein dem TRT entsprechender Ansatz zur Vereinfachung genutzt. Zu diesem Zweck werden die D50-Werte benachbarter Tiefenintervalle innerhalb jeder Sonde arithmetisch gemittelt. Die erhaltene Verteilung zeigt das mittlere D50 für jede Sonde und ist deutlich einfacher zu interpretieren als die Verteilungen der einzelnen Stränge.

Aus der gemittelten D50-Verteilung können mehrere Zonen des Untergrundes ermittelt werden. Die vadose Zone ist sehr gut abgebildet und wird von allen Sonden mit langen D50 aufgezeigt (vgl. Abb. 4.9 bis 10 muGOK). Zusätzlich dazu wird in allen Sonden ein Anstieg der D50 zwischen 14 und 16 muGOK detektiert, welcher gut mit einer erkundeten geringleitenden Schicht aus der Kernbohrung übereinstimmt. Für die EWS, die tiefer als 16 m reichen, zeigen DUS1 und KOAX zwischen 18 und 20 muGOK einen weiteren Anstieg in D50, der mit einer geringleitenden Schicht aus den HPT-Daten einhergeht (vgl. Abb. 4.9 und Abb. 5.16). Alle anderen Bereiche wurden als Grundwasser führende Schichten identifiziert. Im Vergleich mit den Maximaltemperaturen der eTRT zeigt sich, dass die D50-Verteilung als besser geeignet zu sein scheint, wenn es um die

Beschreibung von Untergrundeinheiten geht. Ausschließlich die vadose Zone wird in beiden Ansätzen vergleichbar abgebildet. Dabei werden Bereiche langer D50 mit Bereichen hoher Temperatur aus dem eTRT verglichen (vgl. Abb. 4.9 & 4.10).

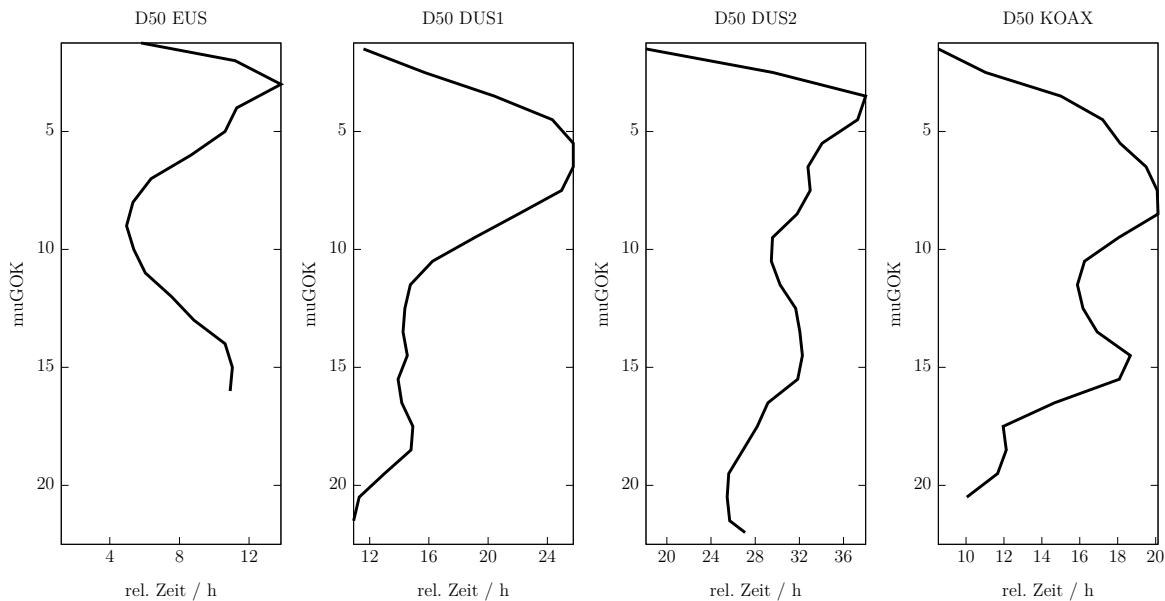


Abbildung 4.9.: Darstellung der Ergebnisse der Abklingzeitenmessung als gemittelte Werte über alle LWL-Stränge einer Sonde.

Den Beobachtungen entsprechend können zusammenfassend folgende Feststellungen gemacht werden: a) Die Ergebnisse aus dem Versuch zur Ermittlung des relativen Wärmespeicherpotentials konnten erfolgreich bestätigt und auf die vadose Zone erweitert werden. Für die vadose Zone ist D50 länger als für Bereiche mit Grundwasserfluss, Vergleichbares gilt in Bereichen reduzierten Grundwasserflusses. Damit erscheint die vadose ein geeigneter Ort für Wärmezwischenspeicherung; b) Bereiche mit großen D50 sind in diesem Versuch mit erhöhten Anteilen an Feinkorn (Schluff / Ton) einhergehend; c) Die längsten D50 liegen in der EWS mit der größten effektiven Wärmeleitfähigkeit vor, was auf eine verbesserte Wärmeabgabe an die Umgebung zurückgeführt wurde, womit auch mehr Wärme im Untergrund gespeichert werden konnte. Folglich ist eine gute Ankopplung der EWS an den Untergrund Grundbedingung für eine effektive Wärmespeicherung; d) Die unterschiedlichen LWL-Stränge haben in jeder Sonde deutlich voneinander verschiedene D50. Dies wird auf die LWL-Positionierung zurückgeführt, wobei die relative Lage der Faser in der EWS für die Ausprägung der unterschiedlichen Temperatursignale verantwortlich ist (vergleichbar mit den Aussagen für die (e)TRT). Entsprechend kann eine Mittlung der Werte hier helfen, die Interpretierbarkeit zu verbessern; e) Das D50-Signal

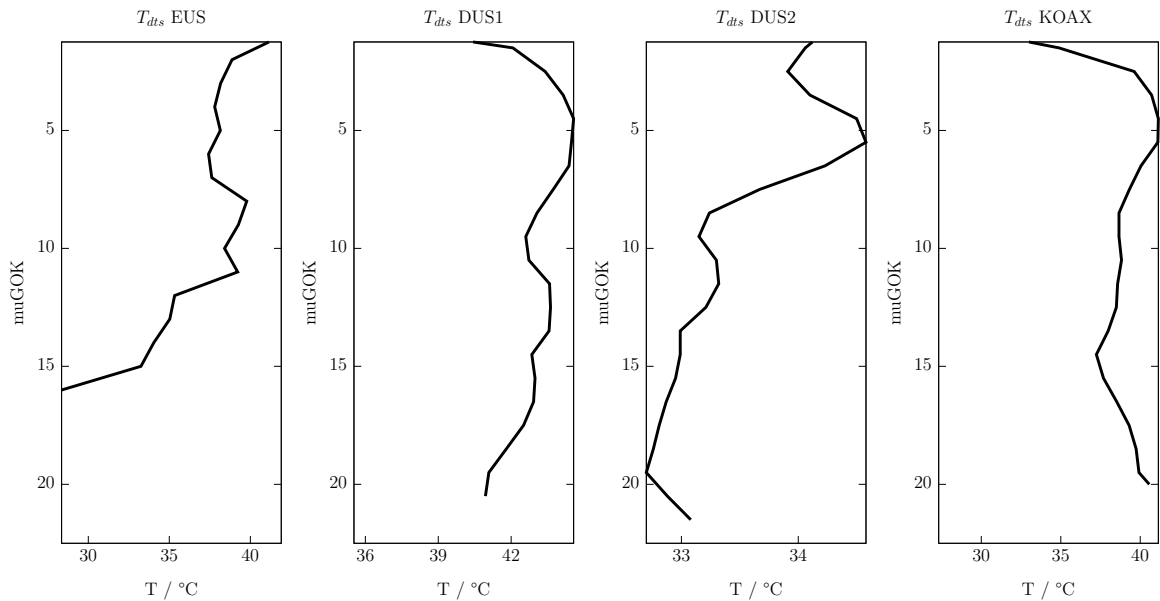


Abbildung 4.10.: Darstellung der Maximaltemperaturen der eTRT über die Tiefe zum Vergleich mit den D50 aus Abb. 4.9.

hat sich als besser für die Identifizierung von Untergrundstruktureinheiten herausgestellt als die Maximaltemperaturverteilungen der eTRT.

Aus den Beobachtungen wurde auch geschlossen, dass der Ausbau der EWS einen starken Einfluss auf die Wärmeabgabe in den Untergrund hat. Dies wird aus dem Vergleich von DUS1 und DUS2 abgeleitet. Die beiden typgleichen Sonden zeigen sehr unterschiedliches Abkühlverhalten trotz angenommener gleicher geologischer Umgebung sowie vergleichbarer Länge und Versuchsdurchführung. Dementsprechend wird angenommen, dass die Ausführung(-squalität) hier der entscheidende Unterscheidungsfaktor ist. Folglich ist eine Auseinandersetzung mit dem Qualitätsmanagement von EWS, wie sie im nächsten Kapitel vorgenommen wird, unabdingbar, wenn eine effektive und sichere Nutzung von EWS gewährleistet werden soll.

5. Untersuchung der durch Hydrationswärme bedingten Temperaturentwicklung in Erdwärmesonden als Qualitätsmanagementwerkzeug

5.1. Einleitung

Die im Folgenden vorgestellten Laborversuche und zugehörigen numerischen Wärmetransportmodellierungen wurden im Kontext des Erdwärmesondenqualitätsmanagements durchgeführt. Mit verbessertem Qualitätsmanagement soll erreicht werden, dass Fehlstellen in der Hinterfüllung frühestmöglich erkannt werden können. Das ist wiederum notwendig, um sicherzustellen, dass eine nachhaltige (z.B. Vienken et al., 2015) und sichere (Bloemendal et al., 2014; Butscher et al., 2011, z.B.) Nutzung gewährleistet ist.

Die Untersuchung bestehender Erdwärmesonden auf Fehler in der Hinterfüllung kann mit unterschiedlichen geophysikalischen Verfahren erfolgen. Vor allem Verfahren aus der Bohrlochgeophysik können hier Anwendung finden. Als Beispiele sind in Riegger (2009) und Baumann (2008) z.B. Ultraschallsonden, Temperaturlogs, Gamma-Logs und Suszeptibilitätssonden zur Bestimmung der Magnetisierbarkeit genannt. Bei allen Verfahren wird die Änderung der Zusammensetzung der Hinterfüllung gemessen. Die Techniken werden in der Bohrlochgeophysik auch zur Charakterisierung von Bohrungen, Grundwassermessstellen und den sie umgebenden Untergrund genutzt (z.B. Baumann, 2008; DVGW-Arbeitsblatt W 110 (2005); Keys und MacCary, 1971).

Temperaturmessungen sind dabei aus drei Gründen von besonderem Interesse. Der erste Grund ist, dass mit der DTS-Technologie eine Möglichkeit besteht, die Temperaturentwicklung kontinuierlich über die gesamte Erdwärmesonde zu erfassen, ohne in das

laufende System einzugreifen zu müssen. Der zweite Grund ist, dass Untersuchungsverfahren wie eTRT auf Temperatursauslenkung basieren und somit eine passive Erkundung auf Fehlstellen ermöglichen. Der dritte Grund resultiert aus der Nutzung von zementhaltigen Hinterfüllungsmischungen, die durch exotherme Hydratation aushärten und somit bereits in der Anfangsphase ein nutzbares Temperatursignal bereitstellen können (z.B. Radioti et al., 2015; Homuth et al., 2013; Riegger, 2013; Jäger, 2013).

Aufbauend auf den bestehenden Arbeiten wird hier gezielt das Potential der Hydrationswärme als Temperatursignalquelle für die Fehlstellendetektion untersucht. Dafür werden vorbereitende Modellierungen sowie Laborversuche an EWS-Modellen durchgeführt. Im Fokus stehen dabei übliche Fehlstellen wie Bohrlochkollaps, Fluideinschlüsse und Dezentrierung des Sondenbündels. Bis auf die Dezentrierung haben diese Fehlstellen die Eigenschaft, dass sie Zementvolumen verdrängen und somit zu einer Reduktion des Wärmeeintrags und damit der Temperaturerhöhung führen sollten. Anschließend wird an einem einfachen Modell für die ungesättigte Zone die Signalveränderung in Abhängigkeit zur Umgebungswärmeleitfähigkeit untersucht, um eine Grundlage für die erwartbare Signalvariabilität für unterschiedliche Untergründe zu erhalten.

Die DTS Daten zu den Versuchen sind auf dem Archivserver (<https://www.ufz.de/record/dmp/archive/6446/de/>) in den Ordnern Experiment_3BHE_Leipzig, Experiment_EUS_Leipzig und Experiment_BHE_columns_laboratory_approach abgelegt, Die Daten der numerischen Modelle, sowie der Quellcode der genutzten OGS Version liegen unter Hydration_Heat_Modelling und OGS_HYDRATION_HEAT_BUILD (vgl. Appendix A).

5.2. Methodik

5.2.1. Numerische Modellierung

Die numerische Modellierung als Machbarkeitsstudie gliederte sich in zwei unterschiedliche Bereiche. Dies ist zum einen die Prognose, ob und wie das (messbare) Signal im Laborversuch auftritt, und zum anderen die Übertragung der Informationen aus dem Laborversuch in ein Modell, welches einen vereinfachten Untergrund abbildet.

Als numerische Modelliersoftware wurde dabei das quelloffene OpenGeoSys (OGS) (Kolditz et al., 2012) genutzt. Die Software benötigt eine unterschiedliche Sammlung an Textdateien, die die unterschiedlichen Eingabedaten enthalten. Die Dateien können mit

Hilfssoftware wie dem OpenGeoSys Data Explorer (Rink, 2015) erstellt oder aber von Hand eingegeben werden. Für die Erstellung des genutzten, irregulären Dreiecks-Meshes wurde gmsh verwendet (Geuzaine und Remacle, 2009). Die visuelle Aufbereitung erfolgte anschließend mit ParaView und Gnuplot (Hansen und Johnson, 2011; Williams et al., 2010)

Wärmeleitungsmodellierung des Laborversuches

Um den geplanten Laborversuch abbilden zu können, wurde die Geometrie aus Abb.5.4 als radialsymmetrischer, zweidimensionaler Schnitt umgesetzt (vgl. Abb. 5.1). Dementsprechend setzt sich das Modell aus fünf Materialgruppen zusammen. Dies sind die innere Füllung, die Verrohrung, der Zementkörper, das Stützrohr und die äußere Wärmedämmung. Eine weitere, sechste Materialgruppe stellt die Fehlstelle dar. Die im Folgenden beschriebenen Annahmen wurden für die Modellierung des Laborversuches getroffen.

a) Als einziger relevanter Wärmetransportprozess wird die Wärmeleitung betrachtet. Diese transportiert die Wärme aus dem Inneren der erhärtenden Zementsuspension an den Modellrand. Im Inneren des Modells spielen Wärmestrahlungsprozesse keine Rolle und mögliche Fluidbewegungen können experimentell nicht quantifiziert werden. Beide Prozesse werden aus diesen Gründen nicht betrachtet.

b) Die zylindrische Geometrie des Laborversuches sowie die Abhängigkeit der Wärmeübergangsfläche zum Radius des Zylinders erfordert eine radialsymmetrische Berechnung der Wärmeleitung. Der Außenrand des Modells wird allseitig, mit Ausnahme der Symmetrieachse, als eine konstante Temperatur von 11 °C angenommen. Dies wird gerechtfertigt durch die geplante freie Aufstellung des Versuches in einer Halle. Dies ermöglicht die freie Konvektion der Luft um die Säulen und damit eine Stabilisierung der Temperaturrandbedingung, indem Stauwärme vermieden wird. Im Modell sind die Ränder offen, Wärmetransport über den Modellrand ist erlaubt.

c) Der Wärmeeintrag durch die erhärtende Zementsuspension in das Modell entspricht einem volumetrischen Quellterm. Dies ergibt sich aus der Radialsymmetrie sowie der Annahme, dass bei hinreichender Homogenisierung der Zementsuspension die Wärmefreisetzung in jedem Bereich der Hinterfüllung gleichmäßig ist. Der Wärmeeintrag folgt dabei der Reaktionskinetik der genutzten Hinterfüllung. In diesem Fall ist dies das Hinterfüllungsmaterial Calidutherm[®]. Da die tatsächliche Reaktionskinetik und die damit verbundenen Energieflüsse unbekannt sind, wird auf eine vereinfachte Beschreibung über die kalorimetrisch bestimmte Wärmefreisetzung pro Zeiteinheit zurückgegriffen. Dabei

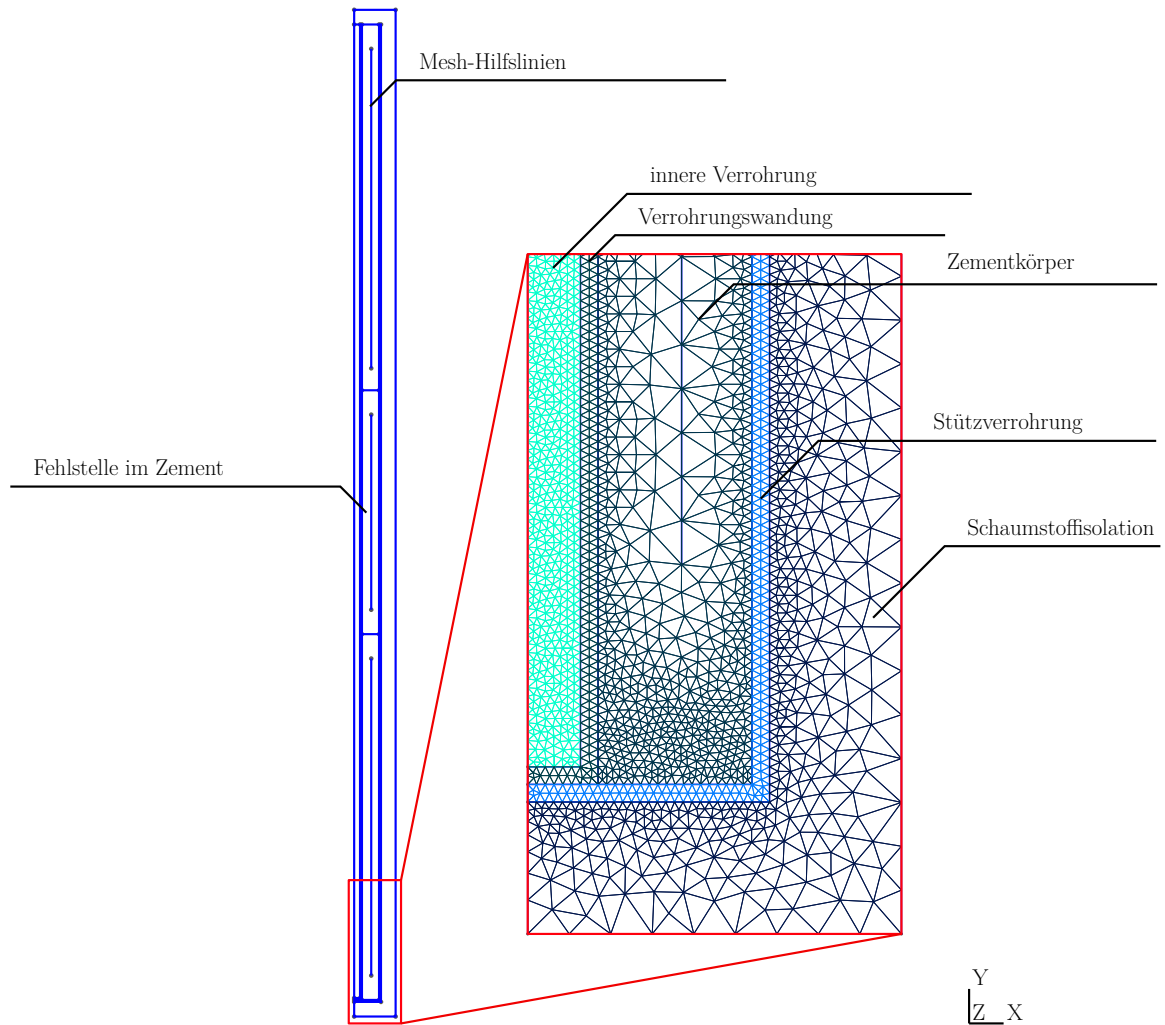


Abbildung 5.1.: Darstellung der Modelldiskretisierung für die *a priori* Modellierung des Hydrationswärmerversuches.

wird angenommen, dass das Wärmesignal die integrale Information der einzelnen Anteile der Reaktion darstellt.

d) Die sechste Materialgruppe stellt die eigentliche Fehlstelle dar. Für die Machbarkeitsstudie wurde hierzu Kies genutzt. Dabei wird der Anteil an Zementsuspension sukzessive durch Kies ersetzt. Dies führt zu einer Reduktion an Wärme emittierenden Zements und sollte in der Theorie zu einer Verringerung der Temperaturen führen. Die wiederholte Berechnung des Temperaturfeldes für unterschiedliche Zement:Kies-Mischungsverhältnisse gibt dann Informationen über die zu erwartende Signalstärke. Dabei wird für dieses Modell eine homogene Mischung angenommen, die einheitliche ge-

mittelte Wärmetransportparameter hat. Eine getrennte Wärmeaufsättigung des Kieses, entsprechend seiner Wärmekapazität, wird vernachlässigt.

e) Die Wärmetransportparameter spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sind streng genommen abhängig von der Temperatur des Mediums. Aufgrund der geringen zu erwartenden Temperaturänderungen während der Hydratation von wenigen Grad wird dieser Aspekt als vernachlässigbar betrachtet. Ebenfalls vernachlässigt wird die entsprechende und mögliche Veränderung der Wärmetransportparameter aufgrund der Hydratation selbst, also der Ausbildung von Zementstein. Dies erfolgt aus praktischen Gründen, da kein Messverfahren zur Verfügung stand, welches die Wärmeleitfähigkeit einer Probe messen kann, welche sowohl Wärme emittiert, als auch kontinuierlich fester wird.

