

Abschlussbericht

Verbundvorhaben: Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden

von

Roland Koenigsdorff, Philipp Feuerstein, Adinda Van de Ven
Hochschule Biberach (HBC)
Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)

Roman Zorn
European Institute for Energy Research (EIFER)

Mathieu Riegger, Julian Rolker Steinbeis
Forschungsinstitut für solare
und zukunftsfähige thermische Energiesystem (Solites)

Philipp Blum, Hagen Steger, Ingrid Stober
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Campus Süd Institut für
Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Jürgen Braun, Simon Kleinknecht
Universität Stuttgart
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)

Peter Grathwohl
Universität Tübingen
Zentrum für Angewandte Geowissenschaften Hydrogeochemie (ZAG)

Christian Moormann, Patrik Buhmann
Universität Stuttgart
Institut für Geotechnik (IGS)

Förderkennzeichen: L75 13013 – 13019
Laufzeit: 16.12.2013 – 31.12.2015

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Oktober 2017



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	6
1.1	Motivation und Hintergrund – Konzeption des Verbundes	6
1.2	Übersicht über die Ergebnisse des Verbundvorhabens	7
1.2.1	AP 1: Mobiler Sonden- und Hinterfüllprüfstand (EIFER, Dr. Roman Zorn)	7
1.2.2	AP 2: Integrative und detaillierte messtechnische Erfassung und Auswertung von Erdsondenprüfmethoden (Solites, Dipl.-Ing. Mathieu Riegger, M.Sc. Julian Rolker) ..	7
1.2.3	AP 3: Geophysikalische Messmethoden (Faseroptik) (KIT - AWG, Dr. Hagen Steger, Prof. Dr. Philipp Blum, Prof. Dr. Ingrid Stober)	8
1.2.4	AP 4: Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulationsprogrammen (Hochschule Biberach - IGE, Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff, M.Sc. Philipp Feuerstein, M.Sc. Adinda Van de Ven)	8
1.2.5	AP 5: Definition des Nahbereichs von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - VEGAS, Jürgen Braun, Ph.D., Dipl.-Ing. Simon Kleinknecht)	9
1.2.6	AP 6: Geothermisches Wärme- und Kälte-Speicherpotential im urbanen Untergrund (Universität Tübingen, Prof. Dr. Peter Grathwohl & KIT, Prof. Dr. Philipp Blum)	10
1.2.7	AP 7: Gekoppelte thermisch-mechanische Simulation von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - IGS, Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann, Dipl.-Ing. Patrik Buhmann)	10
1.3	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	11
1.3.1	Nutzen und praktische Verwertbarkeit.....	11
1.3.2	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	12
2	Abschlussberichte der Teilprojekte/Arbeitspakete	14
2.1	Mobiler Sonden- und Hinterfüllprüfstand (EIFER, Dr. Roman Zorn)	14
2.1.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	14
2.1.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	14
2.1.3	Aufgabenstellung	14
2.1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	15
2.1.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	16
2.1.6	Planung und Ablauf des Vorhabens	17
2.1.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	19
2.1.8	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	19
2.1.9	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)	19
2.1.10	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	22

2.1.11	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	22
2.1.12	Literatur	22
2.2	Integrative und detaillierte messtechnische Erfassung und Auswertung von Erdsondenprüfmethode (Solites, Dipl.-Ing. Mathieu Riegger, M.Sc. Julian Rolker).....	24
2.2.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	24
2.2.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	25
2.2.3	Aufgabenstellung	25
2.2.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	26
2.2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	26
2.2.6	Planung und Ablauf des Vorhabens	26
2.2.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	27
2.2.8	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	27
2.2.9	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)	28
2.2.10	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	32
2.2.11	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	33
2.2.12	Literatur	33
2.3	Geophysikalische Messmethoden (Faseroptik) (KIT - AWG, Dr. Hagen Steger, Prof. Dr. Philipp Blum, Prof. Dr. Ingrid Stober).....	34
2.3.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	34
2.3.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	34
2.3.3	Aufgabenstellung	34
2.3.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	35
2.3.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	35
2.3.6	Planung und Ablauf des Vorhabens	35
2.3.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	40
2.3.8	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	40
2.3.9	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)	40
2.3.10	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	51
2.3.11	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	51
2.3.12	Literatur	52
2.4	Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in	

Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulationsprogrammen (Hochschule Biberach, Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff , M.Sc. Philipp Feuerstein, M.Sc. Adinda Van de Ven).....	53
2.4.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	53
2.4.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	54
2.4.3 Aufgabenstellung	54
2.4.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	55
2.4.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	56
2.4.6 Planung und Ablauf des Vorhabens	56
2.4.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	57
2.4.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	57
2.4.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)	57
2.4.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	73
2.4.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	74
2.4.12 Literatur	75
2.5 Definition des Nahbereichs von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - VEGAS, Jürgen Braun, Ph.D., Dipl.-Ing. Simon Kleinknecht)	78
2.5.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	78
2.5.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	78
2.5.3 Aufgabenstellung	79
2.5.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	79
2.5.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	79
2.5.6 Planung und Ablauf des Vorhabens	79
2.5.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	82
2.5.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	82
2.5.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)	83
2.5.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	85
2.5.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	85
2.5.12 Literatur	86
2.6 Geothermisches Wärme- und Kälte-Speicherpotential im urbanen Untergrund (Universität Tübingen, Prof. Dr. Peter Grathwohl & KIT, Prof. Dr. Philipp Blum).....	87