OGS erlaubt in seiner ursprünglichen Version nicht die Nutzung volumetrischer Quellterme. Aus diesem Grund wird eine speziell erweiterte Version von Herr Dr. Thomas Nagel verwendet. Diese erlaubt die Nutzung volumetrischer Quellterme ohne Einschränkungen. Die Ergebnisse wurden durch Gegenüberstellung der analytischen Lösung mit einer Modellabwandlung ohne Fehlstelle überprüft. Dafür wurde eine adiabatische Randbedingung angenommen. Als Eingangssignal wurde dabei der in Abb. 5.2 gezeigte Datensatz genutzt.

Die räumliche Diskretisierung entspricht dabei den Realmaßen aus dem geplanten Modellversuch. Die Wärmetransportparameter, die für die Modellierung benötigt werden, wurden aus den entsprechenden Datenblättern gewonnen bzw. durch die genutzten Materialien ermittelt (vgl. Tab. 5.1). Die Werte für die Dichte sind nur der Vollständigkeit halber gegeben. Die Berechnungen wurden mit Effektivwerten sowohl für die Wärmekapazität als auch für die Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Gerechnet wurde in Viertelstunden-Zeitschritten über eine Gesamtdauer von 168,5 h. Dabei wird lediglich der Sand im Zentrum als poröses Medium betrachtet und alle anderen Kompartimente als porenfreie Festkörper. Fluidbewegungen (Luft, Kondenswasser) werden vollständig vernachlässigt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Sättigung des Sandkerns, mit Wasser, 0% beträgt.

Erweiterung in den Feldversuch

Nach Abschluss des Laborexperiments wurde anhand einer Parameterstudie die Auswirkung veränderlicher Wärmeleitfähigkeit in der Nahumgebung der EWS analysiert. Zu diesem Zweck wurde eine Koaxialsonde im ungesättigten Untergrund untersucht (vgl. Abb. 5.3). Die Wahl fiel auf eine Koaxialsonde, weil diese per Definition radialsymme-

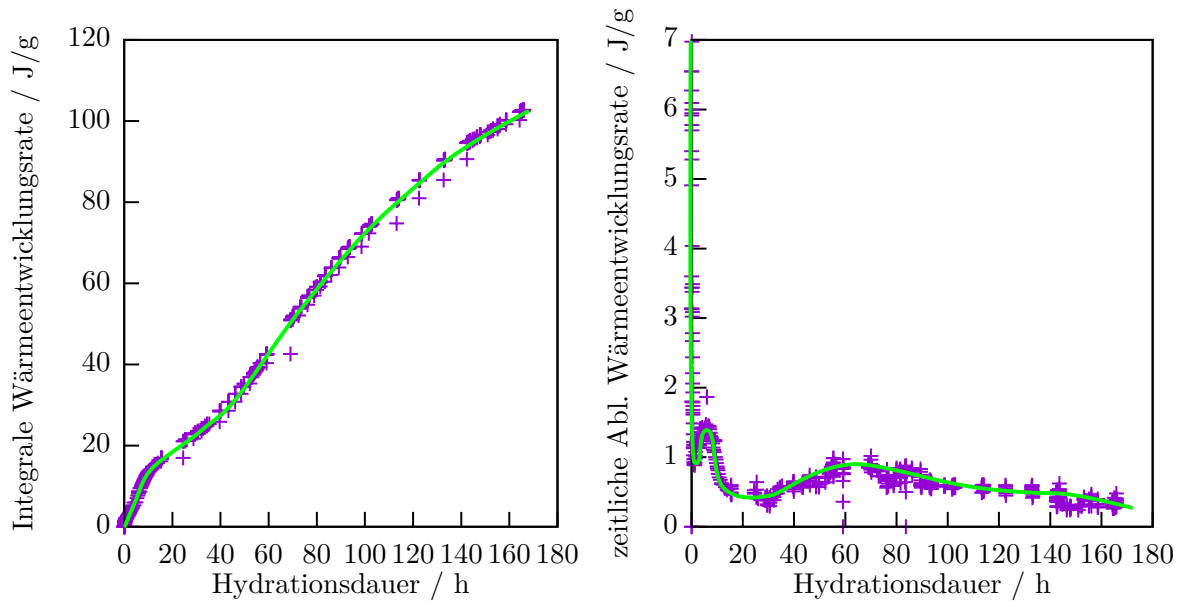


Abbildung 5.2.: Darstellung der integralen Wärmemenge (rechts; zur Verfügung gestellt durch Terra Calidus) und deren zeitliche Ableitung (links). Das abgeleitete Signal stellt die Eingangsdaten für den Hydrationswärmeverlauf dar. In grün ist schematisch die genutzte Glättung dargestellt. Calidutherm[®] weist dabei nach ca. 60 h ein weiteres Hydrationsmaximum auf.

trisch sein muss und dementsprechend auf Equivalentgeometrien zur Darstellung von U-Sonden in radialsymmetrischen Geometrien verzichtet werden konnte. Dies erlaubte, wie in der Modellierung für den Laborversuch, eine Vereinfachung der Modellgeometrie auf einen zweidimensionalen Schnitt. Da in Deutschland, unabhängig vom Ausbautyp der EWS (U-Sonde/Koaxialsonde), die Bereitstellung von drei Zentimetern verpresstem Ringraumvolumen vorgeschrieben ist, wurde angenommen, dass die Wahl des Sondentyps für eine qualitative Analyse der Temperaturentwicklung im ungesättigten Untergrund unerheblich ist. Die Beschränkung auf die vadose Zone erfolgte in der Modellierung, um Wechselwirkungen mit dem Wärmetransportprozess Advektion außer Acht lassen zu können.

Aufgrund der Erfahrungen bei Bohrarbeiten in Lockersedimenten gilt der Bohrlochkollaps als der wahrscheinlichste und, aus den Laborversuchen abgeleitet, als einer der gravierendsten Faktoren zur Bildung von Fehlstellen in der Hinterfüllung. Dabei wurden für das numerische Modell folgende zusätzliche Annahmen getroffen:

a) Der Untergrund ist homogen und die Wassersättigung ändert sich über die Zeit nicht. Es treten keine vertikalen oder horizontalen Masseverlagerungen von Wasser auf.

Tabelle 5.1.: Parametertabelle für die genutzten Materialgruppen sowie deren Funktion für die Laborversuchmodellierung. Die Dichte ist nur der Vollständigkeit halber angegeben. Ge-rechnet wird mit den aufgelisteten Effektivwerten für spez. Wärmekapazität und Wärmeleit-fähigkeit.

Materialbezeichnung	Funktion	ρ / kg/m ³	c_p / J/kgK	λ / W/mK
Sand	Beschwerung	1900	1450	0,4
HD-PE-100	EWS-Verrohrung	963	1900	0,42
Calidutherm [®]	Hinterfüllung	1650	1130	2,0
PVC-U-Stützrohr	Bohrlochwandung	1400	850	0,15
Styrol-Butadien	Isolation	53	1020	0,033
Zement-Kies-Gemisch	Fehlstelle	1650	782 – 1091	1,37 – 1,93

b) Üblicherweise werden die Rohrleitungen von EWS vor der Verpressung mit Wasser gefüllt und verschlossen. Dies erfüllt zwei Funktionen: 1) Beschwerung der Verrohrung durch Verdrängung der Luft und damit einhergehender Vergrößerung der Dichte des Sondenbündels, und 2) hilft die Inkompressibilität des Wassers, ein Zusammenpressen der Rohre zu vermeiden, da ein Gegendruck gegen den Zement aufgebaut wird. Zwei-teres ist jedoch nur für sehr tiefe Sonden von Interesse. Für diese Modellierung wird angenommen, dass das Wasser in den Rohren unbeweglich ist, also nicht der Konvektion unterliegt. In der Diskretisierung des Modells ist dieser Bereich als Festkörper mit den thermischen Eigenschaften des Wassers dargestellt.

c) Das Material, welches durch den Bohrlochkollaps in größere Tiefen abtransportiert wird, entstammt aus dem Bohrloch. Das bedeutet, dass für die Generierung einer Fehl-stelle, bei der Fluglehm und Zement vermischt werden, ein entsprechender Hohlraum oberhalb der Fehlstelle entstehen muss, welcher anschließend mit reiner Zementsuspension gefüllt wird.

Die Wärmetransportparameter wurden dabei aus der VDI-4640 entnommen. Es wur-den jeweils die Maximal- und die Minimalwerte gewählt, um einen größtmöglichen Kon-trast zwischen den Ergebnissen zu erzielen (vgl. Tab. 5.2).

5.2.2. Laborversuch

Für die Umsetzung des Laborversuches wurde eine vereinfachte Erdwärmesondengeo-metrie gewählt. Zu diesem Zweck wurde nur ein Arm einer Doppel-U-Sonde abgebil-det, was in einer Koaxialsondenkonfiguration dem Außenleiter entsprechen würde. Auf-grund der gleichen Eigenschaften in Material und Durchmesser von herkömmlicher EWS-

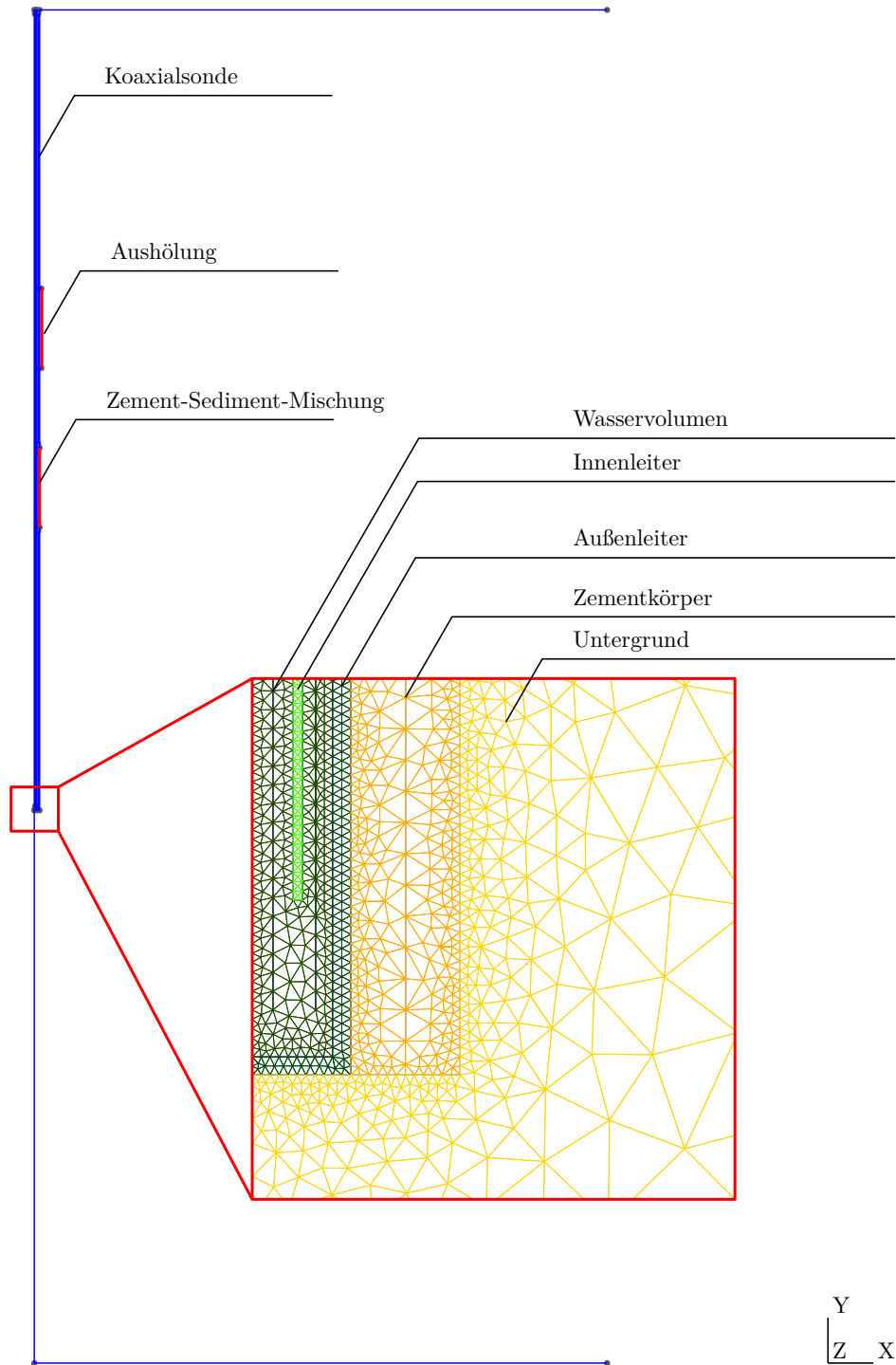


Abbildung 5.3.: Darstellung der Modelldiskretisierung für die Modellierung des Hydrationswärmerversuches in geologischer Umgebung.

Tabelle 5.2.: Parametertabelle für die Modellierung der Implementierung des Laborversuches in die ungesättigte Zone.

Modell	Objekt	ρ / kg/m ³	c_p / J/kgK	λ / W/mK
Unabhängige Parameter	Wasser	1000	4184	0,6
	Verrohrung	963	1900	0,42
	Zement	1650	1130	2,0
	Untergrund	1800	833	1,1
	Aushöhlung	1650	1130	2,0
Minimum Modellierung	Vermischung	1800	1242	1,55
Maximum Modellierung	Vermischung	1800	1455	2,45

Verrohrung (z.B. REHAU AG & Co, 2013) und Grundwassermessstellenpegel, wurde auf Pegelmaterial (HD-PE-100) als EWS-Verrohrung zurückgegriffen.

Von innen nach außen besteht die Modellumsetzung aus der inneren HD-PE-Verrohrung, dem Lichtwellenleiter, dem Hinterfüllungszement, der äußeren Stützverrohrung und einer Isolationskombination aus Rettungsdecke, Isolierschaumstoff und einer weiteren Rettungsdecke. Die Konfiguration ist schematisch in Abb. 5.4 dargestellt.

Eine wie in Abb. 5.4 dargestellte Säule ist 2 m hoch (vgl. Tab. 5.3). Der Zementkörper wird dabei von einem PVC-KG-Rohr mit 100 mm Innendurchmesser gestützt. Dies erlaubt bei der Nutzung von 31 mm EWS-Verrohrungsdicke, dass ein Mindestradius von 60 mm für Hinterfüllung und Sondenverrohrung eingehalten wird. Im Zentrum der Säule befindet sich die imitierte EWS-Verrohrung. Auf diese ist die Glasfaser aufgebracht. Aus Erfahrungen mit dem Wärmetracerversuch wurde beschlossen, die Konfiguration derart abzuwandeln, dass wie in Vogt et al. (2010) eine gefräste Rille auf das HD-PE-Rohr aufgebracht wird. Dies erlaubt eine deutlich gleichmäßigere Aufbringung der Glasfaser bei gleichzeitig erhöhter Lagestabilität des Lichtwellenleiters auf dem Rohr. Dabei wurde ein Gewinde mit einer Steigung von einem Zentimeter gefräst, was zu einer räumlichen Auflösung der Endmessung in der Säule von 0,1 m führt.

Um die Messung möglichst stark von Temperatureinflüssen aus der Umwelt abzusichern, wurde eine Isolierung installiert. Diese besteht aus zwei Kompartimenten: a) Allgemeine Isolierung gegen die Umgebungstemperatur, bereitgestellt durch 3,5 cm dicken Isolierschaumstoff (Armacell GmbH, 2016) und b) Schutz vor Wärmestrahlung aus der Umgebung über die Nutzung von Rettungsdecken.

Die Temperaturmessung wurde mittels Kalibrierbad korrigiert. Dabei wurde ein passives Temperaturbad genutzt. Dies bedeutet, dass das Temperaturbad lediglich doppelt isoliert war und keinerlei Temperaturregulierung nutzte. Damit war das Temperaturbad

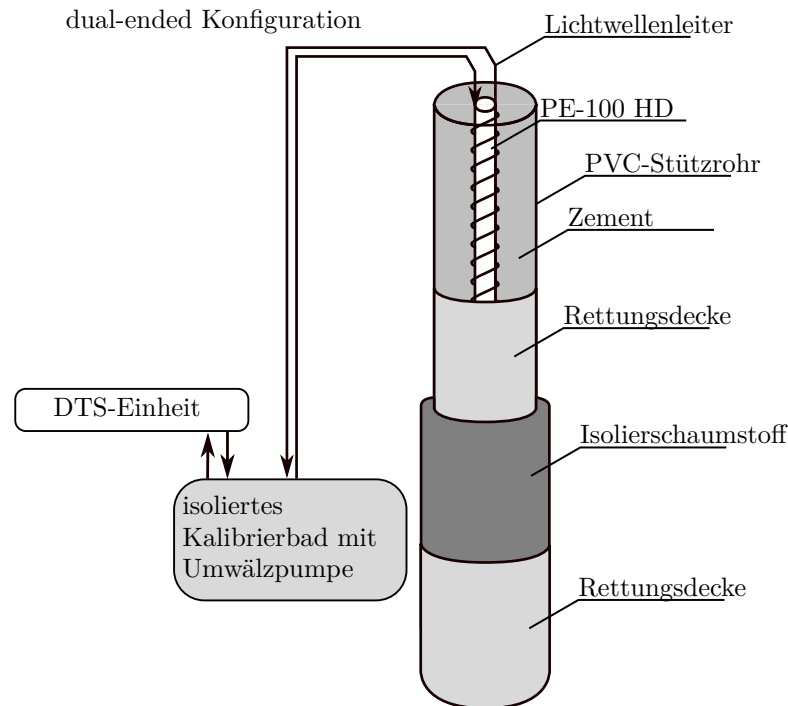


Abbildung 5.4.: Schematische Darstellung der Anordnung des Hydrationswärmeversuches anhand einer exemplarischen Säule. Nicht maßstabsgetreu.

dem Einfluss der Umgebungstemperatur (abgeschwächt durch Isolation) ausgesetzt. Um eine Dichteschichtung des Kalibrierbades zu vermeiden, war es notwendig, das Kalibrierbad umzuwälzen. Dies geschah hier mit einer kleinen Pumpe. Die durch die Pumpe eingetragene Energie führte anfangs zu einem langsamen Temperaturanstieg des Beckens und wirkte anschließend als Puffer gegen zu schnelles Auskühlen des Beckens. Innerhalb des Beckens wurden jeweils zwei Serien an DTS-Messwerten erhoben, einmal vor und einmal nach den Messobjekten, sowie zwei Referenztemperaturen über kalibrierte Referenzsensoren. Als Referenzsensoren kamen hier TidBits zum Einsatz (Onset Computer Corporation, 2016). Diese autonomen, tauchfähigen Sensoren erlauben die Temperaturmessung unterhalb und oberhalb der DTS-Referenzstrecke. Dies ermöglichte die Mittelwertbildung der Kalibriertemperatur, sowie die Überwachung potentiell auftretender, temperaturbedingter, horizontaler Schichtungsverläufe.

Für die Kalibrierung wurden für beide Referenzstrecken jeweils die Temperaturen von 50 m Lichtwellenleiter gemittelt. Durch die zeitliche Synchronisierung mit der Temperaturmessung der TidBits steht für jeden Zeitpunkt ein bekannter absoluter Tempe-

Tabelle 5.3.: Abmessungen einer Säule aus dem Laborversuch zur Detektion von Hinterfüllungsfehlstellen durch Temperaturmessungen.

Objekt	Höhe / m	Innendurchmesser / mm	Wandstärke / mm
Verrohrung	2,02	31,5	2,5
Zementkörper	1,98	34	0
Stützrohr	2,0	100	5
Isolation	2,06	110	30
	Länge / m	Steigung / mm	
DTS-Messstrecke	18 – 19	10	
DTS-Kalibrierstrecke	50	-	

raturwert des Kalibrierbades sowie jeweils ein Mittelwert für die erste und die zweite DTS-Referenzstrecke zur Verfügung. Zeigten die beiden mittleren DTS-Temperaturen keine systematische Abweichung voneinander, wurden sie ebenfalls gemittelt und von den gemittelten TidBit-Temperaturen abgezogen. Die resultierende Kurve enthält die Temperaturoffset-Information für jeden Zeitpunkt der Messung. Durch einfache Addition von Offsetkurve und Messwerten kann dann die Offsetkorrektur der DTS-Temperaturen erfolgen.

Zur Filterung hochfrequenten Rauschens aus dem Temperatursignal wurde ein digitaler Low-Pass-Filter eingesetzt. Als Verfahren wurde hierbei ein zentrierter, gleitender Mittelwert-Filter genutzt. Aufgrund der Unsicherheit über die tatsächliche Lage eines DTS-Messintervalls beachtet dieser Filter neben zeitlich benachbarten Temperaturwerten auch jene, die in direkter räumlicher Nachbarschaft liegen. Dies verdreifacht die Werte für die tatsächliche Filterung.