2.6.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	87
2.6.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	87
2.6.3	Aufgabenstellung	87
2.6.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	88
2.6.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	88
2.6.6	Planung und Ablauf des Vorhabens	88
2.6.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	88
2.6.8	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	88
2.6.9	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)	88
2.6.10	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	90
2.6.11	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	90
2.6.12	Literatur	90
2.7	Gekoppelte thermisch-mechanische Simulation von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - IGS, Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann, Dipl.-Ing. Patrik Buhmann).....	92
2.7.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	92
2.7.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	92
2.7.3	Aufgabenstellung	93
2.7.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	93
2.7.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	94
2.7.6	Planung und Ablauf des Vorhabens	94
2.7.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	95
2.7.8	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	95
2.7.9	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)	96
2.7.10	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	111
2.7.11	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	111
2.7.12	Literatur	112

1 Zusammenfassung

1.1 Motivation und Hintergrund – Konzeption des Verbundes

Die in Baden-Württemberg beheimateten Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Partner im Landesforschungszentrum Geothermie (LFZG) haben sich im Rahmen dieses Verbundvorhabens zusammengeschlossen, um Beiträge zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit der Nutzung von Erdwärmesonden zu leisten. Das Vorhaben war in sieben Arbeitspakete (AP) mit den folgenden Zielen gegliedert:

- AP 1: Mobiler Sonden- und Hinterfüllprüfstand.** Es soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Qualität und Langzeitstabilität einer Erdwärmesonde direkt bei der Installation nachhaltig überprüfen zu können. Ziel ist die Entwicklung (Planung und Konstruktion) eines mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstandes.
- AP 2: Integrative und detaillierte messtechnische Erfassung und Auswertung von Erdsondenprüfmethoden.** Übergeordnetes Ziel ist die Standardisierung, Automatisierung und Weiterentwicklung von bereits entwickelten integrativen Mess- und Auswertemethoden zur hochgenauen Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden.
- AP 3: Geophysikalische Messmethoden (Faseroptik).** Inhalt dieses Arbeitspaketes ist die Integration faseroptischer Messmöglichkeiten in den in AP 1 geplanten mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstand, um entsprechende Auswertemethoden zu testen, validieren und eventuell weiter zu entwickeln.
- AP 4: Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulationsprogrammen.** Primäres Ziel ist die Entwicklung eines Softwarewerkzeugs, mit welchem der in einem Thermal Response Test gemessene Bohrlochwiderstand auf die späteren Betriebsbedingungen der Erdwärmesonde umgerechnet werden kann. Zusätzlich sollen Methoden und Hinweise weiterentwickelt werden, wie mit den weiteren erfassten Messwerten, unter Berücksichtigung der Randbedingungen während der Messung, umgegangen werden soll.
- AP 5: Definition des Nahbereichs von Erdwärmesonden.** Dieses Arbeitspaket zielt auf die Gewinnung detaillierter Kenntnisse über den Temperaturverlauf bzw. die Wärmeausbreitung im Nahbereich von Erdwärmesonden sowie deren Wechselwirkung mit dem Aquifer ab.
- AP 6: Geothermisches Wärme- und Kälte-Speicherpotential im urbanen Untergrund.** Im Rahmen dieses Arbeitspaketes werden alle relevanten Parameter erfasst, um den urbanen Wärmestrom zu ermitteln. Dies geschieht im Hinblick auf die Bestimmung des nachhaltigen geothermischen Wärme- und Kälte-Speicherpotentials in urbanen Grundwasserleitern.
- AP 7: Gekoppelt thermisch-mechanische Simulation von Erdwärmesonden.** Es soll ein vertieftes Verständnis der thermisch-mechanischen Auswirkungen des Verpressvorgangs des Ringraumes von Erdwärmesonden geschaffen werden. Dabei sollen die Wechselwirkungen mit dem umgebenden Untergrund erkannt und verstanden werden.

Diese sieben Arbeitspakete wurden als Teilprojekte definiert, die jeweils ein Verbundpartner bearbeitete. Ein über die einzelnen Teilprojekte/Arbeitspakete hinausgehendes Ziel war, dass die Arbeit im Verbundvorhaben die unterschiedlichen Forschungseinrichtungen und Hochschulen des Landes Baden-Württemberg besser vernetzt und die Forschung regional gestärkt wird. Zudem fokussierten die Arbeiten auf die beiden zentralen Aspekte der Nachhaltigkeit bei Nutzung von Erdwärmesonden als oberflächennahes geothermisches Quellensysteme für Wärme und Kälte: 1) Prüfung, Nachweis und langfristige Sicherstellung der erforderlichen Einbauqualität (v. a. Dichtigkeit) & 2) verbesserte Ermittlung des thermisch-energetischen Verhaltens (Auslegung und thermische Auswirkungen auf die Umgebung).

Die Autoren und Bearbeiter danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung des Vorhabens und dem Projektträger Karlsruhe, Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP) für die Unterstützung der administrativen Abwicklung sowie beiden Institutionen für die gute Zusammenarbeit.

1.2 Übersicht über die Ergebnisse des Verbundvorhabens

Im Folgenden werden die Hauptergebnisse jedes Arbeitspakets/Teilprojekts zusammenfassend dargestellt. Die detaillierten Berichte der einzelnen Arbeitspakete sind danach aufgeführt.