Die Messkonfiguration besteht aus fünf Säulen, die wie in Abb. 5.4 dargestellt konfiguriert sind. Die Lichtwellenleiter der Säulen sind jeweils so verspleißt, dass sie eine Serienschaltung bilden. Dies bedeutet, dass nur die erste und die letzte Säule direkt mit dem Sensor verbunden sind. In den Säulen eins und zwei wurden in der dritten Verfüllungsphase eine Wasserverdünnungsfehlstelle bzw. ein Bohrlochkollaps durch Kiesverfüllung realisiert. Die dritte Säule ist die ungestörte Referenzsäule. Sie dient der Überwachung des ungestörten Hydrationsvorgangs. Die Säulen vier und fünf enthielten die Dezentrierung bzw. die Simulation eines Fluideinschlusses durch Anbringung einer Isolationsschicht. Die fünf Säulen sowie die ungefähre Lage ihrer Fehlstellen sind in Abb. 5.5 dargestellt.

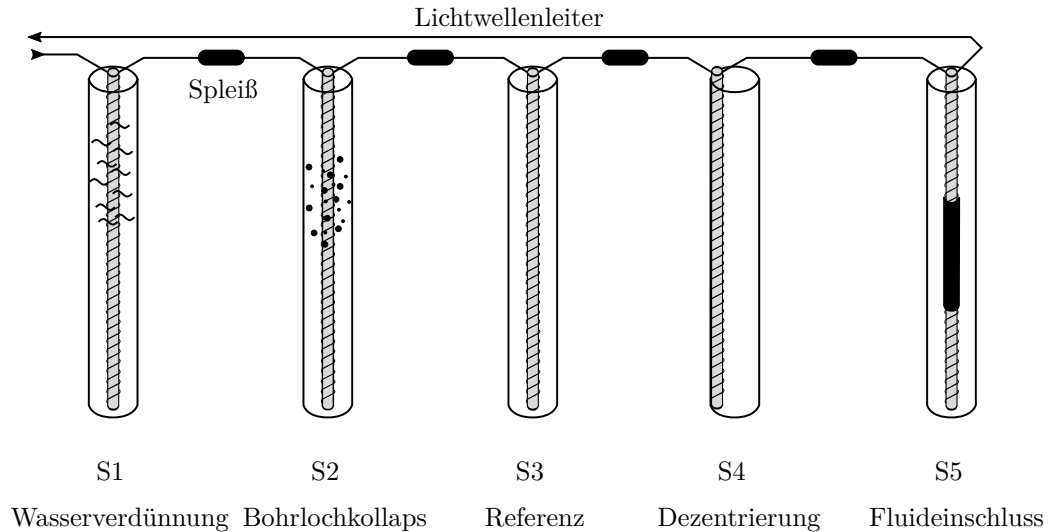


Abbildung 5.5.: Vereinfachte Darstellung der fünf Säulen sowie die in ihnen simulierte Fehlstelle. Von links nach rechts: S1: Verdünnung des Zements mit Wasser, S2: Bohrlochkollaps, S3: ungestörte Referenzsäule, S4: Dezentrierung des Sondenbündels, S5: Fluideinschluss simuliert durch Isolation des Sondenbündels.

Die Temperaturmessung erfolgte ab zwei Stunden vor Beginn der Verfüllung der Säulen mit Zement und lief bis zum Versagen zweier Spleiße über eine Zeit von insgesamt 150 h. Da aus der Literatur bekannt ist, dass für die meisten Zemente das Hydrationswärmemaximum zwischen 7 und 20 h liegt, wurde der auswertbare Zeitraum als lang genug betrachtet.

Das Anmischen der Zementsuspension erfolgte mithilfe einer Kreiselpumpe, die die Zementsuspension durch einen Kolloidalmischer drückt. Dabei wurde für den Zement ein Wasser-Zement-Verhältnis von 0,3 gewählt und die Zementsuspension 8 bis 10 min im Kreis gepumpt. Anschließend wurde der Zement in die fünf Säulen eingefüllt. Dies erfolgte über dünne Plastikschläuche, die mit Ansteigen des Zementsuspensionsspiegels langsam geborgen wurden. Es wurde darauf geachtet, das Kontraktorverfahren nicht zu verletzen.

Als Hinterfüllungsmaterial wurde Calidutherm[®] genutzt. Dabei handelt es sich um eine Verfüllung, die überwiegend aus Hochofenzement, Tonmineralen und Quarzmehl besteht. Der Hersteller gibt erreichbare Wärmeleitfähigkeiten von über $2,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ an (Terra Calidus GmbH, 2009).

Im Anschluss an den Versuch wurden die Säulen in Stücken zu jeweils 0,2 m zersägt, ein Loch in die Schnittfläche gebohrt und Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem KD2Pro durchgeführt. Die Schnittflächen wurden auch hinsichtlich augenscheinlicher Fehler in der Hinterfüllung untersucht.

5.3. Ergebnisse

5.3.1. Modellierung der Laborversuche

Die Modellierung der Laborversuche erfolgte an unterschiedlichen Abstufungen von Kies-Beimengungen. Dabei wurde zuerst eine Berechnung ohne störende Einflüsse einer möglichen Fehlstelle durchgeführt und anschließend der Anteil von Kies kontinuierlich erhöht. Die Erhöhung erfolgte dabei in 10 %-Schritten und wurde bis 90 % Kiesanteil durchgeführt. Die Temperaturen in Abb. 5.6 entstammen dabei dem Übergang zwischen Verrohrungswandung (außen) und Zementkörper (vgl. Abb. 5.1).

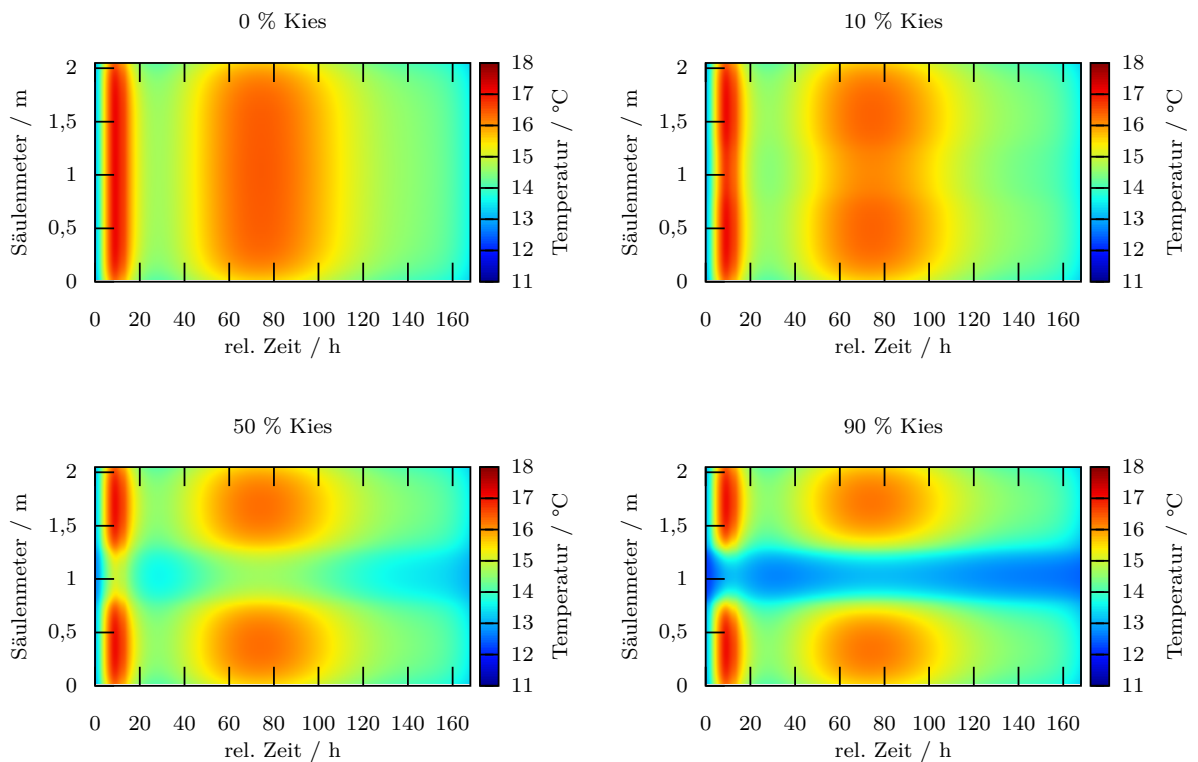


Abbildung 5.6.: Ergebnisse aus den *a priori* Modellierungen des Laborversuches für unterschiedliche Verdünnungsstufen des Zements mit Kies. 0 m entspricht dem unteren Ende der Säule. Die Zeit ist relativ zum „Versuchsbeginn“ angegeben.

Für die Modellierung ohne Fehlstelle wird dabei eine homogene Temperaturverteilung von 17 - 18 °C für das erste Temperaturmaximum und eine Temperatur von 16 °C für das zweite Temperaturmaximum ermittelt. Die Temperaturmaxima liegen bei 7 und 75 h (vgl. Abb. 5.6 0 % Kies). Die Breite der Maxima nimmt jeweils zu den Enden der Säule hin ab.

Mit zunehmender Beimengung von Kies bleiben die maximal erreichten Temperaturen sowie die Lage der Maxima ober- und unterhalb der Fehlstelle gleich. Die Temperatursignalamplitude im Bereich der eingebrachten Fehlstelle sinkt dagegen deutlich. Bei einer Zumischung von 10 % Kies ist die Temperatur im Bereich des Hydrationsmaximums in der Fehlstelle nur um 0,5 K reduziert (vgl. Abb. 5.6 10 %). Bei 50 % Beimischung ist die Temperatur bereits deutlich reduziert und weist Werte für die Hydrations-temperaturmaxima in der Fehlstelle auf, die 2,5 und 3 K niedriger sind als in den ungestörten Bereichen der Hinterfüllung (vgl. Abb. 5.6 50 %). Bei einer 90-prozentigen Ersetzung von Zementsuspension durch Kies (vgl. Abb. 5.6 90 %) findet kaum noch eine Aufheizung im Bereich der Fehlstelle statt. Die Temperaturen sind jetzt um bis zu 4,5 K reduziert und liegen damit nur noch anderthalb Grad oberhalb der ungestörten Umgebungstemperatur.

5.3.2. Laborversuche

Die Laborversuche wurden grafisch ähnlich aufbereitet wie die Labormessungen. Es wurden die gleichen Temperaturachsen gewählt, da davon ausgegangen wurde, dass die Amplituden sowohl in Stärke als auch zeitlich vergleichbar zu den modellierten Ergebnissen sein würden. Die gemessenen Temperaturen lagen dabei wie in der Modellierung im Bereich von 11 - 18 °C.

Für S1, die Säule mit der Wasserfehlstelle im oberen Drittel, wurden dabei folgende Temperaturen, wie in Abb. 5.7 S1 dargestellt, gemessen: Das erste Temperaturplateau wurde nach ca. 10 – 15 h erreicht, bestand bis ca. 22 h und wies eine Amplitude von 17 °C auf. Die gemessene Temperaturstrecke ist dabei zweigeteilt. Der obere Bereich von 0 – 0,8 m erreichte den Plateaubereich erst nach 18 h. Ab 22 – 25 h stiegen die Temperaturen noch einmal deutlich an und erreichten zwischen 30 und 40 h ihr Maximum mit Temperaturen zwischen 17 und 18 °C. Im Bereich von 0 – 0,8 m waren die Temperaturen dabei niedriger als in den darunter liegenden Bereichen. Ab 43 h nach Versuchsbeginn fielen die Temperaturen kontinuierlich ab, wobei die unteren Bereiche der Säule schneller auskühlten als die oberen.

Für S2, die Säule mit der kiesbefüllten Fehlstelle zwischen dem zweiten und dritten Verfüllzyklus, wurden die in Abb. 5.7 S2 dargestellten Temperaturen gemessen. Dabei trat das erste Temperaturplateau wieder nach ca. 10 – 15 h auf und ging nach 22 h langsam in das tatsächliche Temperaturmaximum über, was zwischen 30 und 42 h lag. Im oberen Bereich der Säule, im Säulenintervall von 0,3 – 0,7 m, lag eine Zone deutlich verringerter Temperaturen vor. Diese waren im Vergleich zu den Nachbarbereichen um bis zu 2 K niedriger. Auch für S2 kühlten die Temperaturen entlang der Säule unter-

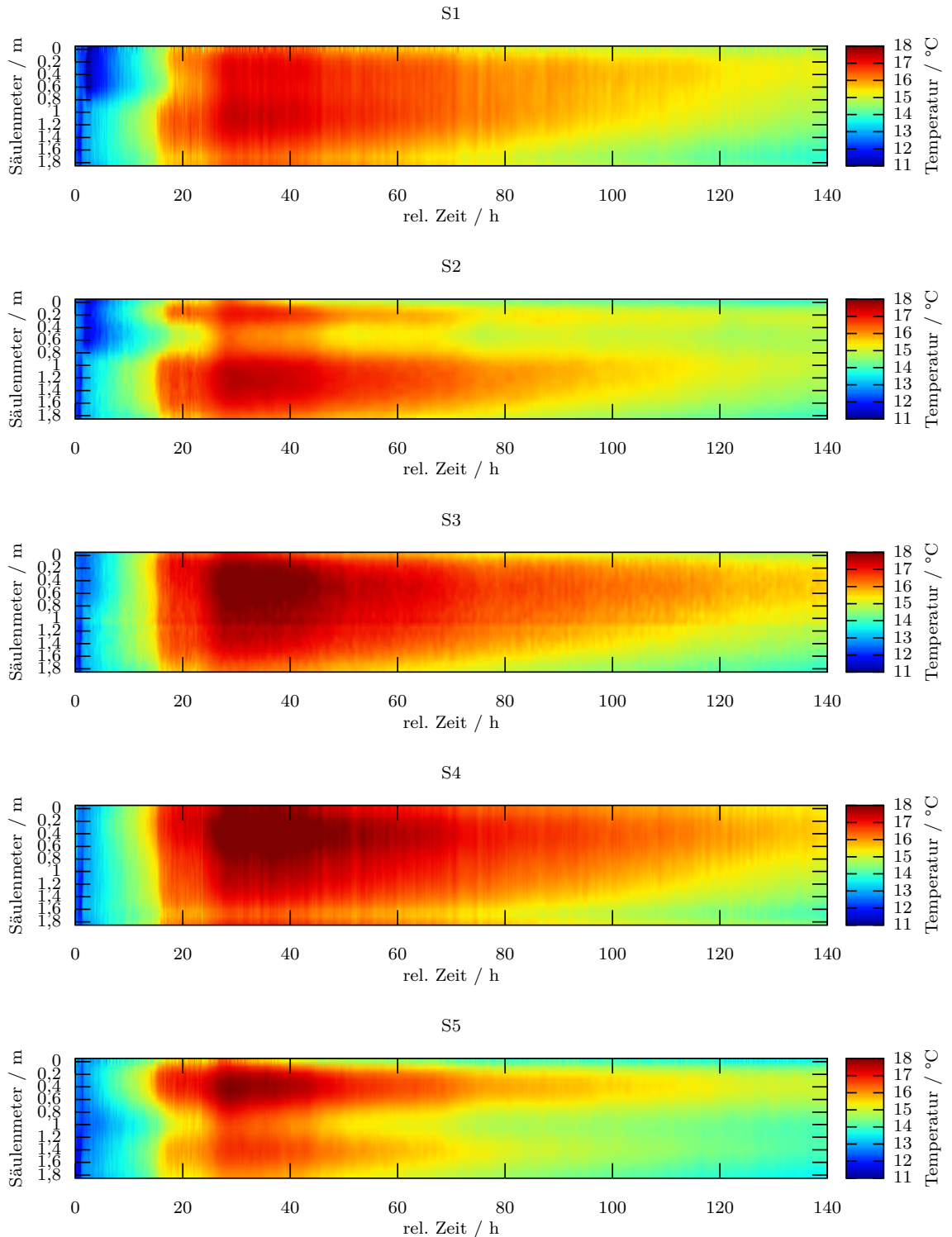


Abbildung 5.7.: Ergebnisse aus den durchgeführten Laborversuchen: S1: Wasserverdünnungs-fehlstelle; S2: Bohrlochkollaps, simuliert durch Kiesbeimengung; S3: ungestörte Referenz; S4: ausgelenkte Verrohrung; S5: Fluidinklusion, simuliert durch Isolation. 0 m entspricht dem oberen Ende der Säule. Die Zeit ist relativ zum Versuchsbeginn angegeben.

schiedlich stark aus. Dabei kühlten hier die oberen Bereiche bis 0,8 m schneller aus als die darunter liegenden. Eine Temperaturanomalie in der Tiefe von 0,3 – 0,7 m konnte über den gesamten Auswertungszeitraum von 140 h anhand reduzierter Temperaturen nachgewiesen werden.

Für S3, die ungestörte Referenz, wurden die in Abb. 5.7 S3 gezeigten Temperaturen ermittelt. Das erste Temperaturplateau trat dabei für alle Tiefen ab 14 h auf. Das tatsächlich gemessene Maximum lag zwischen 28 und 45 h. Die höchsten ermittelten Temperaturen lagen dabei im Bereich von 0,1 bis 1,2 m und erreichten Werte von über 18 °C. Generell waren die Temperaturen mit zunehmender Säulenlänge reduziert und wiesen auch eine schnellere Abkühlung auf.

Die gemessene Temperaturverteilung für S4, die ausgelenkte Säule, unterschied sich nur geringfügig von dem Ergebnis der Messungen für die Referenzsäule S3 (vgl. Abb. 5.7 S3 und S4). Der zeitliche Verlauf sowie die Signalstärke zeigten keine größeren Abweichungen voneinander. Lediglich die tatsächliche Dauer des Maximums war für S4 deutlich länger und reichte im Bereich von 0,2 bis 0,5 m bis 70 h nach Messbeginn.

Die letzte Säule S5, welche teilisoliert war, zeigte die in Abb. 5.7 S5 dargestellte Temperaturverteilung. Diese ähnelte der gemessenen Temperaturverteilung von S2. Das erste Temperaturplateau wurde bei S5 im oberen Bereich von 0 – 0,7 m nach 12 – 15 h erreicht. Im unteren Bereich, von 1,2 – 1,8 m, trat das Plateau erst nach 17 h auf und hatte eine um 1,2 – 1,5 K niedrigere Temperatur. Die beiden Bereiche begrenzen einen dritten Bereich, der durch eine deutliche Temperaturreduktion gekennzeichnet war (bis zu 2 K). Nach 27 h gingen die Temperaturen in ihr Maximum über, welches für den oberen Bereich bis 45 h Bestand hatte. Nur im oberen Bereich der Säule wurden Temperaturen von 18 °C erreicht, welche mit den Temperaturmaxima der anderen Säulen vergleichbar sind. Auch für S5 kühlten die unteren Bereiche der Säule schneller aus als die oberen. Eine zwischen 0,8 und 1,1 m liegende Temperaturanomalie war bis ungefähr 120 h nachweisbar.

Für die Säulen S2 und S5 existierte ein zweites Temperaturplateau zwischen 50 und 75 h (vgl. Abb. 5.7 S2 und S5). Dieses war jedoch jeweils nur im oberen Bereich der Säulen, 0 – 0,4 m bei S2 und 0 – 0,5 m bei S5, nachweisbar.

Im Anschluss an die Temperaturmessungen wurden Wärmeleitfähigkeitsmessungen an den Säulenstücken durchgeführt. Diese ergaben die in Abb. 5.8 dargestellten Verteilungen, wobei jeder Wert ein Mittelwert aus einer Serie von mindestens drei Werten ist. Die Messungen wurden dabei ausschließlich für S1, S2 und S3 durchgeführt, weil für diese keine einbaubedingte Verteilung der Fremdkörper erwartet wurde. Dabei zeigte sich, dass die Referenzsäule S3 Wärmeleitfähigkeiten zwischen 1,2 und 1,5 W m⁻¹ K⁻¹

aufweist. An zwei Kernabschnitten konnten keine Messungen durchgeführt werden. Dies waren die Kernstücke zwischen 0,7 und 0,9 m von der Säulenoberkante aus sowie das Fußstück.

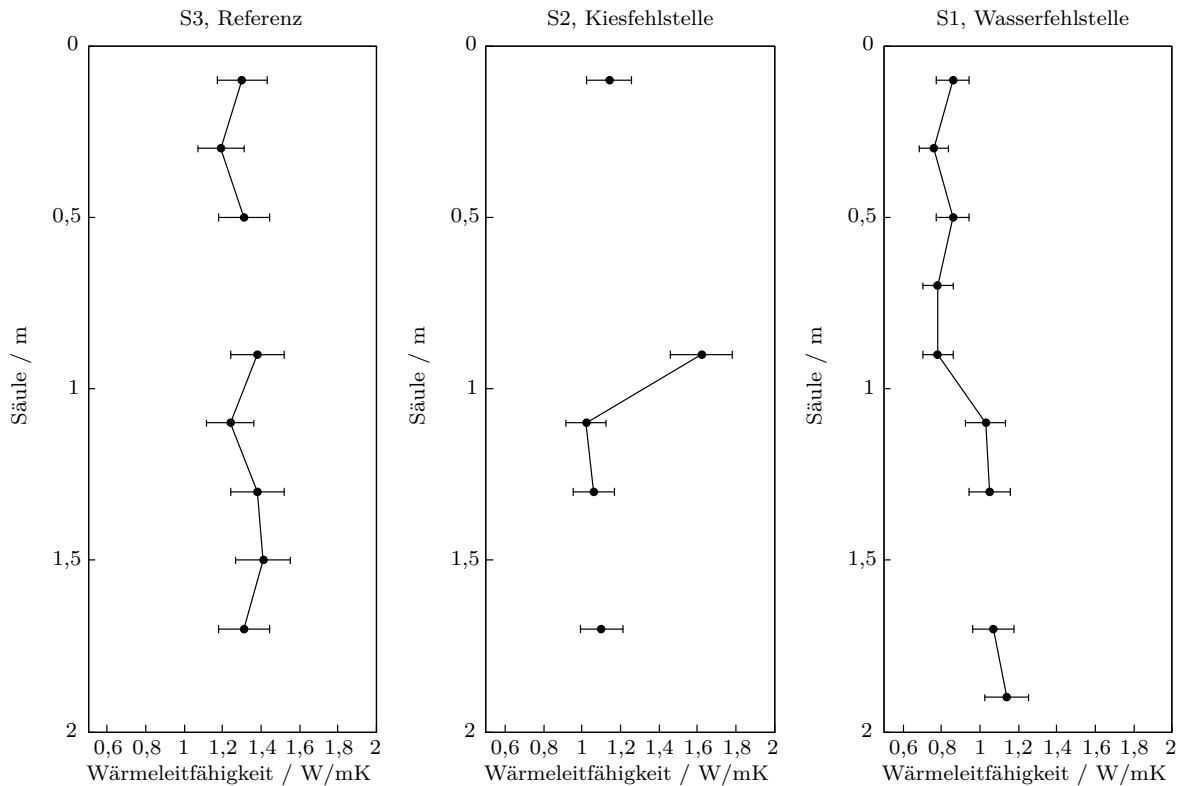


Abbildung 5.8.: Ergebnisse der durchgeführten Wärmeleitfähigkeitsmessungen an den Säulen S3 – S1 (Referenz, Kiesfahle, Wasserfahle). Bereiche, zwischen denen Werte fehlen, sind nicht mit einer Linie verbunden. Für S2 konnten in der oberen Hälfte keine Werte erfasst werden, da eine Bohrung im Bereich der Fehlstelle nicht möglich war. Der Fehlerbalken zeigt die vom Hersteller angegebene Messungenauigkeit von 10 % an.

S2, die Säule mit der Kiesfahle, ist jene Säule, die die wenigsten Messwerte enthält. Neben dem Sondenfuß und einem darüber liegenden Intervall fehlen alle Werte aus dem direkten Bereich der Fehlstelle. Das liegt daran, dass die Fehlstelle sehr inhomogen war, sodass loser Kies in den Säulenstücken vorlag. Entsprechend war zu wenig Zement vorhanden, um Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem KD2Pro durchzuführen. Dort, wo Werte ermittelt werden konnten, waren die Werte für die Wärmeleitfähigkeit zwischen $1,0$ und $1,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ angesiedelt und damit etwas niedriger als in der Referenz. Ausnahme bildete das erste Messintervall unterhalb der Fehlstelle, welches eine Wärmeleitfähigkeit von $1,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aufwies.

Für S1, die Säule mit der Verdünnung des Zements mit Wasser, wurden zwei Zonen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Die untere, in welcher keine Fehlstelle eingebaut wurde, zeigte Wärmeleitfähigkeiten zwischen $1,0$ und $1,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Der Bereich darüber zeigte reduzierte Wärmeleitfähigkeiten von $0,7$ bis $0,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Dabei konnte nur für ein Intervall keine Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden.

5.3.3. Modellierung des Feldversuches

Im Anschluss an die erfolgreiche Durchführung der Laborversuche wurde das bestehende Modell auf zwei unterschiedliche Untergrundszenerien, ein geringdurchlässiges und ein ungesättigtes, erweitert. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.9 dargestellt. Für die Modellierung wurde ein Szenario gewählt, bei welchem die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität den Maximalwerten aus der VDI entspricht. Dieses Szenario wurde einem Szenario gegenüber gestellt, welches die Minimalwerte nutzt.

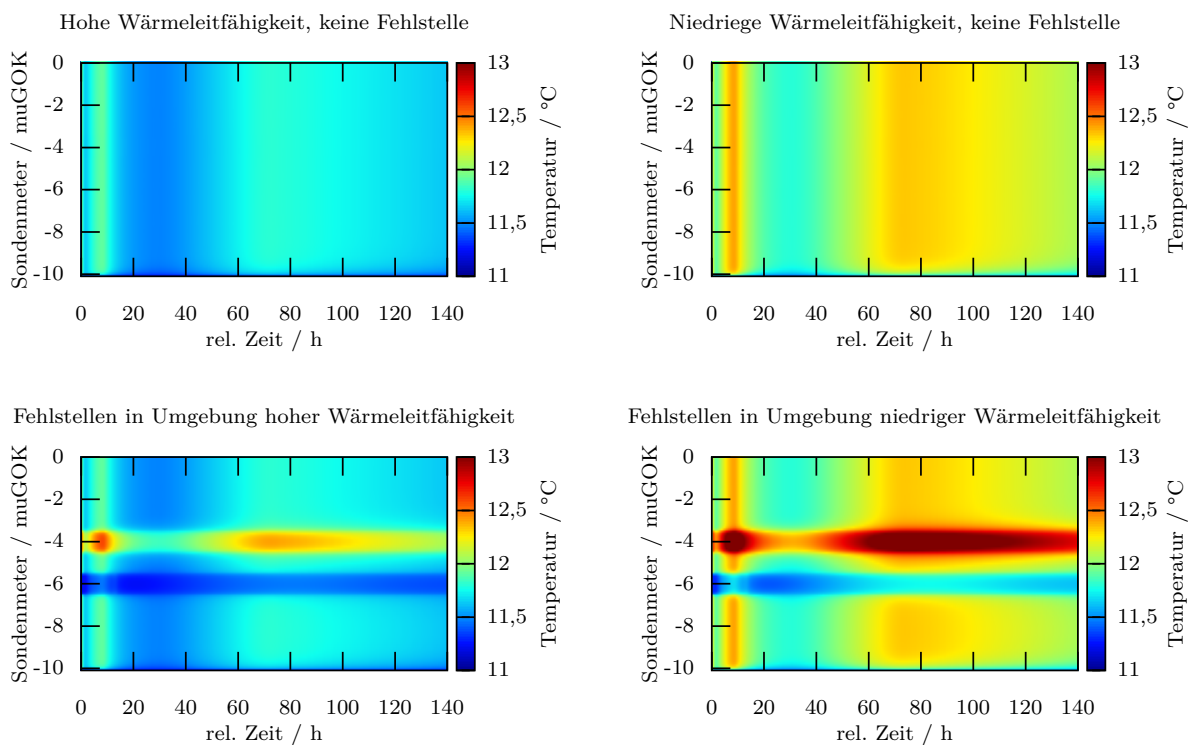


Abbildung 5.9.: Ergebnisse der Studie über den Einfluss der Umgebungswärmeleitfähigkeit auf die Amplitude des Hydrationswärmesignals; oben der ungestörten Untergrund, unten mit zwei Fehlstellen. Eine verringerte Zementverfüllung führt zur Senkung der errechneten Temperaturen, das Auffüllen von Hohlbereichen mit Zement dagegen führt zu einer verstärkten Temperaturentwicklung

Bei hoher Wärmeleitfähigkeit lagen die erreichten Temperaturen im Übergang von Verrohrung zu Zementkörper für das erste Maximum bei 12 bis 12,3 °C und sind damit nur 1 bis 1,3 K höher als die ungestörte Untergrundtemperatur (vgl. Abb. 5.9). Das zweite Maximum ist deutlich breiter und erreichte Temperaturen bis 11,7 °C. Die Maxima lagen zwischen 7 und 10 h und zwischen 60 und 100 h (vgl. Abb. 5.9 oben links). Die zeitlich gleichen Maxima für das Modell mit den minimalen Wärmetransportparametern wiesen Höchsttemperaturen von 12,6 °C für das erste Maximum und 12,4 °C für das zweite Maximum auf (vgl. Abb. 5.9 oben rechts).

Lagen Fehlstellen vor, so wurden im Modell für die hohe Wärmeleitfähigkeitsumgebung folgende Werte errechnet: Im Bereich des Ausbruchs lagen die Temperaturen des ersten und des zweiten Maximums bei 12,6 und 12,4 °C (vgl. Abb. 5.9 unten links). Dem gegenüber steht die Fehlstelle, welche mit dem Ausbruchmaterial teilverfüllt wurde, mit Temperaturen der beiden Maxima von 11,6 und 11,4 °C (vgl. Abb. 5.9 unten links). Die Temperaturen in der Fehlstelle der verdünnten Hinterfüllung lagen damit nur 0,4 bis 0,6 K oberhalb der ungestörten Untergrundtemperatur.

Lagen die gleichen Fehlstellen in dem Minimum-Wärmetransportparameterszenario vor, wurden Temperaturen von 13,4 °C für das erste Temperaturmaximum und 13,3 °C für das zweite Temperaturmaximum berechnet (vgl. Abb. 5.9 unten rechts). Im Bereich der Verdünnung durch das Ausbruchmaterial lagen die maximalen ermittelten Temperaturen bei 11,9 und 11,6 °C und damit zwischen 0,6 und 0,9 K oberhalb der ungestörten Untergrundtemperatur.

5.3.4. EWS-Feldversuche

Die Hydratationstemperaturen der EWS aus Kapitel 3 wurden ebenfalls untersucht. Dabei zeigte die Messung der Hydratationstemperaturrentwicklung für EUS den Sachverhalt der zweigeteilten Verpressung deutlich auf (vgl. Kapitel 3 Abschnitt 3.2.1). Der erste Verpresszyklus hatte das Bohrloch bis in eine Tiefe von 6 muGOK verfüllt. Dabei wurden Temperaturen von 13 bis 14 °C erreicht. Zwischen 6 und 10 muGOK war nur eine geringe und kurzzeitige Auslenkung der Temperatur zu beobachten. Der zweite Verfüllzyklus, der 18 h nach dem ersten begann, hatte ein deutlich ausgeprägtes Temperaturmaximum mit Hydratationstemperaturen größer 18 °C. Diese Beobachtungen sind gültig für Vor- und Rücklauf (vgl. Abb. 5.10a).

Die Verteilung der Hydratationstemperaturen in DUS1 zeigte eine deutliche Dreiteilung der gemessenen Temperaturen. Von 1,5 bis 5 muGOK überwog der Einfluss der Oberflächentemperatur, was zu Temperaturen zwischen kleiner 11 °C und 14 °C führte. Direkt

unterhalb von 5 bis 10 muGOK schloss sich ein Temperaturmaximum mit bis zu 16 °C an. Dabei waren die erfassten Temperaturen am Rücklauf ca. 1 K niedriger als am Vorlauf. Von 10 bis 16 m lagen die maximal erreichten Temperaturen bei 14,5 °C (vgl. Abb. 5.10b).

Die während der Hydratation ermittelten Temperaturverteilungen in KOAX zeigten ähnliche Temperaturverteilungen für beide LWL, welche ein Maximum in Sondenfußnähe (ab 18 muGOK) zwischen 15 und 16 °C aufwiesen. Jedoch zeigte der aufwärts gerichtete LWL höhere Temperaturen in den Bereichen oberhalb des Temperaturmaximums als der abwärts verlaufende LWL. Die Differenz betrug bis zu 1 K (vgl. Abb. 5.10c).

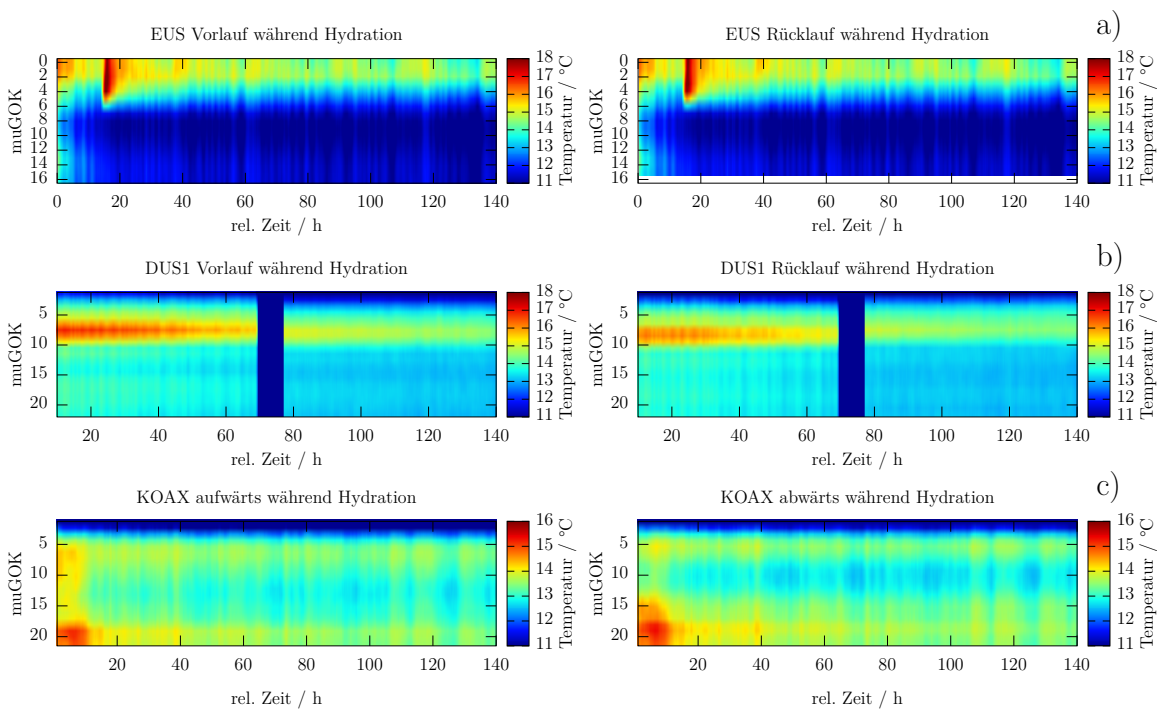


Abbildung 5.10.: Ergebnisse der DTS-Messungen für a) EUS, b) DUS1 und c) KOAX während der Hydratation der Hinterfüllung. Für DUS1 liegt hierbei während der Installation von DUS2 und KOAX eine Messunterbrechung vor, gekennzeichnet mit blauem Balken. Zeit angegeben relativ zum Messbeginn.

Während der Hydratation in DUS2 wiesen zwei Tiefenbereiche erhöhte Temperaturen auf. Dies ist der Bereich zwischen 1,5 und 10 muGOK sowie der Bereich zwischen 15 muGOK bis zum Sondenfuß. In beiden Bereichen wurden Maximaltemperaturen von 15 bis 16 °C gemessen. Bereiche niedriger Hydratationstemperaturen (12 bis 14 °C) lagen für alle LWL-Stränge vor und erstreckten sich je nach Strang über Tiefen zwischen 8

und 15 muGOK. Dabei zeigten jeweils die Vorläufe und die Rückläufe ähnliche Temperaturverteilungsmuster (vgl. Abb. 5.11).

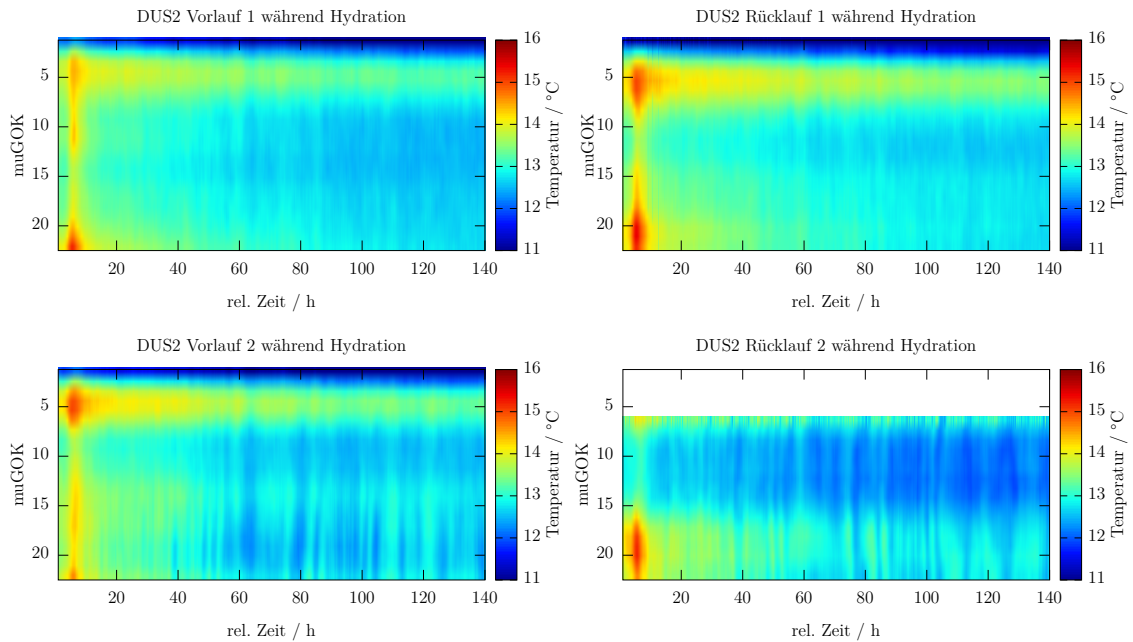


Abbildung 5.11.: Ergebnisse der DTS-Messungen in DUS2 während der Hydratation der Hinterefüllung. Dargestellt sind die Ergebnisse aller vier LWL-Stränge, weiße Bereiche kennzeichnen Bereiche, die von Datenverlust betroffen sind. Zeit angegeben relativ zum Messbeginn.

5.4. Diskussion: Hydrationswärme als Qualitätsmanagementwerkzeug

Der aus der Modellierung abgeleitete Laborversuch konnte die These belegen, dass eine Verdünnung des Zements durch Fremdkörper oder Fluide zu einer Veränderung des erwartbaren Temperatursignals führen kann. Dabei waren alle detektierten Fehlstellen im Versuch, mit Ausnahme der Auslenkung von S4, durch eine Reduktion der Temperatur im Bereich der Fehlstelle gekennzeichnet. Im Vergleich zwischen den Labordaten und der Vorhersage aus dem numerischen Modell gibt es jedoch mehrere deutliche Unterschiede.

So stimmen zwar die gemessenen erreichten Amplituden des Temperatursignals aus dem Laborversuch gut mit den erwarteten Signalstärken, die sich aus der Modellierung ergeben, überein (ca. 18°C), jedoch sind sowohl Zeitpunkt als auch Anzahl der gemessenen Maxima deutlich von den erwarteten Werten verschieden. Alle Temperaturverteilungen, die aus dem Modell ermittelt wurden, zeigen zwei zeitlich deutlich voneinander

getrennte Temperaturmaxima (vgl. Abb. 5.6 und 5.9). Im Vergleich dazu zeigen die Temperaturverteilungen des Laborversuches lediglich ein Maximum, welches zeitlich von den Maxima der Modellierung eingegrenzt wird (vgl. Abb. 5.12).

Bei genauerer Betrachtung eines Beispielintervalls über die Zeit, wobei hier die Referenzsäule genutzt wird, zeigt sich der Unterschied im Signal besonders deutlich (s. Abb. 5.12). Das gemessene Signal innerhalb der Säule S3 für das Tiefenintervall 1,04 m (s. Abb. 5.12 violett) zeigt einen sprunghaften Anstieg der Temperatur, der auf die Initialperiode der Zementhydratation (vgl. Abb. 2.7) zurückgeführt wird. Die anschließende dormante Periode, bei welcher wenig Wärme freigesetzt wird, führt aufgrund der vergleichsweise kurzen Dauer sowie der guten Isolation der Säule nicht zu einer Abkühlung der Säule. Beide Sachverhalte werden sowohl durch die Modellierung als auch durch die Messungen abgebildet.

Im Anschluss an die dormante Periode folgt die Hauptperiode der Hydratation, welche in ihrer Beschleunigungsphase verstärkt Wärme freisetzt. Dies führt dann zum Erreichen des ersten Temperaturmaximums. Aus dem Vergleich von Modell (s. Abb. 5.12 rote durchgezogene Linie, Anfangstemperatur an Laborbedingungen angepasst) und den DTS-Daten (s. Abb. 5.12 violette Linie) wird jedoch ersichtlich, dass dieses Maximum doppelt so lange für die Entstehung braucht, wie das Modell vorausgesagt hat (7 – 10 h gegen 15 – 20 h). Als mögliche Erklärung kommt hier die Reaktionsgeschwindigkeit der Zementhydratation in Betracht.