1.2.1 AP 1: Mobiler Sonden- und Hinterfüllprüfstand (EIFER, Dr. Roman Zorn)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Planung und Entwicklung eines mobilen Hinterfüll- und Sondenprüfstandes. In einem ersten Schritt sollte die mobile Anlage so geplant werden, dass ein möglichst großer und breiter Einsatzbereich gewährleistet werden kann. Dabei galt es, gemeinsam mit den Projektpartnern KIT/AGW und SOLITES, geeignete Messtechnik (Datenerfassungs- und Steuereinheiten, Arbeitspaket 2) auszuwählen (Temperaturfühler, Volumenstrommessgeräte, Thermostat, Pumpenfrequenz-umrichter, etc.). Die mobile Anlage sollte einen klassischen sowie einen tiefenaufgelösten Thermal Response Test (TRT) möglich machen. Die Tiefenauflösung soll ermöglicht werden durch die Integration bereits am KIT/AGW und EIFER vorhandener faseroptischer Temperaturmessgeräte und Messkonzepten (siehe Arbeitspaket 3).

Ferner sollte die Anlage so konzipiert werden, dass eine automatische Prüfung der Hinterfüllsuspension prinzipiell möglich ist. Physikalische Parameter, wie z. B. Dichte, Viskosität und Sedimentationsverhalten sollen erfasst werden können, sowie automatische Füllstandskontrolltechniken integrierbar sein.

1.2.2 AP 2: Integrative und detaillierte messtechnische Erfassung und Auswertung von Erdsondenprüfmethode (Solites, Dipl.-Ing. Mathieu Riegger, M.Sc. Julian Rolker)

In diesem Arbeitspaket wurde die im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus neu entwickelte und unter großem Aufwand in einem ersten Stadium betriebene Versuchsanlage zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden weiterentwickelt.

Im Gegensatz zu früheren Versuchen wurden mit der weiterentwickelten Versuchsanlage eine zentrale Messdatenerfassung aller für die Versuchsauswertung relevanten Messdaten und eine teilau-

tomatisierte Testprozedur realisiert, wodurch eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und eine Minimierung des Aufwands und der Kosten bei der Versuchsdurchführung erreicht werden. Diese Verbesserungen stellen die Grundlage dafür dar, das Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden, das eine höhere Genauigkeit als die hierfür üblicherweise eingesetzten Thermal Response Tests (TRTs) aufweist, künftig als standardisiertes Messverfahren zu Forschungszwecken, für Produktentwicklungen oder für Herstellertests anbieten zu können. Darüber hinaus bietet das Messverfahren gegenüber TRTs den Vorteil, dass die ermittelten Resultate durch den möglichen zerstörungsfreien Rückbau der Erdwärmesonden mit dem tatsächlichen Zustand im Bohrloch verglichen werden können.

1.2.3 AP 3: Geophysikalische Messmethoden (Faseroptik) (KIT - AWG, Dr. Hagen Steger, Prof. Dr. Philipp Blum, Prof. Dr. Ingrid Stober)

Im Arbeitspaket 3 wurden an mehreren Standorten sowie im Labor mehrere Temperaturmessungen mittels Glasfaserkabeln durchgeführt und mit Referenztemperaturen verglichen. Dabei wurden unterschiedliche Messverfahren angewandt. Es konnte gezeigt werden, dass Double-End-Messungen eine höhere Messgenauigkeit gegenüber Single-End-Messungen aufweisen. Die Messwerte der Single-End-Messungen lagen jedoch näher bei den Messwerten der Referenzmessungen. Darüber hinaus ist auch die Genauigkeit der Messwerte bei langen Messzeiten höher als bei kurzen Messzeiten. Hieraus lässt sich ableiten, sofern es die Fragestellung sowie die Standortbedingungen zulassen, lange Messzeiten gepaart mit einer Double-End-Messmethode genauere Temperaturmesswerte liefern als eine Single-End-Messung mit kurzen Messzeiten. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass für das jeweilige Kabel eine Kalibrierung erfolgen muss.

Neben den Temperaturmessungen wurde auch ein Enhanced Geothermal Resonsetest (EGRT) in der Technikumsanlage von Vegas durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass besonders im Falle von heterogenen Standortbedingungen mit stark unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten die temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeitsentwicklung bei der Ermittlung der Heizleistung unbedingt beachtet werden muss. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass bei geringen Schichtmächtigkeiten die Auswertung mit der Linienquellen-Methode ungeeignet ist und auf die Zylinderquellen-Methode zurückgegriffen werden sollte.

1.2.4 AP 4: Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulationsprogrammen (Hochschule Biberach - IGE, Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff, M.Sc. Philipp Feuerstein, M.Sc. Adinda Van de Ven)

Hauptziel des Arbeitspakets AP 4 war die Weiterentwicklung des Wissensstandes und der Methoden, wie die durch In-situ-Messungen und Tests (v. a. Thermal Response Tests) gewonnenen Parameterwerte korrekt und genauer als bisher in Planungs- und Auslegungsmethoden von Erdwärmesondenanlagen, d. h. Berechnungsverfahren sowie Modellen und Simulationsprogrammen, anzusetzen sind. Es wurden in drei Bereichen Beiträge erarbeitet, die zu einer verbesserten und genaueren, d. h. wirtschaftlicheren und sichereren Auslegung, von Erdwärmesonden führen:

Aufbauend auf vorangegangenen Untersuchungen wurde eine Methode entwickelt und in einer

Software prototypisch implementiert, mit der experimentell ermittelte Werte des effektiven Bohrlochwiderstands nachgerechnet und auf abweichende spätere Betriebsbedingungen umgerechnet werden können. Mit der Prüfung bzw. Umrechnung der Werte des Bohrlochwiderstands aus Thermal Response Tests wird die Genauigkeit der Auslegung verbessert und u. a. das im Betrieb vorgesehene Strömungsregime (laminar oder turbulent) überprüft.