Der Erklärungsansatz kann dabei über die Temperatur der Zementsuspension sowie die Umgebungstemperatur der Säule abgeleitet werden. So ist die Reaktionskinetik der Zementhydratation temperaturabhängig (z.B. Adam, 2006; Locher, 2000). Dies leitet sich aus der Stoßtheorie ab, welche besagt, dass eine bestimmte Mindest(stoß)energie benötigt wird, damit stoßende Teilchen miteinander reagieren können. Da sich die Teilchen bei einer Temperaturerhöhung schneller bewegen und somit häufiger stoßen können, verbessert dies die Reaktionsfähigkeit der beteiligten Reaktanden. Eine aus der Arrhenius-Gleichung abgeleitete Faustregel gibt dabei an, dass mit einer Temperaturdifferenz von +10 °C sich die Reaktionsgeschwindigkeit ungefähr verdoppelt. Folglich muss sich die Reaktionsgeschwindigkeit ungefähr halbieren, wenn die Versuchsbedingungen 10 °C unterhalb der Referenzdaten liegen. Dies ist für die hier betrachteten Versuche und Modellierungen deshalb von Interesse, da davon ausgegangen werden kann, dass die Ermittlung der Wärmefreisetzungskurve bei typischen Laborbedingungen von 20 - 25 °C durchgeführt wurde. Damit liegen die Temperaturen, bei welchen die Wärmefreisetzung ermittelt wurde, um 8 bis 13 °C über den Temperaturen, bei welchen der vorgestellte

Laborversuch durchgeführt wurde. Dies kann eine Erklärung für das verspätete Auftreten der Temperaturmaxima aufgrund einer verlangsamten Reaktion durch niedrigere Temperaturen sein. Die Faustregel verliert jedoch an Aussagekraft, je dichter man dem Punkt kommt, an welchem die Reaktion nicht mehr stattfinden kann. Für die Hydratation der Zementsuspension ist dies 0 bzw. $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, wenn das Wasser als Festphase vorliegt. Auf eine tatsächliche Halbierung der Reaktionsgeschwindigkeit kann also nicht geschlossen werden.

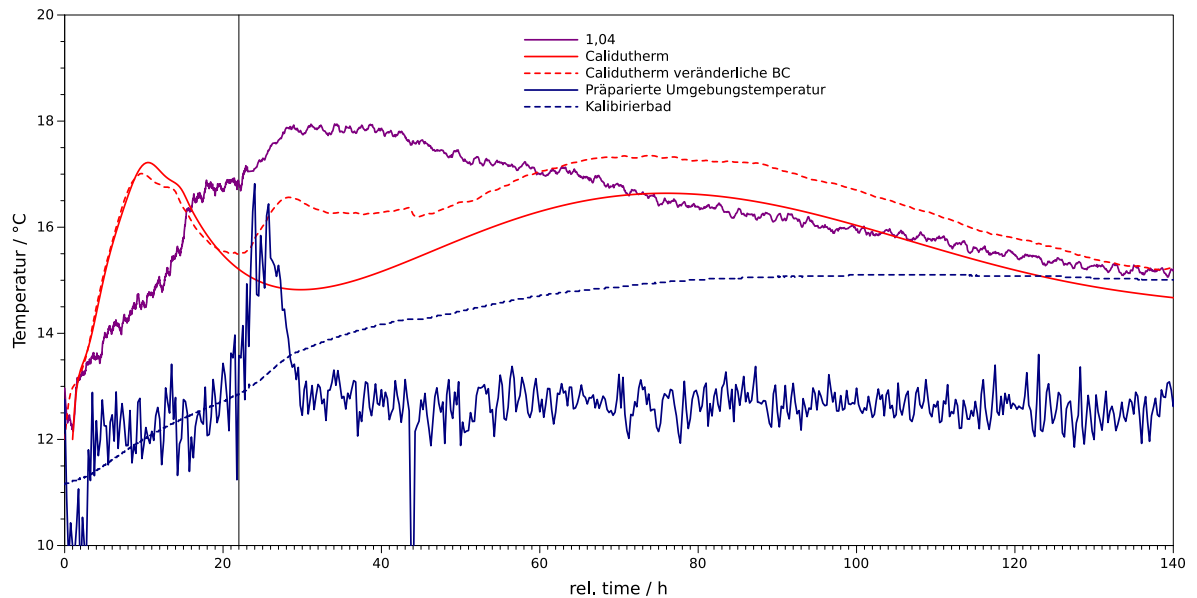


Abbildung 5.12.: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Modell und aus dem Laborversuch. Die Ergebnisse zeigen eine starke Beeinflussung durch die Umgebungstemperatur, die mit DTS ermittelt wurde. Die Modellergebnisse sind mit Calidutherm gekennzeichnet, 1,04 ist das Säulenintervall der Säule S3, aus welchem die experimentellen Daten stammen. Die vorübergehende Schwankung im Umgebungstemperatursignal war stark genug, um das Kalibrierbad zu beeinflussen. Zeit angegeben relativ zum Messbeginn.

Ebenfalls auffällig im Vergleich der Modelldaten und der gemessenen Daten ist, dass die gemessenen Daten erst nach der ersten Plateauphase in das eigentliche Maximum übergehen. Als mögliche Erklärung kommen hier Umwelteinflüsse auf das Experiment in Frage. Um dies zu überprüfen, wurden aus den Lichtwellenleiterzuleitungen zu den Säulen die Umgebungstemperaturen des Versuches annäherungsweise bestimmt. Dabei wurden mehrere Punkte entlang der Strecke Säule – Kalibrierbad für die Temperaturmessung genutzt. Diese Temperaturen zeigen, dass zum Zeitpunkt des Überganges vom Plateau in das Temperaturmaximum ein Umgebungstemperaturmaximum erreicht wird. Dieses kann auf solare Einstrahlung zurückgeführt werden, da der Zeitpunkt ca. 24 –

27 h nach Versuchsbeginn, also am Nachmittag, liegt (s. Abb. 5.12 blaue durchgezogene Linie). Zu diesem Zeitpunkt wandert die Sonne über den Abschnitt der Versuchshalle, in welchem die Säulen aufgebaut waren. Abgesehen von diesem Ereignis waren die Temperaturen der Versuchshalle relativ stabil und lagen zwischen 12 und 13 °C. Die gezeigten Umgebungstemperaturen können dabei jedoch lediglich als qualitativer Indikator gesehen werden, da sie überwiegend in Bodennähe aufgezeichnet wurden. Aus dem Abkühlverhalten der Versuche (vgl. Abb. 5.7) wird jedoch ersichtlich, dass in der Versuchshalle eine Temperaturschichtung vorliegen muss, welche sich durch verstärktes Abkühlen mit zunehmender Nähe zum Sondenfuß auszeichnet. Der Einfluss des Temperaturereignisses wurde dabei durch die Rettungsdecken gemildert, da diese die direkte Aufheizung durch Wärmestrahlung abschwächte. Der Anstieg der Umgebungstemperatur in der Versuchshalle muss jedoch so groß gewesen sein, dass selbst das stark isolierte Kalibrierbad eine, auf das Temperaturereignis zurückzuführende, Temperaturanomale zeigt (s. Abb. 5.12 blaue gestrichelte Linie).

In einem zweiten Überprüfungsschritt wurde dann untersucht, wie das genutzte Vorhersagemodell auf die angenäherten Umgebungstemperaturen aus der DTS-Messung reagiert. Es wurde hierbei deutlich, dass das Temperaturereignis einen klaren Einfluss auf die Ergebnisse hat. Im Modell erzeugt das Temperaturereignis Temperaturdifferenzen, die gut mit den gemessenen Werten des Laborversuches übereinstimmen. Lediglich die maximal erreichten Werte unterscheiden sich um ungefähr 1,5 K, was durch die unbekannte, tatsächlich erreichte Umgebungstemperatur während des Temperaturereignisses sowie die Starttemperaturen kurz vor Erreichen des Maximums erklärt wird (vgl. Abb. 5.12 rot gestrichelt, violett).

Ungeklärt bleibt, warum es keinen Hinweis auf ein zweites Temperaturmaximum in der Temperaturmessung gibt. Möglicherweise ist aufgrund der niedrigen Umgebungstemperatur oder der schlechter als erwarteten Isolierung der Wärmeabfluss aus der Säule so groß, dass das zweite Maximum keine Ausprägung findet und sich stattdessen durch eine verlangsamte Abkühlung auszeichnet. Innerhalb dieser Versuchsreihe kann diese Frage jedoch keine Beantwortung finden, da keine, vom Temperaturereignis nicht betroffene, Versuchsanordnung für Vergleiche zur Verfügung steht.

Trotz der deutlich unterschiedlichen Temperatursignalausprägung zwischen Modellierung und Versuch zeigt sich jedoch eine Gemeinsamkeit. Bei reduziertem Zementgehalt im Ringraum, hervorgerufen durch Fluideinschlüsse oder Fremdkörper, kommt es in beiden Untersuchungen zu reduzierten Temperaturen im Bereich der Fehlstelle (vgl. Abb. 5.6 und 5.7). Besonders deutlich ist dies für die Säulen S2 (Kies-Beimengung) und S5

(Isolation). Bei beiden Säulen kommt es zu einer (Teil-)Verdrängung der Zementsuspension durch einen Fremdkörper. Die Theorie, dass der Fremdkörper die Wärmeentwicklung reduziert, da er selbst keine aufweist, konnte im Versuch bestätigt werden. Somit sind die Temperaturen innerhalb der Fehlstelle reduziert. Dabei ist es unerheblich, ob ein Fluideinschluss oder ein Festkörpereinschluss vorliegt.

Das numerische Modell zeigt zusätzlich, dass die Stärke der Temperaturentwicklung in der Fehlstelle direkt abhängig von der Menge des Fremdkörpers ist. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass es sich bei dem Modell um ein stark vereinfachtes Modell handelt. Die Temperaturabhängigkeit der Reaktionskinetik wird nicht betrachtet, ebenso werden die Wärmetransportparameter der Fremdkörper vernachlässigt, die Verteilung des Fremdkörpers im Zement wird als homogen angenommen. Ein Einfluss dieser Parameter auf die Ergebnisse des Laborversuchs kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Für die Säule mit der Wasserverdünnung ist die Interpretation der Ergebnisse dagegen uneindeutiger. Hier würde eine mögliche Veränderung des Temperatursignals nicht aus der Verdrängung von Zementsuspension resultieren, sondern aus der Veränderung der Reaktionsparameter. Dies wurde nicht numerisch abgebildet, weil die zugrunde liegenden Reaktionskinetiken der genutzten Hinterfüllung nicht vollständig bekannt waren. Die Versuchsdaten aus Abb. 5.7 S1 deuten daraufhin, dass die Verdünnung mit Wasser zu einer Reduktion der Wärmefreisetzung führt, was sich in einer verzögerten Aufheizung widerspiegelt. Bei genauerer Betrachtung der Daten zeigt sich jedoch, dass für den Bereich verzögerter Wärmefreisetzung unter anderem die geringen Anfangstemperaturen eine Rolle spielen können.

Die geringen Anfangstemperaturen resultieren dabei aus der zweiten Verfüllcharge, die für den dritten Verfüllzyklus von S1, S2 und S3 genutzt wurde. Für S3, die Referenz, wird diese niedrigere Temperatur im Verlauf der Hydratation kompensiert, sodass das Temperaturfeld relativ zeitgleich das erste Plateau erreicht. Für S1 und S2 gilt dies nicht. Ein Erklärungsansatz für S2 ist, dass der Kies die Wärme aus dem Zement ableitet, während sich seine Temperatur angleicht, sodass die leichte Verzögerung durch niedrigere Anfangstemperaturen stärker hervortritt. Dies kann auch teilweise zur Erklärung der Temperatursignalverzögerung in S1 genutzt werden. Das Wasser für die Verdünnung wurde nach dem Anmischprozess hinzugegeben. Das bedeutet, dass es in die bereits gestartete Initialperiode gegeben wurde. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser kann selbiges dann eine große Menge Energie aus der Zementsuspension aufnehmen, bevor die Temperatur steigt. Es kann allerdings ebenfalls nicht ausgeschlossen

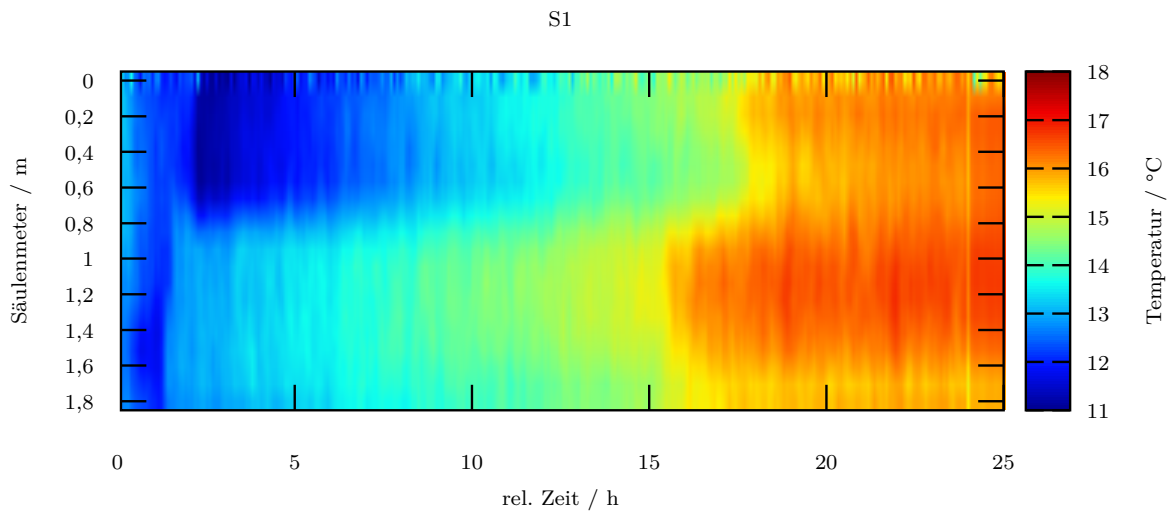


Abbildung 5.13.: Reduzierung des Betrachtungsbereiches von S1 auf die ersten 25 h. Der oberste Bereich zeigt eine starke Beeinflussung durch die Umgebungstemperatur, gekennzeichnet durch kurzzeitig wechselnde Temperaturen. Die Stufen im Bereich um 2 h entsprechen den Füllständen der unterschiedlichen Verfüllzyklen. Zeit angegeben relativ zum Messbeginn.

werden, dass die Zugabe von Wasser die Reaktionsgeschwindigkeit der Zementhydratation verringert hat und das Temperatursignal aus diesem Grund verzögert auftritt.

Dass für S4, die Säule mit der Auslenkung, kein deutlich von der Referenz S3 verschiedenes Signal aufgezeichnet werden konnte, wird auf die Isolierung zurückgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Isolation ausreichend ist, die Gradienten im Inneren des Zementkörpers sehr klein zu halten. Aufgrund dessen sind die Temperaturunterschiede zwischen den beiden Säulen zu gering, um durch DTS erfasst zu werden.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse im Laborversuch wurden die Säulen S1, S2 und S3 geöffnet. Bei S4 wurde davon ausgegangen, dass die Wärmetransportparameter aufgrund der ähnlichen Temperatursignale vergleichbar mit denen der Referenz sind. Im Gegensatz dazu wurde S5 nur aufgetrennt, um zu überprüfen, ob der Zement hinter die Isolierung gedrungen ist, was nicht der Fall war. Da die Isolierung ein mit dem Zement nicht mischbarer Fremdkörper ist, wurde von einer Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit abgesehen. Von besonderem Interesse war S1, die Säule mit wasserverdünntem Zement. Da nicht eindeutig geklärt wurde, woher die Verzögerung des Temperatursignals stammt, wurde versucht, eine Klärung über eine mögliche Änderung der Wärmetransportparameter herbeizuführen.

Dabei zeigte sich, dass die drei Säulen in den ungestörten Bereichen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 1 und $1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aufweisen. Die gestörten Bereiche in S1 sowie S2 wiesen zu den ungestörten Bereichen verschiedene Wärmeleitfähigkeiten auf. Dabei wiesen Bereiche, die mit Wasser verdünnt wurden, niedrigere Wärmeleitfähigkeiten auf als die ungestörten Bereiche. Diese Bereiche decken sich sehr gut mit dem Bereich von S1, in welchem der verzögerte Temperaturanstieg beobachtet werden konnte (vgl. Abb. 5.8 und Abb. 5.13). Ein möglicher Erklärungsansatz dafür ist, dass mit Veränderung des Chemismus der Zementsuspension die Hydratation zu Ungunsten der Wärmeleitfähigkeit abläuft. Unter Umständen werden Mineralphasenzusammensetzungen gebildet, die Wärme schlechter leiten. Rein äußerlich ist eine Unterscheidung jedoch nicht möglich und eine Mineralzusammensetzungsanalyse wurde nicht durchgeführt, unter anderem deshalb, da ein „perfekter“ Vergleichskörper fehlte.

Im Gegensatz dazu wurden in S2, dort, wo eine Messung durchgeführt werden konnte, für den Bereich der Fehlstelle erhöhte Wärmeleitfähigkeiten angetroffen. Erklärt werden können sie durch das Sedimentieren von Kies aus der Fehlstelle in die darunter liegende Zementsuspension. In diesem Fall würde der eingetragene Kies die effektive Wärmeleitfähigkeit der Mischung von Zementsuspension und Kies erhöhen. Leider war es nicht möglich, die Messungen im Bereich der vollständig ausgeprägten Fehlstelle durchzuführen. Dies lag daran, dass die Messstelle völlig inhomogen war. Im Schnitt waren 50 bis 75 % der Säule im Bereich der Fehlstelle mit reinem Kies verfüllt. Der Zement wurde fast ausschließlich in den Bereichen angetroffen, in welchen das Verpressrohr lag und während des Verpressens gezogen wurde. Eine Vermischung von Zementsuspension und Kies scheint nur in äußerst geringem Umfang vonstatten gegangen zu sein. Infolgedessen konnten die resultierenden Zementkörper nicht gebohrt werden, ohne dass sie zersprangen. Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem KD2Pro musste entfallen. Zur besseren Veranschaulichung der Ausprägung der Fehlstelle ist diese in Abb. 5.14 abgebildet. Die asymmetrische Verteilung von Zement und Kies kann nicht übersehen werden.

Mit den Erkenntnissen aus den Laborversuchsmodellierungen sowie dem eigentlichen Versuch konnte gezeigt werden, dass die Detektion von Fehlstellen in der Hinterfüllung mit Temperaturmessungen während der Hydratation generell möglich ist. Vor allem Fehlstellen, welche auf Fremdkörpereintrag basieren, waren gut im Laborversuch nachzuweisen. Jedoch kann auf diese Weise lediglich das Vorhandensein einer Anomalie in der Hinterfüllung festgestellt werden. Die Temperaturmessung selbst gibt aber weder Information über die Art der möglichen Fehlstelle, noch wie gravierend sie ausgeprägt



Abbildung 5.14.: Ausprägung der Fehlstelle im Zement durch das Einbringen von Kies. Der überwiegende Teil des Zements dringt nicht in den Kies ein, welcher locker angetroffen wurde. Zement befindet sich überwiegend im Bereich des gezogenen Verspressrohres.

ist (vgl. Abb. 5.14). Die Ergebnisse stehen damit im Einklang zu entsprechender Aussage von Baumann (2008). Die detektierten Anomalien müssen im Nachhinein weiter untersucht werden, zum einen auf die Frage, ob sie in einem Gefährdungsbereich liegen und zum anderen, welcher Art die Anomalie ist. Der Vorteil von DTS-Messungen während der Hydratation ist hierbei, dass mögliche Fehlstellen bereits während der ersten 10 – 20 h nach Installation detektiert werden können. Die Fehlstellen haben, soweit dies mit den hier gezeigten Versuchen abgedeckt werden konnte, auch einen Effekt auf die Wärmetransportparameter. Vor allem für die Säule mit der Wasserverdünnung konnte dies gut gezeigt werden, vergleichbare Effekte wurden aber auch für die Kiesfehlstelle nachgewiesen.

Des Weiteren hat der Vergleich Referenz – Auslenkung gezeigt, wie stark der Einfluss der Umgebungswärmetransportparameter auf die Detektierbarkeit der Fehlstellen ist. In den bis hierher vorgestellten Arbeiten wurde eine stark isolierende Umgebung gewählt. Dies hilft zum einen, Umwelteinflüsse abzuschwächen, und zum anderen, das Signal zu verstärken und somit eine Detektion zu vereinfachen. Dennoch hat dieses Verfahren den Nachteil, dass damit keine realistische Signalstärkeabschätzung für eine Untergrundanwendung abgeleitet werden kann. Aus der VDI 4640 (VDI, 2010) wird ersichtlich, dass

die niedrigste erwartbare Untergrundwärmeleitfähigkeit im Bereich von $0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ liegt. Dies ist deutlich oberhalb der Wärmeleitfähigkeit der genutzten Isolation. Aus diesem Grund war es notwendig, eine weitere Modellstudie durchzuführen, an welcher untersucht werden konnte, ob und wie unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten das Temperatursignal verändern.

Die Ergebnisse dieser Modellierung zeigen den Effekt der Wärmeleitfähigkeit der Umgebung auf die Signalstärke deutlich auf. Konnten in den Ergebnissen des Laborversuches und der zugehörigen Modellierung noch Temperaturdifferenzen von bis zu 6 K erreicht und für die Fehlstellendetektion genutzt werden, so liegen die Temperaturdifferenzen im Untergrundmodell bei lediglich 0,6 bis 2,1 K (vgl. Abb. 5.9). Dabei zeigt das Modell eine reduzierte Signalstärke für Umgebungen hoher Untergrundwärmeleitfähigkeit während der Hydratation auf. Sinkt die Wärmeleitfähigkeit der Umgebung, steigen die Temperaturen in der Erdwärmesonde an.

Für die Temperaturmessung mit DTS an EWS bedeutet dies zweierlei. Erstens ist es möglich, dass das emittierte Signal der Fehlstelle nicht von der Hintergrundtemperatur zu unterscheiden ist. Zweitens kann alleine durch die unterschiedliche vorliegende geologische Struktur und Schichtung eine Signalverteilung generiert werden, die einer Fehlstelle ähnelt und entsprechend verwechselt werden kann.

Auch hat diese Modellierung gezeigt, dass das Verfüllen von Hohlräumen in EWS-Nähe ebenfalls über eine Temperaturmessung nachgewiesen werden kann, wie bereits von Radioti et al. (2015) vermutet. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Fehlstellen führt dies zu einem großen Volumen an Zement im Untergrund, was zu erhöhten Temperaturen führt (vgl. Abb. 5.9). Jedoch besteht auch hier die Problematik der Uneindeutigkeit des Signals.

Aus den erzielten Erkenntnissen können somit zwei fortführende Aussagen abgeleitet werden: a) Die Detektion von Fehlstellen der Hinterfüllung einer EWS über Temperaturmessungen ist nur dann eindeutig, wenn die umgebende Geologie als hinreichend homogen angenommen werden kann oder Vergleichsdaten vorliegen, die eine erweiterte Interpretation des Temperatursignals ermöglichen; b) Die zu erwartenden Signale haben unter Umständen nur geringe Auslenkungen, auf eine dementsprechende Aufbereitung und Sorgfalt ist während der Temperaturmessung zu achten.

Dabei ist abschließend anzumerken, dass die hier vorgestellten Ergebnisse streng genommen nur für die genutzte Hinterfüllung gelten. Andere Hinterfüllungen haben entsprechend ihrer Zusammensetzung unterschiedliche erwartbare Wärme- und damit Temperaturentwicklungen. Die Daten zeigen jedoch die qualitativ zu erwartende Tempera-

turverteilung in EWS während der Hydratation einer zementbasierten Hinterfüllung. Weitere Einflüsse auf das erwartbare Temperatursignal rühren unter anderem noch von der Mischtechnik zur Erstellung der Zementsuspension und dem Wasser:Zement-Verhältnis her. Diese Parameter sind von EWS-Einbau zu EWS-Einbau verschieden und unterschiedlich schwer zu überwachen.

Hydrationswärme in EWS

Die Untersuchung der Übertragbarkeit der Laborversuche in das Feld bot sich anhand der Hydratationstemperaturdaten aus den Feldversuchen an den EWS EUS, DUS1, DUS2 und KOAX an. In den Daten der unterschiedlichen Sonden fallen dabei mehrere Gemeinsamkeiten auf. Während der Hydratation sind dies vor allem drei Kernbeobachtungen: a) In allen Sonden konnte, unabhängig von Geometrie und genutzter Hinterfüllung, ein auf die Hydratation zurückzuführendes Temperatursignal erfasst werden; b) die Stärkeverteilung des Temperatursignals ist nicht homogen über die Länge der Sonde für einen LWL, unterschiedliche Maxima/Minima werden ausgebildet; c) die Temperaturverteilung an den LWL-Strängen der unterschiedlichen EWS ist ebenfalls nicht gleichmäßig, Maxima/Minima für einen LWL einer EWS müssen nicht mit einem benachbarten LWL der gleichen EWS übereinstimmen.

Neben der Feststellung, dass durch Hydrationswärme bedingte Temperaturmaxima in den EWS auftreten, ist eine weitere interessante Beobachtung, dass die Maxima in jedem der Stränge unterschiedlich sein können (s. z.B. Abb. 5.10). Dies entspricht den Beobachtungen während des TRT und des Abkühlens (z.B. Abb. 3.2 & 4.4). Trotz annehmbarer vergleichbarer geologischer Bedingungen (vgl. Abb. 2.4) treten die Temperaturmaxima/-minima nur bedingt in den gleichen Tiefen auf. Folglich wurden auch hier die Hydratationstemperaturen gemittelt, um eine durchschnittliche Hydrationsmaximaltemperatur zu erhalten.

Die gemittelten Hydrationsmaximaltemperaturen weisen Gemeinsamkeiten zwischen den Sonden auf (vgl. Abb. 5.15). So tritt in allen Sonden ein Hydratationstemperaturmaximum im Bereich der vadosen Zone auf (0 – 10 muGOK), was aus den TRT- und Abkühltdaten zu erwarten war. Gleichzeitig zeigen DUS2 und KOAX mit der Tiefe wieder zunehmende Hydrationsmaximaltemperaturen. In geringerem Umfang und bezogen auf die geringere Länge der Sonde stimmt dies auch für EUS. Lediglich DUS1, installiert in die Kernbohrung, zeigt diesen Trend nicht. Für DUS1 sind die Hydrationsmaximaltemperaturen unterhalb des Grundwasserspiegels konstant.

Die erhöhten Hydrationsmaximaltemperaturen in Sondenfußnähe, bei Nutzung gleicher Hinterfüllung pro EWS, resultieren dabei möglicherweise aus der Spülung während der Bohrung. Vor Bergung des Bohrgestänges wurde die Spülung der Bohrung fortgesetzt, obwohl kein Vortrieb durchgeführt wurde. Entsprechend ist es möglich, dass zusätzlich Bohrgut gefördert und damit das Volumen der Bohrung in Sondenfußnähe vergrößert wurde. Entsprechend den Erkenntnissen aus den Modellierungen kann dies dann zu erhöhten Hydrationsmaximaltemperaturen führen. Allerdings gehen diese Bereiche ebenfalls mit einer reduzierten relativen hydraulischen Leitfähigkeit einher (vgl. Abb. 5.16). Unter der Annahme der Vergleichbarkeit der geologischen Bedingungen tut sich jedoch die Frage auf, warum eine entsprechende Zunahme der Hydrationsmaximaltemperatur nicht auch für DUS1 beobachtet wurde.

Für die Sonden EUS und DUS1 erscheint eine genauere Untersuchung der Hydrationsmaximaltemperaturen dabei von besonderem Interesse. Beide Sonden weisen Abweichungen in den Hydrationsmaximaltemperaturen auf, die nur jeweils in dieser Sonde auftreten. Die auffälligere Abweichung ist dabei in EUS zu finden.

Für EUS wurde ein Hydrationsstemperturminimum im Bereich des Verpressstops detektiert. Im Tiefenintervall, in welchem die Verpressung unterbrochen wurde, steigen die Temperaturen kaum über die ungestörte Untergrundtemperatur (11 °C, vgl. Abb. 5.15 EUS). Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass das DTS-Messintervall den Zementpiegel schneidet und somit der DTS-Messmeter nur teilweise in der Suspension liegt. Bei der Fortsetzung der Verpressung sind die tieferen Bereiche dann bereits wieder ausgekühlt und der Effekt wiederholt sich. Auffällig ist, dass die erreichten Hydrationsmaximaltemperaturen für den zweiten Verpresszyklus deutlich höher liegen. Eine genauere Untersuchung hat jedoch gezeigt, dass dies überwiegend auf die Nutzung von wärmerem Anmischwasser zurückzuführen ist, welches möglicherweise auf der Baustelle zwischengelagert wurde. Zusätzlich wurde Bohrgut (Kies) in die Bohrung zurückgeführt, wohl um den Mangel an Zementsuspension durch Verdrängung zu reduzieren. Dies war nicht erfolgreich. Aus den Laborversuchen ist des Weiteren bekannt, dass der Kies unter Umständen gravitativ nicht weit in den Zement eingedrungen ist und somit im Bereich des Zementpiegels während des Verpressstops akkumuliert vorliegt, was ebenfalls zu niedrigen Hydrationsmaximaltemperaturen führen kann.

Die zweite Hydrationsstemperturabweichung von Interesse liegt in DUS1 zwischen 5 – 10 muGOK. In diesem Tiefenintervall wurde ein sprunghafter Anstieg in den Hydrationsmaximaltemperaturen detektiert (vgl. Abb. 5.15 DUS1). Gleichzeitig ist dies die höchste Hydrationsstempertur, die in dieser Versuchsreihe überhaupt gemessen wurde. Ein Ein-

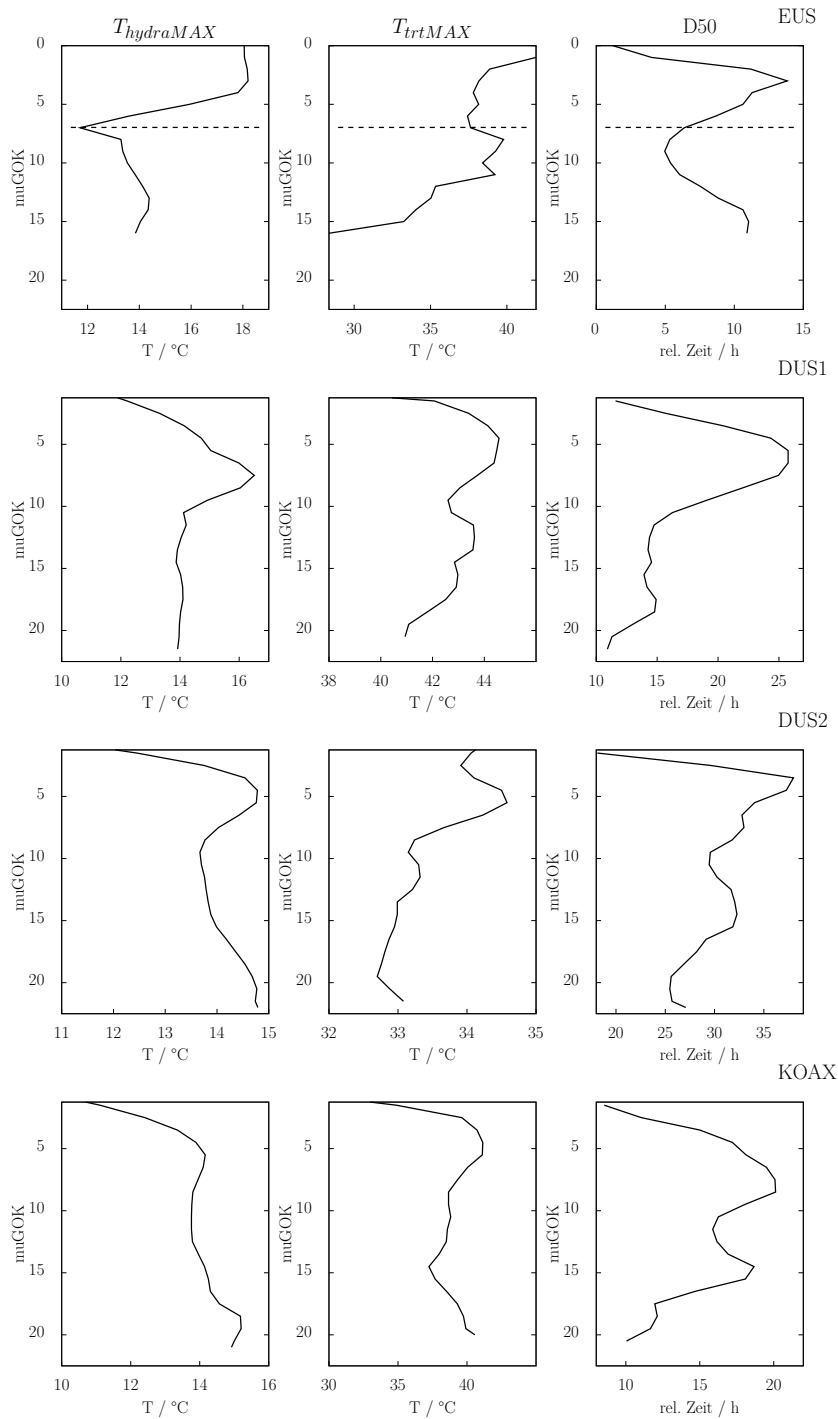


Abbildung 5.15.: Gegenüberstellung der Tiefenprofile für die Hydrationsmaximaltemperatur ($T_{hydraMAX}$), eTRT-Maximaltemperaturverteilung (T_{trtMAX}) und die Verteilung von D50 für die EWS EUS, DUS1, DUS2 und KOAX. Die gestrichelte Linie gibt den Bereich des Verpress-stops an.

fluss unterschiedlich temperierten Anmischwassers kann hier ausgeschlossen werden, da in einem Zug verpresst und Wasser ohne Zwischenlagerung aus einer Quelle verwendet wurde. Entsprechend der Modellierung wird davon ausgegangen, dass es sich bei diesem Temperaturmaximum tatsächlich um eine Bohrlochvolumenvergrößerung handelt und dementsprechend eine Fehlstelle detektiert wurde.

Für alle Sonden wurde dabei die Beobachtung gemacht, dass die Hydrationsmaximaltemperaturen nur bedingt mit den gefundenen hydraulischen Gegebenheiten des Testfeldes übereinstimmen. Zwar stimmen Bereiche mit durchschnittlich niedrigen relativen hydraulischen Leitfähigkeiten gut mit Bereichen höherer gemessener Hydrationsmaximaltemperaturen überein, die räumliche Auflösung der Abkühlmessungen im Anschluss an die TRT wird jedoch nicht erreicht (vgl. Abb. 5.15 $T_{hydraMAX}$ & D50 und Abb. 5.16).

Während die Ergebnisse von EUS und DUS1 die Möglichkeit einer Detektierbarkeit von Fehlstellen anhand der Temperaturmaxima während der Hydratation nahe legen, bestätigen die Hydrationsmaximaltemperaturen von DUS2 und KOAX die Vermutung aus den TRT und den Abkühlversuchen, dass die Positionierung der LWL einen entscheidenden Einfluss auf das Temperatursignal hat.

Für die Erläuterung wird hier DUS2 genutzt, welche den größtmöglichen Umfang an ausgewerteten Datenpunkten hat. Grund dafür ist, dass die Faser nicht wie in DUS1 am Sondenfuß, sondern auf dem letzten Drittel des zweiten Aufstiegs des LWL gebrochen ist. Dies ermöglichte, trotz verstärkten Rauschens aufgrund von Laserpulsreflexionen am gebrochenen Faserende, eine Auswertung von vier fast vollständig vorhandenen LWL-Strängen. Dabei zeigte sich vor allem, dass die Temperatursignale nicht wie bei EUS und DUS1 symmetrisch waren, sondern dass alle vier Stränge über eine eigene Temperaturverteilung verfügen, die von ihren Nachbarsträngen unterschiedlich sein kann. Jeder Strang wies mindestens ein deutliches Temperaturmaximum auf, die Lage unterschied sich jedoch stark. So konnte für alle LWL, für die ein Signal in der ungesättigten Zone vorhanden war, gezeigt werden, dass hier erhöhte Temperaturen vorliegen (vgl. Abb. 5.11). Die Amplituden sind jedoch um bis zu 1,2 K voneinander verschieden. Da die Maximaltemperaturen nicht mit geologischen Strukturen korrelieren, kann davon ausgegangen werden, dass Maxima ausschließlich bedingt durch die Lage des LWL generiert werden können. Aus diesem Grund erscheint die gemittelte Hydratationstemperaturverteilung besser geeignet zur Detektion von möglichen Fehlstellen.

Zusammenfassend können mehrere Aussagen zur Detektierbarkeit von Fehlstellen während des Hydrationsvorganges der Hinterfüllung getroffen werden: a) Das Temperatursignal selbst ist in stark heterogenen geologischen Gegebenheiten uneindeutig. Damit wer-

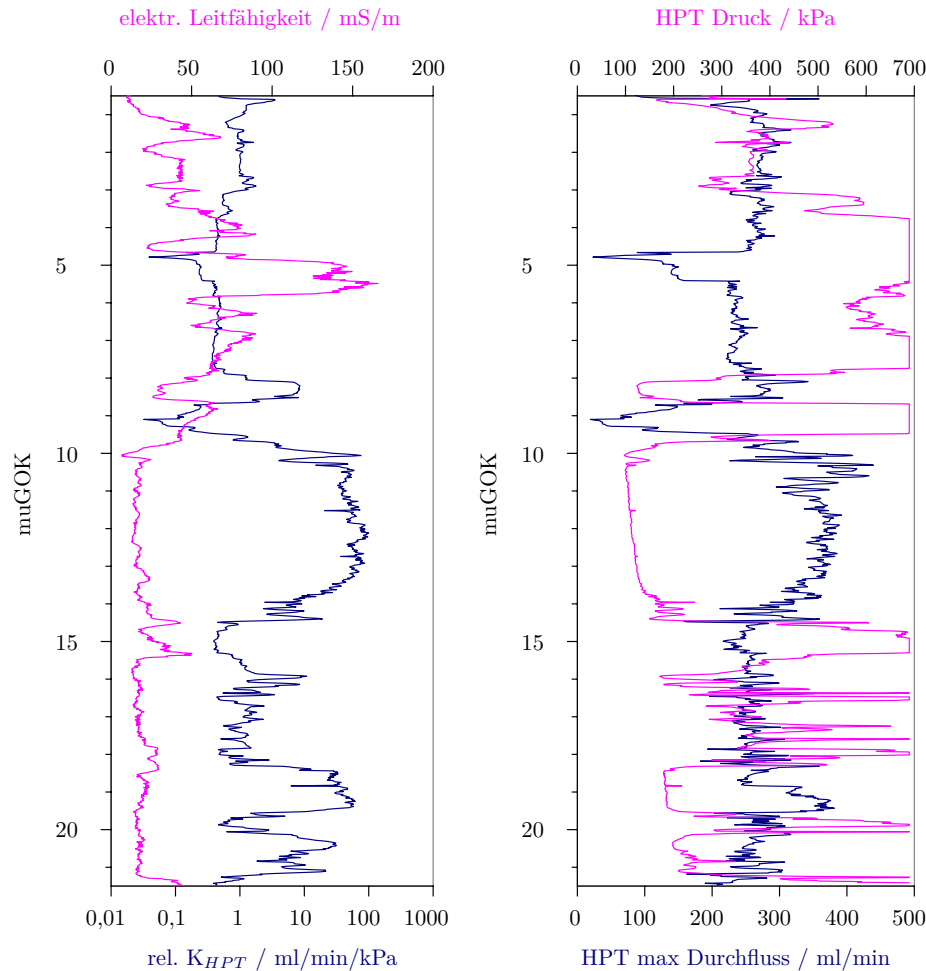


Abbildung 5.16.: Ergebnisse der HPT-Daten und des EC-Logs rechts, links Darstellung des erzielten Durchflusses gegen den benötigten Einspeisedruck. Gute relative hydraulische Leitfähigkeiten liegen in den Bereichen von 10 – 14 und 18 – 21,5 muGOK vor.

den dementsprechende Aussagen von Baumann (2008) bestätigt; b) Dennoch ist unter bestimmten Umständen mit höherer Wahrscheinlichkeit auf eine Fehlstelle in der Hinterfüllung zu schließen. Diese Umstände treten dann ein, wenn der Untergrund im Bereich der gemessenen Temperaturanomalien als hinreichend homogen angenommen werden kann, wie in dieser Arbeit die ungesättigte Zone; c) Die Detektion von Ausbrüchen bzw. mit Hinterfüllung verfüllten Hohlräumen im Untergrund erscheint in diesen Arbeiten als die einfacher zu detektierende Fehlstelle zu sein aufgrund der geringeren Möglichkeiten, wie ein entsprechendes Temperatursignal entstehen kann (erhöhter Zementanteil, tiefere Lage des LWL im Zement). Dem gegenüber stehen die reduzierten Temperaturen, die als Indikator für Fehlstellen wie Dezentrierung, Verdünnung oder Grundwasserströmung

komplizierter zu analysieren sind; e) Die gemittelte Hydrationsmaximaltemperatur der EWS erscheint als geeigneter zur Untersuchung möglicher Fehlstellen der Hinterfüllung zu sein als die Untersuchung der einzelnen Stränge, da die Messungen, vor allem an DUS2, aber auch an KOAX, gezeigt haben, wie stark der Einfluss der Positionierung des Sensors auf das Ergebnis ist.

Der große, resultierende Vorteil der Überwachung der Hydratationstemperaturentwicklung stellt dabei die schnelle Verfügbarkeit der Daten bereits in den ersten zehn Stunden nach Einbau dar. Dies erlaubt eine schnelle Abschätzung, ob eine Gefährdung von Schutzgütern vorliegen kann und möglicherweise qualitätssichernde Maßnahmen ergriffen werden müssen. Von besonderem Interesse ist hierbei, dass auch eine mögliche Dezentrierung frühzeitig erkannt werden kann, wenn die Daten unterschiedlicher LWL-Stränge gemeinsam ausgewertet werden können. Dies ist wichtig, weil als Konsequenz einer Dezentrierung das Schutzkriterium von 3 cm Hinterfüllungsstärke zwischen Bohrlochwandung und EWS-Verrohrung verletzt werden kann. Auch konnten die Aussagen von Riegger (2013) bestätigt werden, dass eine Detektion von Zementsuspensionsspiegeln möglich ist. Vor allem bei Baustopp kann dies von besonderem Interesse sein.