Die Analyse von Messdaten des Anfahrverhaltens unterschiedlicher Erdwärmesonden-Typen unter thermischer Belastung führte zu einem einfachen Ansatz, wie das Kurzzeitverhalten (Spitzenlastverhalten während weniger Betriebsstunden) genauer als mit dem bisher üblichen Standard-Auswertemodell von Thermal Response Tests beschrieben werden kann. Dabei wird eine genauere Näherungslösung der Kelvin'schen Linienquellentheorie einem sich dynamisch aufbauenden Bohrlochwiderstand - analog zu einem thermischen Speicher - überlagert.

Die Analyse der Auswirkung der angesetzten ungestörten Untergrundtemperatur auf die daraus resultierende Bemessung von Erdwärmesonden zeigt, dass Messwerte des Jahresmittelwerts der Außentemperatur am Standort nicht unverändert übernommen, sondern mit einer Anhebung um zumindest +1 K verwendet werden sollten, um dem Unterschied zwischen oberflächennaher Boden- und Außenlufttemperatur Rechnung zu tragen. Sind valide Messwerte der Untergrundtemperatur für den relevanten Tiefenbereich vorhanden, sind diese vorzuziehen, wobei bei sehr kurzen Sonden die saisonale Schwankung der bodennahen Untergrundtemperaturen zu beachten ist.

1.2.5 AP 5: Definition des Nahbereichs von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - VEGAS, Jürgen Braun, Ph.D., Dipl.-Ing. Simon Kleinknecht)

Im Rahmen des Arbeitspakets 5 des Forschungsvorhabens wurde ein großskaliger Technikumsversuch aufgebaut, um die Temperaturlausbreitung im Nahfeld und in der Hinterfüllung einer Erdwärmesonde (EWS) bei realistischen und definierten Randbedingungen zu untersuchen. Um dies zu ermöglichen wurde eine spezielle EWS konfektioniert, mit 32 Pt100-Temperaturfühlern und einem DTS-Kabel als Doppel-U-Schleife instrumentiert und im Versuchsstand des „EWS-tech“-Forschungsvorhabens verpresst. Anschließend wurde sie im Großbehälter von VEGAS installiert. Zusätzlich wurde das bestehende Temperaturmessfeld des Großbehälters im Nahfeld der Sonde stark verdichtet, um eine hochaufgelöste Temperaturmessung zu gewährleisten. Der Betrieb der EWS mit einem Thermostat, die einstellbare Grundströmung sowie die Möglichkeit der Kühlung des Zulaufs (ca. 15 °C) ermöglichen eine vielseitige Anwendung in weiteren Forschungsvorhaben.

Die Ergebnisse der Enhanced Geothermal Response Tests (ERGT), bei der Wärme über das DTS-Kabel in den Untergrund eingebracht wurde, zeigten niedrigere Temperaturen, ein schnelleres Erreichen des stationären Zustands und eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 1,5 bei einer Grundströmung von $v_a = 0,61$ m/Tag.

In weiteren Versuchen wurde die Temperaturlausbreitung zweier realistischer Lastfälle, kontinuierlicher und intermittierender (6-Stunden-Rhythmus) Wärmeentzug, untersucht. Dabei wurde die Temperatur des Fluids am Sondeneinlauf konstant auf 0 °C gehalten und die Sonde bei turbulenten Bedingungen durchströmt. Für eine konservative Betrachtung wurden die Versuche ohne Grundströmung durchgeführt. Die Temperaturmessung zeigte, dass die minimale Temperatur in der Hinterfüllung der Sonde (zwischen den Sondenrohren) nur unbedeutend geringer bei kontinuierlichem

Wärmeentzug gegenüber dem intermittierendem Betrieb (sechs Stunden Entzug gefolgt von sechs Stunden Regeneration) war. Innerhalb der Hinterfüllung war ein Temperaturgradient von bis zu 0,4 K/cm messbar. Die Temperaturentbreitung im Erdreich (Nahfeld der Sonde) war signifikant größer bei kontinuierlichem Wärmeentzug. Diese Erkenntnisse sind besonders im Hinblick auf eine mögliche Durchfrostung der EWS, bedingt durch falschen Betrieb oder Unterdimensionierung des Systems, und damit eine Gefährdung der Standsicherheit von großer Bedeutung und müssen in weiteren Forschungsvorhaben vertieft untersucht werden.