6. Fazit und Ausblick

Mit unterschiedlichen Experimenten wurde in der vorliegenden Arbeit demonstriert, wie eine Charakterisierung des Temperaturobreitungsverhaltens in Erdwärmesonden (EWS) helfen kann, Aussagen über den Untergrund und die Ausführungsqualität von EWS zu treffen. Gleichzeitig wurden aber auch die Limitierungen eines entsprechenden Ansatzes offensichtlich. Die Nutzung der zeitgemäßen DTS-Technik, bei welcher die Temperaturen entlang einer Glasfaser erfasst werden können, hilft dabei, die Daten in benötigter Qualität sowie räumlicher Auflösung kontinuierlich zu erheben. Besonders in Kombination mit bestehenden Ansätzen wie dem Thermal Response Test (TRT) können sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

Als ein bereits seit einigen Jahren in geothermalen Anwendungen genutztes Erkundungsverfahren wurde der TRT hier besonders auf seine Vergleichbarkeit in Sondenfeldern untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Sonden des gleichen Feldes nur bedingt gegeben ist. Die vier untersuchten Sonden haben selbstermittelte effektive Wärmeleitfähigkeiten zwischen $2,6$ und $3,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Betrachtet man zusätzlich die Werte unterschiedlicher Auftragnehmer für den gleichen Bereich, so vergrößert sich der Bereich auf $1,9$ bis $3,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Damit wurde gezeigt, dass die Auswertetechnik sowie der Operator einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis haben können. Des Weiteren scheint ein starker Einfluss auf die Ergebnisse aus dem Ausbau der Sonden zu entstammen. Darauf deutet ein direkter Vergleich zweier typgleicher EWS (Doppel-U, $21 - 22 \text{ m}$ Länge) hin. Hier wurden Schwankungsbreiten von $0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ermittelt. Neben der großen Schwankungsbreite der effektiven Wärmeleitfähigkeiten ist jedoch positiv zu bemerken, dass die Selbstausswertung der TRT durchaus realistische Werte bereitgehalten hat, wenn der Grundwasserstrom mit in die Interpretation einbezogen wird. Aus der Literatur erklärt sich der Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeiten in den Messungen gegenüber VDI-Werten durch Sedimentzusammensetzung und Grundwasserstrom. Weitere Versuche werden zeigen müssen, warum die Abweichung in den TRT zwischen den Sonden so groß ist und inwieweit somit eine Charakterisierung eines EWS-Feldes anhand eines oder zweier TRT zulässig sein sollte.

Neben den herkömmlichen TRT wurden eTRT durchgeführt, die eine tiefenabhängige Auflösung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten erlauben sollen. Prinzipiell war dies in den Versuchen der Fall, sodass für jedes Tiefenintervall eine effektive Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden konnte. Die gemittelten Ergebnisse des eTRT bilden die Ergebnisse der TRT ab. Aufgrund der versuchsbedingten Beschränkungen konnte jedoch der Leistungseintrag nicht korrigiert werden, was unter Umständen die erzielten Ergebnisse verzerrt. In den Ergebnissen haben sich dabei geologische Einheiten, wie die vadose Zone und der Grundwasserleiter, nicht in allen Sonden deutlich abgebildet. In dieser Versuchsserie scheint der Ausbau der EWS als Einflussfaktor für die Ergebnisse des eTRT wichtiger gewesen zu sein als die tatsächlichen geologischen Gegebenheiten. Aufgrund des komplexen Temperatursignals der Hinterfüllung sollten weitere Arbeiten zum eTRT durchgeführt werden. Von besonderem Interesse ist hierbei, wie groß die Abweichung zwischen herkömmlicher Auswertung anhand von Temperaturdaten aus dem Wärmeträgerfluid und Temperaturmessungen aus der Hinterfüllung ist, da dies hier nicht gemessen werden konnte.

Da der TRT ein sehr aufwendiger Versuch ist und für die Durchführung eine EWS benötigt wird, wurden Alternativen untersucht. Hierfür wurde die DTS-Technik in einem Aquifer eingesetzt, um Informationen über das relative Wärmespeichervermögen des Untergrundes zu sammeln. Durch gezieltes Aufheizen sowie durch Beobachtung des anschließenden Abkühlens wurden wertvolle Informationen über das Temperatúrausbreitungsverhalten im Untergrund gesammelt. Mit diesen Daten konnte gezeigt werden, dass Abkühlprozesse im Untergrund sowohl von der Sedimentzusammensetzung, als auch vom Grundwasserfluss abhängig sind und dass mit geeigneter Versuchsanordnung sehr feine Unterschiede aufgezeigt werden können. Der Vergleich mit geologischen Profilen sowie mit durch Direct-Push erhobenen Untergrundparametern hat gezeigt, dass vor allem Bereiche, die gering hydraulisch durchlässig sind, also plastische Bereiche (Schluff, Ton), ein gutes Wärmespeicherpotential haben. Diese Ergebnisse konnten in späteren Feldversuchen an EWS-Installationen bestätigt und auf die ungesättigte Zone ausgeweitet werden. Um das thermische Speicherpotential des Untergrundes beschreiben zu können, wurde hier auf normalisierte Abkühlzeiten zurückgegriffen. Die mobile Einrichtung entsprechender Messkonfigurationen sowie die Möglichkeit, sie in bereits bestehenden Piezometern einzusetzen, ermöglichen neue Ansätze in der Erkundung geothermischer Erschließungsgebiete und der Festlegung deren zukünftiger Nutzungsart.

Neben der ausschließlichen Beschreibung des thermischen Antwortverhaltens des flachen Untergrundes wurde zusätzlich speziell auf das Temperatúrausbreitungsverhalten

in EWS während der Hydratation eingegangen. Dabei war die Hauptfrage, ob und wie Fehlstellen in der Hinterfüllung von EWS anhand unterschiedlicher Temperatursignale nachgewiesen werden können. In einer Serie von Laborversuchen mit vorhergehender und angegliederter numerischer Modellierung wurde aufgezeigt, dass verschiedenartige Fehlstellen anhand eines veränderten Hydratationstemperatursignals gut nachgewiesen werden können. Dies betrifft Fehlstellen, die auf der Reduktion von zementhaltiger Hinterfüllung in der Bohrung basieren, sowie Fehlstellen, die in einer Vergrößerung des Bohrhohlraumes resultieren, wie etwa Ausschlagungen und Bohrlochkollaps. Damit wurde gezeigt, dass die Überwachung der Hydratationstemperaturentwicklung ein wertvolles Hilfsmittel in der Detektion von Fehlstellen in der Hinterfüllung darstellt. Als besonders vorteilhaft wurde hierbei angesehen, dass diese Messungen spätestens 10 bis 15 h nach Installationsprozess abgeschlossen sind. Dies ermöglicht das frühe Erkennen von Fehlstellen und ein rasches Abschätzen, ob weitere Maßnahmen getroffen werden müssen. Die Messungen haben aber auch gezeigt, dass die erfassten Signale nicht eindeutig einer bestimmten Fehlstellenart zugeordnet werden können. Folgeuntersuchungen können also notwendig werden. Auch hat sich gezeigt, dass die Signalantwort stark vom umgebenden Untergrund abhängig ist und im schlechtesten Fall zu einer Fehlinterpretation führen kann.

Die Ausweitung von Laborversuchen kann hierbei helfen zu verstehen, wie entstehende Fehlstellen ausgeprägt sind. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde die Zementsuspension rein gravitativ verpresst, was in der EWS-Einbaupraxis Anwendung findet. Dies kann unter Umständen dazu geführt haben, dass die Zementsuspension nicht tief in die Kiesfehlstelle eingedrungen ist. Weitere Laboruntersuchungen müssen zeigen, inwieweit eine Zementsuspension in Lockersedimenten in den Untergrund eindringt und welche Verpressdrücke dafür geeignet sind. Dies wird helfen, eine bessere Abschätzung über die tatsächliche thermische Ankopplung zu erhalten.

Auch die Bestätigung der beiden Ansätze zur thermischen Charakterisierung von Untergrund und EWS anhand einer Serie von Temperaturmessungen an unterschiedlichen EWS im Feld war sehr erfolgreich. Während der Hydratation konnten unterschiedliche Temperaturverteilungen ermittelt werden, die sowohl auf geologische Gegebenheiten, als auch auf Einbauunregelmäßigkeiten zurückgeführt wurden. An den unterschiedlichen Sonden konnten unterschiedliche Temperaturanomalien festgestellt werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass eine Interpretation von erhöhten Hydratationstemperaturen im Feld in der Regel einfacher erscheint als die Detektion von fehlerbedingten reduzierten Temperaturen. Hierbei tut sich die DTS-Technik deshalb hervor, da sie nach erfolgreicher

Durchführung der Messungen in der EWS verbleibt und somit für ein Langzeitmonitoring, ob zu Forschungszwecken oder zur Leistungsüberwachung, genutzt werden kann.

Zusätzlich konnte anhand der durchgeführten TRT gezeigt werden, dass in Bereichen der EWS, in welchen bereits Temperaturanomalien während der Hydratation festgestellt wurden, ebenfalls Unregelmäßigkeiten während der TRT auftraten. Vor allem in der Betrachtung der einzelnen Lichtwellenleiter(LWL)-Stränge entlang der EWS tritt dies zu Tage. Dabei wurde aus dem Vergleich der Temperaturverteilungen der unterschiedlichen Prozesse (Hydratation, TRT und Abkühlung) auf unterschiedliche Erklärungsansätze geschlossen. Zwei haben sich dabei als besonders vielversprechend erwiesen. Dies war zum einen das tatsächliche Auffinden einer Fehlstelle bzw. ein Wechsel in den geologischen Gegebenheiten und zum anderen hat sich die Positionierung des Sensors als elementar wichtiger Parameter für die Interpretation der Temperaturdaten hervorgetan. Die Positionierung des Sensors, also des LWL, allein kann zu einer Fehlinterpretation der Daten führen. Aus diesem Grund ist eine umsichtige sowie gewissenhafte Betrachtung und Beschreibung des Einbauvorgangs absolut notwendig, um zu vermeiden, dass potentielle Lageänderungen des LWL übersehen werden. Um dieser Problematik für eine vereinfachte Betrachtung aus dem Weg zu gehen, wurde hier entsprechend, in Anlehnung an den TRT, auf gemittelte Temperaturwerte zurückgegriffen.

Diese Arbeit zeigte hierbei aber auch, dass die Temperaturmessungen aktuell keinen eindeutigen Schluss auf die Ursache der nachweisbaren Temperaturanomalien zulassen. Es wurde aber festgestellt, dass anhand von EWS-Modellen auf unterschiedlichen Skalen, von Labor bis Technikum, in kontrollierten Umgebungen Verifikationsversuche durchgeführt werden können. So konnte in Laborversuchen z.B. die Hydratationstemperaturentwicklung untersucht werden sowie in Ansätzen der Effekt von teilweiser Isolierung der EWS. Vergleichbare, zukünftige Arbeiten können somit auch helfen, die Frage zu klären, wie stark die Lage des LWL innerhalb der Hinterfüllung das Temperatursignal beeinflusst und entsprechend vergleichen, wie ähnlich das lagebeeinflusste Temperatursignal zu Signalen aus unterschiedlichen Fehlstellen ist. Das wird helfen, die verschiedenen Fehlstellen bereits aus den Temperaturdaten heraus besser unterscheiden und entsprechende weitergehende Erkundungen mit alternativen Verfahren, z.B. geophysikalische Befahrung, besser planen zu können. Dabei bietet der Vergleich von geophysikalischen und geotechnischen DP-Verfahren und Temperaturverteilungen die Möglichkeit, zur alleinigen Temperaturmessung alternative Erkundungskonzepte zu entwickeln. Dies ist dann von Interesse, wenn die Systeme z.B. nicht mit DTS nachgerüstet werden können. Schlussendlich werden entsprechende weiterführende Arbeiten helfen, die bestehenden

Unsicherheiten bei Temperaturmessungen als Werkzeug des Qualitätsmanagement von EWS zu reduzieren. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Temperaturmessungen mit DTS über längere Zeiträume den Vorteil bringen, dass kontinuierliche Messungen von Einbau der EWS bis hinein in ihren Produktionszyklus ein Langzeitmonitoring des thermischen Verhaltens der jeweiligen EWS ermöglichen.

Trotz der aufgetretenen Schwierigkeiten und vorerst herrschenden Limitierungen erscheint die verteilte Temperaturmessung als ein sehr geeignetes Werkzeug zur Charakterisierung von EWS, vor allem in Hinsicht auf das Qualitätsmanagement und die EWS-Untergrund-Interaktion. Weiterführende Forschungsarbeiten sollten dementsprechend durchgeführt werden. Dabei sollte, aus den gewonnen Erkenntnissen dieser Arbeit abgeleitet, der Fokus auf Sensorpositionierung und Ausführungsqualität gelegt werden. Das ist notwendig, um das Risiko einer Fehlinterpretation zu minimieren und somit die Aussagekraft dieses Erkundungsansatzes zu stärken.

Literaturverzeichnis

- ACUÑA, J ; PALM, B: Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers. In: *Applied Energy* 109 (2013), Nr. 0, 312–320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.024>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2013.01.024. – ISSN 0306–2619
- ADAM, T: *Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2006
- AGILENT TECHNOLOGIES: *Agilent N4385A/N4386A Distributed Temperature System User's Guide*, 2007
- ALLEN, A ; MILENIC, D: Low-enthalpy geothermal energy resources from groundwater in fluvioglacial gravels of buried valleys. In: *Applied Energy* 74 (2003), Nr. 1–2, 9–19. [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00126-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00126-5). – DOI 10.1016/S0306–2619(02)00126–5. – ISSN 0306–2619. – Energex 2002 - New and Renewable Sources of Energy - Topic I
- ANDERSON, M: Heat as a Ground Water Tracer. In: *Ground Water* 43 (2005), Nr. 6, S. 951–968. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>. – DOI 10.1111/j.1745–6584.2005.00052.x
- ARMACELL GMBH: *AF/Armaflex Leistungserklärung*. 2016
- AROLA, T ; ESKOLA, L ; HELLEN, J ; KORRKA-NIEMI, K: Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow quaternary aquifers in Finland. In: *Geothermal Energy* 2 (2014), Nr. 1, 9. <http://dx.doi.org/10.1186/s40517-014-0009-x>. – DOI 10.1186/s40517–014–0009–x. – ISSN 2195–9706
- AROLA, T ; KORRKA-NIEMI, K: The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland. In: *Hydrogeology Journal* 22 (2014), Nr. 8, 1953–1967. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-014-1174-5>. – DOI 10.1007/s10040–014–1174–5. – ISSN 1435–0157
- BAKKER, M ; CALJÉ, R ; SCHAARS, F ; VAN DER MADE, K.-J ; HAAS, S de: An active heat tracer experiment to determine groundwater velocities using fiber optic cables installed with direct push equipment. In: *Water Resources Research* 51 (2015), Nr. 4, 2760–2772. <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR016632>. – DOI 10.1002/2014WR016632. – ISSN 1944–7973
- BANDYOPADHYAY, G ; GOSNOLD, W ; MANN, M: Analytical and semi-analytical solutions for short-time transient response of ground heat exchangers. In: *Energy and Buildings* 40 (2008), Nr. 10, 1816–1824. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.005>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2008.04.005. – ISSN 0378–7788
- BARBIER, E: Geothermal energy technology and current status: an overview. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (2002), Nr. 1–2, 3–65. [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3). – DOI 10.1016/S1364–0321(02)00002–3. – ISSN 1364–0321
- BAUMANN, K: *Zustandsanalyse von Brunnen, Grundwassermessstellen und Erdwärmesonden mittels innovativer Bohrlochmessverfahren*. 2008
- BEIER, R. A. ; ACUÑA, J ; MOGENSEN, P ; PALM, B: Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers. In: *Applied Energy* 102 (2013), 665–675. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.007>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2012.08.007. – ISSN 0306–2619. – Special Issue on Advances in sustainable biofuel production and use - XIX International Symposium on Alcohol Fuels - ISAF
- BEIER, R. A. ; SMITH, M. D. ; SPITLER, J. D.: Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. In: *Geothermics* 40 (2011), Nr. 1, 79–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.12.007>. – DOI 10.1016/j.geothermics.2010.12.007. – ISSN 0375–6505
- BERTANI, R: Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. In: *Geothermics* 41 (2012), 1–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.10.001>. – DOI 10.1016/j.geothermics.2011.10.001. – ISSN 0375–6505
- BLOEMENDAL, M ; OLSTHOORN, T ; BOONS, F: How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for Aquifer Thermal Energy Storage. In: *Energy Policy* 66 (2014), 104–114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.034>. – DOI 10.1016/j.enpol.2013.11.034. – ISSN 0301–4215

- BORINAGA-TREVIÑO, R ; PASCUAL-MUÑOZ, P ; CASTRO-FRESNO, D ; BLANCO-FERNANDEZ, E: Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT. In: *Applied Thermal Engineering* 53 (2013), Nr. 1, 13–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.12.036>. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2012.12.036. – ISSN 1359–4311
- BRIDGER, D ; ALLEN, D: Influence of geologic layering on heat transport and storage in an aquifer thermal energy storage system. In: *Hydrogeology Journal* 22 (2014), Nr. 1, 233–250. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-013-1049-1>. – DOI 10.1007/s10040-013-1049-1. – ISSN 1431–2174
- BRIELMANN, H ; LUEDERS, T ; SCHREGLMANN, K ; FERRARO, F ; AVRAMOV, M ; HAMMERL, V ; BLUM, P ; BAYER, P ; GRIEBLER, C: Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. In: *Grundwasser* 16 (2011), Nr. 2, S. 77–91. <http://dx.doi.org/10.1007/s00767-011-0166-9>. – DOI 10.1007/s00767-011-0166-9
- BUILDINGPHYSICS: *EED Earth Energy Designer 3.0*, 2008
- BUMBERGER, J ; PAASCHE, H ; DIETRICH, P: Systematic description of direct push sensor systems: a conceptual framework for system decomposition as a basis for the optimal sensor system design. In: *J. Appl. Geophys.*, Nr. 122, 210–217. <http://dx>
- BUNDESGESETZGEBER DEUTSCHLAND: *Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 30. November 2016 (BGBl. I S. 2749) geändert worden ist.* 1980
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU): Erneuerbare Energien in Zahlen Nationale und internationale Entwicklung. 2013. – Forschungsbericht
- BUTLER, J. J. ; HEALEY, J. M. ; MCCALL, G. W. ; GARNETT, E. J. ; LOHEIDE, S. P.: Hydraulic Tests with Direct-Push Equipment. In: *Ground Water* 40 (2002), Nr. 1, 25–36. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02488.x>. – DOI 10.1111/j.1745-6584.2002.tb02488.x. – ISSN 1745–6584
- BUTLER, J ; GARNETT, E ; HEALEY, J: Analysis of Slug Tests in Formations of High Hydraulic Conductivity. In: *Ground Water* 41 (2003), 09–10, Nr. 5, S. 620–630
- BUTSCHER, C ; HUGGENBERGER, P ; AUCKENTHALER, A ; BÄNNINGER, D: Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden. In: *Grundwasser* 16 (2011), Nr. 1, S. 13–24
- CHAMORRO, C. R. ; MONDÉJAR, M. E. ; RAMOS, R. ; SEGOVIA, J. J. ; MARTÍN, M. C. ; VILLAMAÑÁN, M. A.: World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies. In: *Energy* 42 (2012), Nr. 1, 10–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.005>. – DOI 10.1016/j.energy.2011.06.005. – ISSN 0360–5442. – 8th World Energy System Conference, {WESC} 2010
- CHIA-SHYUN, C ; CHING-RUNG, W: Analysis of Depth-Dependent Pressure Head of Slug Tests in Highly Permeable Aquifers. In: *Ground Water* 44 (2006), Nr. 3, S. 472–477. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00152.x>. – DOI 10.1111/j.1745-6584.2005.00152.x
- CHOI, W ; OOKA, R: Effect of disturbance on thermal response test, part 1: Development of disturbance analytical model, parametric study, and sensitivity analysis. In: *Renewable Energy* 85 (2016), S. 306–318
- CHOI, W ; OOKA, R: Effect of disturbance on thermal response test, part 2: Numerical study of applicability and limitation of infinite line source model for interpretation under disturbance from outdoor environment. In: *Renewable Energy* 85 (2016), S. 1090–1105
- CUI, P ; YANG, H ; FANG, Z: Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes. In: *Energy and Buildings* 40 (2008), Nr. 6, 1060–1066. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.005>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2007.10.005. – ISSN 0378–7788
- DECAGON DEVICES INC.: *KD2 Pro Thermal Properties Analyzer – Operators Manual*, 10 2014
- DEHKORDI, S. E. ; SCHINCARIOL, R: Thermal effect of hydrogeological factors on closed-loop ground source geothermal systems, 3rd International FEFLOW® User Conference, Berlin, 2012
- DEMTRÖDER, W: *Experimentalphysik 1*. Springer Spektrum, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-46415-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-46415-1>
- DICKINSON, J ; BUIK, N ; MATTHEWS, M ; SNIJDERS, A: Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. In: *Géotechnique* 59 (2009), Nr. 3, S. 249–260