1.2.6 AP 6: Geothermisches Wärme- und Kälte-Speicherpotential im urbanen Untergrund (Universität Tübingen, Prof. Dr. Peter Grathwohl & KIT, Prof. Dr. Philipp Blum)

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 wurden das Wärme- und Kälte-Speicherpotential des Untergrundes von verschiedenen urbanen Räumen in Baden-Württemberg ermittelt. In allen untersuchten Städten wurden ausgedehnte positive Temperaturanomalien im oberflächennahen Grundwasser gefunden. Eine detaillierte regionale Betrachtung hat gezeigt, dass die Verteilung der Grundwassertemperaturen unter urbanen Gebieten sehr heterogen ist. Die Überlagerung vieler verschiedener Wärmequellen führt langfristig zu einer Erhöhung der Grundwassertemperaturen um mehrere Grad im Vergleich zu unbeeinflussten Gebieten. Somit stellen urbane Grundwasserleiter auch in Baden-Württemberg, ausgenommen Stuttgart, attraktive Speicher für thermische Energie dar. Die Abschätzung des jeweiligen Heizbedarfs ergab, dass das theoretische geothermische Potential den Heizbedarf der jeweiligen betrachteten Städte für einige Jahre decken könnte. Aufgrund des jährlichen anthropogenen Wärmeeintrags in das Grundwasser könnte somit der Heizbedarf in Karlsruhe zu mehr als 30 % nachhaltig mit Wärme aus diesem unter-irdischen Energiereservoir gedeckt werden. Durch Nutzung des urbanen Untergrunds zur Deckung des Kältebedarfs kann dieser Wert auf 65 % verdoppelt werden. Der urbane Grundwasserleiter kann hierbei auch zur Speicherung von Energie (z. B. Aquiferspeicher) verwendet werden. Hierfür müssen jedoch die bestehenden rechtsverbindlichen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

1.2.7 AP 7: Gekoppelte thermisch-mechanische Simulation von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - IGS, Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann, Dipl.-Ing. Patrik Buhmann)

Im Rahmen des Arbeitspakets 7 wurden Untersuchungen zum Vorgang der Verfüllung von Erdwärmesonden sowie zur thermisch-hydraulisch-mechanischen Interaktion einer Erdwärmesonde mit dem umgebenden porösen Medium Boden durchgeführt.

Im Arbeitspaket AP 7A wurden die erforderlichen Randbedingungen zur Simulation des Verfüllvorgangs beschrieben. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass zur Beschreibung des Verfüllvorgangs vor allem die Interaktion zwischen der Verfüllsuspension und der Bohrlochwandung bis dato noch nicht hinreichend geklärt ist. Aus diesem Grund wurden Modellversuche durchgeführt, die die Fließigenschaften der Frischsuspension sowie die Festigkeitsentwicklung des Verfüllbaustoffes in Abhängigkeit vom Wasserangebot des umgebenden Untergrundes aufzeigen.

Auf der Basis des Versuchsstandes der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) der Universität Stuttgart wurden im Rahmen des Arbeitspaketes AP 7B numerische Simulationen zur hydraulisch-thermischen Interaktion einer Erdwärmesonde mit dem anstehenden

Untergrund durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse für vorwiegend durch Wärmeleitung geprägte Wärmetransportvorgänge im porösen Medium Boden zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen der durchgeführten Experimente. Unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung kann die Temperaturentwicklung im direkten Nahbereich zur Erdwärmesonde hingegen nicht mit vergleichbarer Genauigkeit nachgefahren werden. Dies zeigt einen weiteren entsprechenden Forschungsbedarf auf. Die mechanisch-hydraulisch-thermischen Wechselwirkungen von Erdwärmesonden im Betrieb wurden im Rahmen einer Literaturrecherche betrachtet.

1.3 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

1.3.1 Nutzen und praktische Verwertbarkeit

AP 1: Kern des Prüfstandes ist eine vorhandene Thermal Response Test (TRT) Apparatur des ZAE Bayerns (Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung). Diese Testanlage stellt ein anerkanntes Referenzsystem für TRT Tests dar. Durch die geplante Erweiterung der Anlage auf tiefenorientierte Tests und automatisierter Abdichtungskontrolltechniken sowie der Integration von Parameterbestimmungen von Verfüllbaustoffen kann potentiell die Qualitätssicherung von Erdwärmesonden erhöht werden. Zudem kann für Forschungszwecke den Projektpartnern eine umfangreiche Testanlage zur Verfügung gestellt werden.

AP 2: Mit Hilfe der hier erreichten Verbesserungen in den Bereichen

- Aufbau einer zentralen Messdatenerfassung sowie
- Vereinfachung und Beschleunigung des Testablaufs durch weitgehende Automatisierungen

konnten die im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech vorgesehenen Versuche zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands effizient durchgeführt werden.

AP 3: Die vorliegenden Untersuchungen zur Temperaturmessung mit Glasfaserkabeln haben gezeigt, dass diese über ein weites Anwendungsspektrum einsetzbar sind. So können ablaufende Prozesse, wie sie bei Heatpipes oder während des Hinterfüllvorgangs von Erdwärmesonden vorkommen, untersucht werden. Dabei ist die Glasfasermessung ein hilfreiches Instrument beim Qualitätsmanagement von Erdwärmeanlagen. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass eine adäquate Messmethode sowie eine ausreichende Messzeit eingehalten werden und eine Kalibrierung des Messkabels erfolgt. Aufgrund der Vielseitigkeit der Einsatzmöglichkeiten und des robusten Messequipments konnte die Messtechnik auch erfolgreich in den Versuchsstand eines herkömmlichen TRT implementiert werden (siehe hierzu AP 1).

Für die Auswertung von EGRT konnte aufgezeigt werden, dass neben der richtigen Auswertemethode auch die Beachtung der temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit für genaue, realistische und belastbare Ergebnisse essentiell ist.

AP 4: Die Ergebnisse des Teilprojekts zur Anwendung und Adaption von gemessenen Parametern bestehen zum einen aus Hinweisen und Parameterwerten für die Auslegung von Erdwärmesonden und zum anderen aus Programmprototypen sowie Rechenansätzen, die direkt verwendet oder in Auslegungsprogramme implementiert werden können. Die Ergebnisse lassen

sich somit unmittelbar in der Planung und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen einsetzen, sodass eine direkte praktische Verwertbarkeit und Nutzung gegeben ist. Mit diesen Ergebnissen lassen sich in bestimmten Anwendungsfällen Parameter und Randbedingungen bei der Auslegung und Dimensionierung von Erdwärmesonden präziser als bisher ermitteln und anwenden. Damit kann die Auslegung genauer und wirtschaftlicher erfolgen, ohne dass die Betriebssicherheit darunter leidet, was somit einen Beitrag zu einer ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Nutzung von Erdwärmesonden darstellt.

- AP 5:** Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Nahbereich von Erdwärmesonden zeigen, dass sich innerhalb der Hinterfüllung von Erdwärmesonden ein deutlicher Temperaturgradient ausgebildet und dass die Reichweite der Temperaturlausbreitung im Erdreich hauptsächlich von zwei Parametern abhängt: vom Betrieb der EWS und von den Strömungsbedingungen im Aquifer. Dies ist von großer Bedeutung für die Dimensionierung von Geothermie-Anlagen in der Praxis und sollte in weiteren, realistischen Lastfällen untersucht werden. Insbesondere die ersten Erfahrungen und die Verfügbarkeit des großskaligen Technikumsversuchs für weitere Forschungsvorhaben sind ein wesentlicher Nutzen dieses Projektes.
- AP 6:** Mithilfe der neuen Erkenntnisse zum geothermischen Wärme- und Kälte-Speicherpotential im urbanen Untergrund können lokale quartiersbezogene Wärme- und Kältekonzepte in Städten entwickelt werden. Inwieweit die Kommunen und Energieversorger dieses geothermische Potential nutzen werden, lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschließend sagen. Geplante Folgeprojekte sollen dies jedoch noch genauer untersuchen.
- AP 7:** Die Ergebnisse des Teilprojektes „Gekoppelte thermisch-mechanische Simulation von Erdwärmesonden“ bieten eine direkt verwertbare Grundlage zum Aufbau eines numerischen Modells zur Simulation des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass Viskositätsänderungen durch ein Abfiltrieren der Verfüllsuspension weiter zu untersuchen sind. Weiter zeigen die Versuchsreihen zur Bestimmung der Druckfestigkeit, dass im Hinblick auf die Qualitätssicherung von Erdwärmeverfüllbaustoffen das Wasserangebot bei der Festlegung des Wasser/Feststoffwertes nicht zu vernachlässigen ist.

Die numerischen Berechnungen zur hydraulisch-thermischen Interaktion einer Erdwärmesonde mit dem anstehenden Untergrund haben gezeigt, dass vornehmlicher konduktiver Wärmetransport ausreichend genau abbildbar ist, zur Beschreibung der Konvektion im Mehrphasenmedium Boden im Zusammenhang mit soliden Baukörpern aber noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

1.3.2 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Gesamtprojektes wurden auf den Statuskolloquien 2015 und 2016 präsentiert. Darüber hinaus erfolgte eine Veröffentlichung bzw. öffentliche Verbreitung der Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte/Arbeitsergebnisse in folgender Form:

- AP 1:** Die erreichte Kombination aus klassischen Thermal Response Tests und tiefenorientierten Temperaturprofilen soll in einem Folgeforschungsprojekt näher betrachtet werden und dann

in entsprechende Veröffentlichungen einfließen. Messungen am Versuchscontainer VEGAS werden im Rahmen des AP5 veröffentlicht.