- DIETRICH, P ; LEVEN, C: Direct Push-Technologies. In: KIRSCH, R (Hrsg.): *Groundwater Geophysics*. 2006, S. 321–340
- DIN EN 197, D: *DIN EN 197-1: Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*, 11 2011
- DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY (EUROPEAN UNION): *Heating and cooling*. web-site. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling>. Version: 2016
- DVGW-ARBEITSBLATT W 110 (2005) ; BONN WVGW: WIRTSCHAFTS- UND VERLAGSGESELLSCHAFT GAS UND WASSER MBH (Hrsg.): *Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen – Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen*.
- EROL, S ; FRANÇOIS, B: Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers. In: *Applied Thermal Engineering* 70 (2014), Nr. 1, 788–799. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.034>. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.034. – ISSN 1359–4311
- ESLAMI-NEJAD, P ; BERNIER, M: Freezing of geothermal borehole surroundings: A numerical and experimental assessment with applications. In: *Applied Energy* 98 (2012), 333–345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.047>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2012.03.047. – ISSN 0306–2619
- FAN, R ; JIANG, Y ; YAO, Y ; SHIMING, D ; MA, Z: A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection. In: *Energy* 32 (2007), Nr. 11, S. 2199–2209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.05.001>. – DOI 10.1016/j.energy.2007.05.001
- FERGUSON, G: Heterogeneity and Thermal Modeling of Ground Water. In: *Ground Water* 45 (2007), Nr. 4, S. 485–490. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00323.x>. – DOI 10.1111/j.1745–6584.2007.00323.x
- FLORIDES, G ; KALOGIROU, S: Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. In: *Renewable Energy* 32 (2007), Nr. 15, S. 2461–2478. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>. – DOI 10.1016/j.renene.2006.12.014
- FUJII, H ; OKUBO, H ; NISHI, K ; ITOI, R ; OHYAMA, K ; SHIBATA, K: An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. In: *Geothermics* 38 (2009), Nr. 4, 399–406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.06.002>. – DOI 10.1016/j.geothermics.2009.06.002. – ISSN 0375–6505
- GALGARO, A ; CULTRERA, M: Thermal short circuit on groundwater heat pump. In: *Applied Thermal Engineering* 57 (2013), Nr. 1–2, 107–115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.011>. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.011. – ISSN 1359–4311
- GEHLIN, S: *Thermal Response Test - Method Development and Evaluation*, Luleå University of Technology, Diss., 2002
- GEUZAINÉ, C ; REMACLE, J.-F: GMSH: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79 (2009), Nr. 11, S. 1309–1331. <http://dx.doi.org/10.1002/nme.2579>. – DOI 10.1002/nme.2579
- GREEN, R. O. ; EASTWOOD, M. L. ; SARTURE, C. M. ; CHRIEN, T. G. ; ARONSSON, M ; CHIPPENDALE, B. J. ; FAUST, J. A. ; PAVRI, B. E. ; CHOVIT, C. J. ; SOLIS, M ; OLAH, M. R. ; WILLIAMS, O: Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). In: *Remote Sensing of Environment* 65 (1998), Nr. 3, 227–248. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00064-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00064-9). – DOI 10.1016/S0034–4257(98)00064–9. – ISSN 0034–4257
- HAMADA, Y ; MARUTANI, K ; NAKAMURA, M ; NAGASAKA, S ; OCHIFUJI, K ; FUCHIGAMI, S ; YOKOYAMA, S: Study on underground thermal characteristics by using digital national land information, and its application for energy utilization. In: *Applied Energy* 72 (2002), Nr. 3–4, 659–675. [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00055-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00055-7). – DOI 10.1016/S0306–2619(02)00055–7. – ISSN 0306–2619
- HANSEN, C ; JOHNSON, C: *Visualization Handbook*. Elsevier Science, 2011 <https://books.google.de/books?id=mA8ih1AieaYC>. – ISBN 9780080481647
- HAUSNER, M. B. ; SUÁREZ, F ; GLANDER, K. E. ; VAN DE GIESEN, N ; SELKER, J. S. ; TYLER, S. W.: Calibrating Single-Ended Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. In: *Sensors* 11 (2011), Nr. 11, S. 10859–10879. – ISSN 1424–8220
- HESSE, C: *Der Reaktionsverlauf der frühen Hydratation von Portlandzement in Relation zur Temperatur*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2009
- HILHORST, M: *Dielectric Characterisation of Soil*, Lanbouuniversiteit Wageningen, Diss., 1998. – 139 S.

- HÖLTING, B ; COLDEWEY, W. G.: *Hydrogeologie*. 8. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 344 S. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8274-2354-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8274-2354-2>. – ISBN 978-3-8274-2353-5
- HOMUTH, S ; HAMM, K ; SASS, I: BHE logging and cement hydration heat analyses for the determination of thermo-physical parameters. In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 72 (2013), Nr. 1, 93–100. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-012-0455-2>. – DOI 10.1007/s10064-012-0455-2. – ISSN 1435-9537
- HUBER, H ; ARSLAN, U ; SASS, I: The influence of Darcy velocity on the effective thermal conductivity. In: *Grundwasser* 19 (2014), Nr. 3, 173–179. <http://dx.doi.org/10.1007/s00767-014-0263-7>. – DOI 10.1007/s00767-014-0263-7. – ISSN 1432-1165
- HURTIG, E ; GROSSWIG, S ; JOBMANN, M ; KÜHN, K ; MARSCHALL, P: Fibre-optic temperature measurements in shallow boreholes: experimental application for fluid logging. In: *Geothermics* 23 (1994), Nr. 4, 355–364. [http://dx.doi.org/10.1016/0375-6505\(94\)90030-2](http://dx.doi.org/10.1016/0375-6505(94)90030-2). – DOI 10.1016/0375-6505(94)90030-2. – ISSN 0375-6505
- INGERSOLL, L: *Heat conduction—With engineering and geological application*. McGraw-Hill Book Company, 1948
- JÄGER, C: Effizienzsteigerung und Qualitätssicherung von Erdwärmesonden. In: *bbr-Sonderheft Geothermie* (2013)
- Kapitel E. In: KEYS, W. S. ; MACCARY, L. M.: *APPLICATION OF BOREHOLE GEOPHYSICS TO WATER-RESOURCES INVESTIGATIONS*. 1971
- KOLDITZ, O (Hrsg.) ; GÖRKE, U.-J (Hrsg.) ; SHAO, H (Hrsg.) ; WANG, W (Hrsg.): *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Bd. 86: *Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Porous Media*. 1. 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27177-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27177-9>. – ISBN 978-642-27176-2
- LEAF, A ; HART, D ; BAHR, J: Active Thermal Tracer Tests for Improved Hydrostratigraphic Characterization. In: *Ground Water* 50 (2012), 09-10, Nr. 5, S. 726–735. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00913.x>. – DOI 10.1111/j.1745-6584.2012.00913.x
- LEE, K. S.: A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems. In: *Energies* 3 (2010), Nr. 6, S. 1320. <http://dx.doi.org/10.3390/en3061320>. – DOI 10.3390/en3061320
- LEVEN, C ; WEISS, H ; VIENKEN, T ; DIETRICH, P: Direct-Push-Technologien – Effiziente Untersuchungsmethoden für die Untergrunderkundung. Direct Push technologies - an efficient investigation method for subsurface characterization. In: *Grundwasser* (2011). <http://dx.doi.org/10.1007/s00767-011-0175-8>. – DOI 10.1007/s00767-011-0175-8
- LI, Y ; MAO, J ; GENG, S ; HAN, X ; ZHANG, H: Evaluation of thermal short-circuiting and influence on thermal response test for borehole heat exchanger. In: *Geothermics* 50 (2014), 136–147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.010>. – DOI 10.1016/j.geothermics.2013.09.010. – ISSN 0375-6505
- LIEBEL, H. T. ; HUBER, K ; FRENGSTAD, B. S. ; RAMSTAD, R. K. ; BRATTLI, B: Temperature footprint of a thermal response test can help to reveal thermogeological information. In: *Norges geologiske undersøkelse Bulletin* 451 (2011), S. 20–31
- LIU, G ; KNOBBE, S ; BUTLER JR., J: Resolving centimeter-scale flows in aquifers and their hydrostratigraphic controls. In: *Geophysical Research Letters* 40 (2013), S. 1098–1103. <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50282>. – DOI 10.1002/grl.50282
- LO RUSSO, S ; TADDIA, G ; VERDA, V: Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis. In: *Geothermics* 43 (2012), S. 66–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.02.001>. – DOI 10.1016/j.geothermics.2012.02.001
- LOCHER, F. W.: *Expertenwissen Baustoffe*. Bd. 1: *Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. 2000. – 540 S. – ISBN 978-3-7640-0400-2
- LUNNE, T ; ROBERTSON, P ; POWELL, J: Cone-penetration testing in geotechnical practice. (1997), S. 312 pp
- MARCOTTE, D ; PASQUIER, P: On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. In: *Renewable Energy* 33 (2008), Nr. 11, 2407–2415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.021>. – DOI 10.1016/j.renene.2008.01.021. – ISSN 0960-1481
- MCCALL, W ; CHRISTY, T. M. ; CHRISTOPHERSON, T ; ISSACS, H: Application of direct push methods to investigate uranium distribution in an alluvial aquifer. In: *Groundwater Monitoring & Remediation* 29 (2009), Nr. 4, S. 65–76

- MC ELWEE, C ; BUTLER, J ; BOHLING, G: Nonlinear analysis of slug tests in highly permeable aquifers using a Hvorslev-type approach. In: *Kansas Geol. Surv. Open-File Rep.* (1992)
- MOFFET, K ; TYLER, S ; TORGERSEN, T ; MENON, M ; SELKER, J ; GORELICK, S: Processes Controlling the Thermal Regime of Saltmarsh Channel Beds. In: *Environmental Science & Technology* 42 (2008), Nr. 2, S. 671–676. <http://dx.doi.org/10.1021/es071309m>. – DOI 10.1021/es071309m
- NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM ; NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM (Hrsg.): *Leitfaden Erdwärmennutzung in Niedersachsen*. 12 2006. – 21 S.
- NOVO, A. V. ; BAYON, J. R. ; CASTRO-FRESNO, D ; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J: Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. In: *Applied Energy* 87 (2010), Nr. 2, 390–397. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.033>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2009.06.033. – ISSN 0306–2619
- OKAZAKI, K ; NODA, H ; UEHARA, S ; SHIMAMOTO, T: Permeability, porosity and pore geometry evolution during compaction of Neogene sedimentary rocks. In: *Journal of Structural Geology* 62 (2014), 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2013.12.010>. – DOI 10.1016/j.jsg.2013.12.010. – ISSN 0191–8141
- OLSEN, R: Using the CPT for dynamic site response characterization. In: *American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication* 20 (1988), S. 374 – 388
- OMER, A. M.: Ground-source heat pumps systems and applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008), Nr. 2, S. 344–371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>. – DOI 10.1016/j.rser.2006.10.003
- ONSET COMPUTER CORPORATION: *TidbiT v2 Temp Logger*, 2016
- PATRICK A., D ; FRANKLIN W., S: *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley & Sons Ltd, 1997
- PAYNE, F ; QUINNAN, J ; POTTER, S: *Remediation Hydraulics*. CRC Press, 2008. – ISBN 9781420006841
- RADIOTI, G ; DELVOIE, S ; SARTOR, K ; NGUYEN, F ; CHARLIER, R: Fiber-optic Temperature Profiles Analysis for Closed-loop Geothermal Systems - A Case Study. In: *Second EAGE Workshop on Geomechanics and Energy* (2015)
- RAYMOND, J ; THERRIEN, R ; GOSSELIN, L: Borehole temperature evolution during thermal response tests. In: *Geothermics* 40 (2011), Nr. 1, 69–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.12.002>. – DOI 10.1016/j.geothermics.2010.12.002. – ISSN 0375–6505
- READ, T ; BOUR, O ; BENSE, V ; BORGNE, T. L. ; GODERNIAUX, P ; KLEPIKOVA, M ; HOCHREUTENER, R ; LAVENANT, N ; BOSCHERO, V: Characterizing groundwater flow and heat transport in fractured rock using fiber-optic distributed temperature sensing. In: *Geophysical Research Letters* 40 (2013), Nr. 10, 2055–2059. <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50397>. – DOI 10.1002/grl.50397. – ISSN 1944–8007
- REHAU AG & Co: *RAUGEO Systemtechnik: Innovativ heizen, kühlen und sparen mit Erdwärme, Lieferprogramm 827100 DE*. 05 2013
- RIEGGER, M: Das Forschungsprojekt EWSplus – Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden . 2009. – Forschungsbericht
- RIEGGER, M: Untersuchung zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden - Weiterentwicklung der Erdwärmesondentechnik. 2013. – Forschungsbericht
- RIEGGER, M ; HEIDINGER, P ; LORINSER, B ; STOBER, I: Auswerteverfahren zur Kontrolle der Verfüllqualität in Erdwärmesonden mit faseroptischen Temperaturmessungen. In: *Grundwasser* 17 (2012), Nr. 91. <http://dx.doi.org/10.1007/s00767-012-0192-2>. – DOI 10.1007/s00767-012-0192-2
- RINK, K: *OpenGeoSys Data Explorer Manual*, Januar 2015
- ROWAN, L. C. ; HOOK, S. J. ; ABRAMS, M. J. ; MARS, J. C.: Mapping Hydrothermally Altered Rocks at Cuprite, Nevada, Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a New Satellite-Imaging System. In: *Economic Geology* 98 (2003), Nr. 5, 1019–1027. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.98.5.1019>. – DOI 10.2113/gsecongeo.98.5.1019
- RÜHAAK, W ; GUADAGNINI, A ; GEIGER, S ; BÄR, K ; GU, Y ; ARETZ, A ; HOMUTH, S ; SASS, I: Upscaling thermal conductivities of sedimentary formations for geothermal exploration. In: *Geothermics* 58 (2015), 49–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.08.004>. – DOI 10.1016/j.geothermics.2015.08.004. – ISSN 0375–6505

- SABINS, F. F.: Remote sensing for mineral exploration. In: *Ore Geology Reviews* 14 (1999), Nr. 3–4, 157–183. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4). – DOI 10.1016/S0169-1368(99)00007-4. – ISSN 0169-1368
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LfULG) ; SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LfULG) (Hrsg.): *Erdwärmesonden Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie*. 2015
- SANNER, B: GUIDELINES, STANDARDS, CERTIFICATION AND LEGAL PERMITS FOR GROUND SOURCE HEAT PUMPS IN THE EUROPEAN UNION. (2008)
- SANNER, B ; KARYTSAS, C ; MENDRINOS, D ; RYBACH, L: Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. In: *Geothermics* 32 (2003), S. 579–588. [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00060-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00060-9). – DOI 10.1016/S0375-6505(03)00060-9
- SANNER, B ; HELLSTRÖM, G ; SPITLER, J ; GEHLIN, S: Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application World Geothermal Congress 2005, 2005
- SCHULMEISTER, M ; BUTLER JR., J ; HEALEY, J ; ZHENG, L ; WYSOCKI, D ; MCCALL, G: Direct-Push Electrical Conductivity Logging for High-Resolution Hydrostratigraphic Characterization. In: *Ground Water Monitoring & Remediation* 23 (2003), Nr. 3, S. 52–62
- SCHWENK SPEZIALBAUSTOFFE GMBH & Co. KG: *Füllbinder® EWM Hydraulischer Spezialmörtel für Erdwärmesonden*. 12 2014
- SCOTTISH GOVERNMENT ; UK DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE (DECC): Energy in Scotland 2015. (2015)
- SEIBERTZ, K. S. O. ; CHIRILA, M. A. ; BUMBERGER, J ; DIETRICH, P ; VIENKEN, T: Development of in-aquifer heat testing for high resolution subsurface thermal-storage capability characterisation. In: *Journal of Hydrology* 534 (2016), 113–123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.013>. – DOI 10.1016/j.jhydrol.2015.12.013. – ISSN 0022-1694
- SELF, S. J. ; REDDY, B. V. ; ROSEN, M. A.: Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. In: *Applied Energy* 101 (2013), 341–348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2012.01.048. – ISSN 0306-2619. – Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems
- SELKER, J ; THÉVANEZ, L ; HUWALD, H ; MALLET, A ; LUXEMBURG, W ; VAN DE GIESEN, N ; STEJSKAL, M ; ZEMAN, J ; WESTHOFF, M ; PARLAGNE, M: Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. In: *Water Resources Research* 42 (2006). <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR005326>. – DOI 10.1029/2006WR005326
- SILIXA LTD: *ULTIMA-DTS data sheet*, 2015
- SOMMER, W ; VALSTAR, J ; VAN GAANS, P ; GROTHENHUIS, T ; RIJNAARTS, H: The impact of aquifer heterogeneity on the performance of aquifer thermal energy storage. In: *Water Resources Research* 49 (2013), Nr. 12, 8128–8138. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR013677>. – DOI 10.1002/2013WR013677. – ISSN 1944-7973
- SOMMER, W ; DOORNENBAL, P ; DRIJVER, B ; VAN GAANS, P ; LEUSBROCK, I ; GROTHENHUIS, J ; RIJNAARTS, H: Thermal performance and heat transport in aquifer thermal energy storage. In: *Hydrogeology Journal* 22 (2014), Nr. 1, 263–279. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-013-1066-0>. – DOI 10.1007/s10040-013-1066-0. – ISSN 1431-2174
- STATISTICS EXPLAINED (EUROPEAN COMMISSION): eurostat Statistics explained. (2016). http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy
- TERRA CALIDUS GMBH: *Calidutherm*. 2009
- TREFRY, M. G. ; MUFFELS, C: FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool. In: *Ground Water* 45 (2007), Nr. 5, 525–528. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00358.x>. – DOI 10.1111/j.1745-6584.2007.00358.x. – ISSN 1745-6584
- TYLER, S ; SELKER, J ; HAUSNER, M ; HATCH, C ; TORGENSEN, T ; THODAL, C ; SCHLADOW, S: Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. In: *Water Resources Research* 45 (2009). <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007052>. – DOI 10.1029/2008WR007052
- VAN DE GIESEN, N ; STEELE-DUNNE, S. C. ; JANSEN, J ; HOES, O ; HAUSNER, M. B. ; TYLER, S ; SELKER, J: Double Ended Calibration of Fiber Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. In: *Sensors* 12 (2012), Nr. 5, S. 5471–5485. – ISSN 1424-8220

- VDI: *VDI 4640 - Thermische Nutzung des Untergrunds Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*, 06 2010
- VIENKEN, T ; LEVEN, C ; DIETRICH, P: Use of CPT and other direct push methods for (hydro-) stratigraphic aquifer characterization — a field study. In: *Can. Geotech.* (2012), S. 197–206. <http://dx.doi.org/10.1139/T11-094>. – DOI 10.1139/T11-094
- VIENKEN, T ; REBOULET, E ; LEVEN, C ; KRECK, M ; ZSCHORNACK, L ; DIETRICH, P: Field comparison of selected methods for vertical soil water content profiling. In: *Journal of Hydrology* 501 (2013), 205–212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.004>. – DOI 10.1016/j.jhydrol.2013.08.004
- VIENKEN, T ; SCHELENZ, S ; RINK, K ; DIETRICH, P: Sustainable Intensive Thermal Use of the Shallow Subsurface—A Critical View on the Status Quo. In: *Groundwater* 53 (2015), Nr. 3, 356–361. <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12206>. – DOI 10.1111/gwat.12206. – ISSN 1745–6584
- VIENKEN, T ; KRECK, M ; HAUSMANN, J ; WERBAN, U ; DIETRICH, P: Innovative strategies for high resolution site characterization: application to a flood plain. In: *Acque Sotteranee* 7 (2014), Nr. 14. <http://dx.doi.org/10.7343/AS-091-14-0118>. – DOI 10.7343/AS-091-14-0118
- VOGT, T ; SCHNEIDER, P ; HAHN-WOERNLE, L ; CIRPKA, O: Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling. In: *Journal of Hydrology* 380 (2010), S. 154–164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.033>. – DOI 10.1016/j.jhydrol.2009.10.033
- WATSON, K: Geologic applications of thermal infrared images. In: *Proceedings of the IEEE* 63 (1975), Jan, Nr. 1, S. 128–137. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1975.9712>. – DOI 10.1109/PROC.1975.9712. – ISSN 0018–9219
- WILLIAMS, T ; KELLEY, C ; GNUPLOT DEVELOPMENT TEAM: *Gnuplot 4.4: an interactive plotting program*. <http://gnuplot.sourceforge.net/>, March 2010
- ZANCHINI, E ; LAZZARI, S ; PRIARONE, A: Effects of flow direction and thermal short-circuiting on the performance of small coaxial ground heat exchangers. In: *Renewable Energy* 35 (2010), Nr. 6, 1255–1265. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.043>. – DOI 10.1016/j.renene.2009.11.043. – ISSN 0960–1481
- ZENG, H ; DIAO, N ; FANG, Z: Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), Nr. 23, 4467–4481. [http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00270-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00270-9). – DOI 10.1016/S0017-9310(03)00270-9. – ISSN 0017–9310
- ZHU, K ; BLUM, P ; FERGUSON, G ; BALKE, K.-D ; BAYER, P: The geothermal potential of urban heat islands. In: *Environmental Research Letters* 5 (2010), Nr. 4. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044002>. – DOI 10.1088/1748-9326/5/4/044002

A. Verzeichnisbaum Datenträger

Im folgenden Verzeichnisbaum ist die Organisationsstruktur der Versuchsdaten die auf dem Datenträger abgelegt sind aufgezeigt. Jedes Verzeichnis enthält eine README Datei, in welcher die wichtigsten Informationen zum Verständnis des abgelegten Datensatzes zusammengefasst sind (Datenstruktur).