- AP 2:** Die mit dem weiterentwickelten Messverfahren erzielten Messergebnisse von sechs im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech durchgeführten Versuchen werden in dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens EWS-tech veröffentlicht unter www.solites.de sowie <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>. Weiterhin erfolgte und erfolgt in Kombination mit dem Forschungsvorhaben EWS-tech durch Solites ein umfangreicher Forschungstransfer, unter anderem durch Vorträge bei Fachkongressen. Dabei wurde und wird auf die erweiterten und verbesserten Möglichkeiten zur Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden auf dem Realmaßstabsversuchsgelände am KIT hingewiesen. Ferner wurde am Zaun des EWS-tech Realmaßstabsversuchsgeländes eine Informationstafel angebracht, auf der die Inhalte des Forschungsvorhabens EWS-tech und das Messverfahren zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands erläutert sind. Am Tag der offenen Tür des KIT (27.06.2015) wurden die Forschungsarbeiten und das Messverfahren der interessierten Öffentlichkeit auf dem Versuchsgelände nähergebracht.
- AP 3:** Die im Projekt gewonnene bisherige Datengrundlage soll in einem Folgeprojekt erweitert werden und dann in entsprechende Veröffentlichungen einfließen.
- AP 4:** Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte in AP 4 wurden in fünf Fachvorträgen bei den Internationalen Anwenderforen Oberflächennahe Geothermie 2014 und 2016 (OTTI), auf der GeoTHERM expo & congress 2015 sowie beim Biberacher Geothermietag 2015 präsentiert. Der Beitrag zum OTTI-Forum 2014 ist im Tagungsband der Veranstaltung veröffentlicht. Darüber hinaus ist geplant, die Inhalte der Vorträge beim OTTI-Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 2016 in einer Fachzeitschrift zu veröffentlichen.
- AP 5:** Die Vorstellung des Forschungsvorhabens und der Ergebnisse erfolgte bei der Veranstaltung „Aktuelles zum Thema "Oberflächennahe Geothermie"-Planung, Ausführung, Qualitätssicherung“ des Fortbildungsverbands Baden-Württemberg (Vortrag am 02.12.2014) sowie als Fachposter am 5.3.2015 auf der GeoTHERM expo & congress und am 20.6.2015 beim Tag der Wissenschaft der Universität Stuttgart.
- AP 6:** Zwischenergebnisse dieses Teilprojekts wurden in der Publikation [Benz et al., 2015] veröffentlicht.
- AP 7:** Die Veröffentlichung der Ergebnisse zum Vorgang der Bohrlochverfüllung ist in Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Institut für das Jahr 2016 geplant. Detailspekte zur hydraulisch-thermischen Interaktion zwischen der Erdwärmesonde und umgebenden Untergrund werden voraussichtlich auf der Energy Geotechnics ICEGT 2016 präsentiert.

2 Abschlussberichte der Teilprojekte/Arbeitspakete

2.1 Mobiler Sonden- und Hinterfüllprüfstand (EIFER, Dr. Roman Zorn)

2.1.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Grundlage für das Arbeitspaket 1 war eine vorhandene Thermal Response Test (TRT) Anlage des ZAE Bayerns (Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V.). Diese TRT Apparatur stellt das Referenzsystem für derartige Tests zumindest im deutschsprachigem Raum dar. An dieser Anlage wurde die Integration tiefenorientierter Thermal Response Test überprüft und einige Tests durchgeführt (siehe auch AP3 und AP5). Der Vergleich von tiefenorientiert bestimmten effektiven Wärmeleitfähigkeiten mit punktuellen und integralen effektiven Wärmeleitfähigkeiten zeigen, dass durchaus plausible Ergebnisse erzielt werden können, aber weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Durchführung und Auswertung der Versuche besteht. Ferner wurde die Testanlage insgesamt auf die Messung von Hinterfüllmaterialparameter vorbereitet.

In Zusammenarbeit mit dem AGW, Universität Stuttgart, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) wurden gemeinsam tiefenorientierte Thermal Response Test durchgeführt (Beschreibung siehe dort), um die Integration der Messtechnik in die bestehende klassische Thermal Response Test Anlage vorzubereiten.

2.1.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Mit Hilfe eines mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstand soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Qualität und Langzeitstabilität einer Erdwärmesonde direkt bei der Installation nachhaltig überprüfen zu können. Mit einer klassischen Thermal Response Test Anlage können thermische Untergrundparameter, die zur Auslegung vor allem von großen Erdwärmesonden wichtig sind, bestimmt werden. Eine tiefenorientierte Variante mit der Verwendung eines Hybridglasfaserkabels – Kombination aus faseroptischer Messung in Kombination mit einem Heizkabel – ist ebenso Stand der Technik. Eine automatisierte Kombination aus klassischen fluidgesteuertem TRT und tiefenorientierter Temperaturmessungen ist aber noch nicht auf dem Markt etabliert. Mit einer automatisierten Integration tiefenorientierter Messtechniken könnte jeder klassische TRT sinnvoll erweitert werden. Ein TRT soll in der Regel nach einem ausreichenden Abbinden des Hinterfüllmaterials durchgeführt werden. Mit einem erweiterten TRT, der auch automatisiert die Qualität des Hinterfüllvorgangs mit Hilfe der Messung geeigneter physikalischer Parameter erlaubt, könnte man neben der Qualitätssicherung des Hinterfüllvorgang den Startzeitpunkt für einen TRT festlegen. Eine Anlage, die sinnvolle Temperaturmessungen mit Qualitätsmessungen von Hinterfüllmaterialien und Verfüllprozessen automatisiert ermöglicht, könnte wesentlich zur nachhaltigen Entwicklung von Erdwärmesonden beitragen. Zum Beispiel könnte die Anlage nach der Fertigstellung der Bohrung den Hinterfüllvorgang überwachen und im Anschluss ein tiefenorientierter TRT Test durchgeführt werden (Vorteile, z. B. erheblicher Zeitgewinn, gesteigerte Qualitätskontrolle, etc.).

2.1.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Arbeitspakets sollte ein mobiler Sonden und Hinterfüllprüfstand aufgebaut werden.

Die Grundlage für eine solche mobile Testanlage sollte eine klassische fluidgesteuerte TRT Anlage darstellen, die sinnvoll mit tiefenorientierten Temperaturmessungen erweitert werden sollte. Ferner sollte die Anlage mit Messtechniken zur Prüfung des Hinterfüllvorgangs- und der Hinterfüllqualität vorbereitet werden. Dabei gilt zu betonen, dass die im Vorhaben zur Verfügung stehenden Mittel nicht für einen vollständigen Aufbau einer solchen Anlage genügt haben. Deshalb wurde eine bestehende TRT Anlage verwendet und somit auf ein bestehendes Umsetzungskonzept des ZAE Bayerns zurückgegriffen. Diese wurde punktuell erweitert und vorbereitet für einen mobilen Sonden und Hinterfüllprüfstand.

Hauptmerkmale TRT:

- Umwälzpumpe und mehrere elektrische Heizelemente (stufenlose Heizleistung einstellbar)
- zwei hochgenaue magnetisch induktive Durchflussmessgeräte (kalibriert)
- Anschlussmöglichkeit einer Vielzahl von Temperatursensoren (Pt100, etc.)
- Einbau extrem kleiner Temperatursensoren im Vorlauf und im Rücklauf direkt in den Fluidstrom ohne Tauchhülsen für exakte Messung (Geländeoberkante platziert)
- Konstanter Volumenstrom und konstante Heizleistung (hochgenaue Regelung)

Intelligentes Steuersystem:

- Merkmale integriertes Glasfasermessgerät
- Messung des Temperaturverlaufs entlang multi-mode Fasern für tiefenorientierte TRT's
- Kombinierte Messung des Dämpfungsverlaufs in single- und multi-mode Fasern für tiefenorientierte Druck- bzw. Spannungsmessungen (potentiell geeignet zur automatischen Abdichtungskontrollmessung)

Modularer Aufbau:

- Integration weiterer Messgeräte vorbereitet (Suspensionsparameter)

2.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Nach [Sanner et al. 2005] geht die Entwicklung des theoretischen Hintergrunds des klassischen Thermal Response Testverfahrens auf Veröffentlichungen von [Choudary 1976], [Mogensen 1983], [Claesson et al., 1985], [Claesson und Eskilson 1988] und [Hellström 1991] zurück. Erste experimentelle Arbeiten begannen 1995 an der Luleå University of Technology, als [Eklöf und Gehlin 1996] die erste mobile Testeinrichtung entwickelten und mehrere Tests durchführten. Parallel und unabhängig von diesen schwedischen Arbeiten startete [Austin 1998] an der Oklahoma State University in USA eine ähnliche Entwicklung. In Deutschland wurden erste Thermal Response Tests 1999 mit drei verschiedenen Messapparaturen durchgeführt. Zwei davon wurden von Firmen betrieben, während das dritte an der Landtechnik Weihenstephan der Technischen Universität München in Weihenstephan gebaut wurde.

Diese Apparatur wurde 2001 vom ZAE Bayern übernommen, wo seit dieser Zeit intensive F&E-Arbeiten in diesem Bereich laufen aber auch kommerzielle Tests durchgeführt werden. In den Niederlanden begannen IFTechnology und Groneholland ihre Arbeit in diesem Feld ebenfalls 1999 [van Gelder et al., 1999]. Während die meisten Testgeräte Wärme in den Boden einspeisen, nutzt die

holländische Apparatur eine Wärmepumpe und kann so dem Boden wahlweise auch Wärme entziehen. Allerdings ist dieser Ansatz etwas aufwendiger, da er zusätzliche Komponenten wie einen Pufferspeicher und eine komplexe Regelung benötigt. Seit 2000 hat sich das Verfahren des TRT rund um den Globus ausgebreitet. Seither wächst der Markt für kommerzielle Tests und damit auch die Anzahl der Anbieter kontinuierlich.

Kommerziell werden vor allem in Deutschland in den letzten Jahren auch sogenannte Enhanced Geothermal Response Test angeboten (Firma GTC Kappelmayer). Bei diesem Verfahren werden Hybrid-Glasfaserkabel eingesetzt. Über einen Heizdraht (Kupferkabel) wird der Untergrund aufgeheizt und die Temperaturantwort wird faseroptisch tiefenorientiert aufgezeichnet. Mit einem geeigneten Auswerteverfahren können dann tiefenaufgelöste effektive Wärmeleitfähigkeiten und Bohrlochwiderstände berechnet werden.

Der Thermal Response Test (TRT) hat sich in Deutschland als Verfahren zur Standortuntersuchung und Gewinnung wichtiger Planungsdaten für größere Erdwärmesonden-Anlagen etabliert.

Im Projekt 0327453A „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren“ wurden in einer engen Kooperation von ZAE Bayern, der Hochschule Biberach, den Angewandten Geowissenschaften des KIT und EIFER in Karlsruhe bereits die Schwerpunkte Thermal Response Test, Frost/Tau-Wechselbeständigkeit von Verfüllbaustoffen und die prototypische Entwicklung des Software-Tools GEOSYST sehr erfolgreich bearbeitet. Im Rahmen dieses Vorhabens die Ausarbeitung des IEA ECES Annex 21 „Thermal Response Test“. Wichtige Ergebnisse aus diesem Projekt sind in die [VDI 4640] Richtlinie, Blatt 5 „Thermal Response Test“ eingeflossen. Das Blatt 5 stellt das Standardwerk für die Durchführung von TRT Tests dar.

Im Rahmen des vom Projektpartner SOLITES durchgeführten Forschungsvorhabens EWSplus wurde ein neues Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden (EWS) entwickelt, validiert und bei zahlreichen EWS eingesetzt. Hierzu erfolgte der Aufbau einer Versuchsanlage, die bisher in einem ersten Stadium unter großem Aufwand betrieben wurde. Zahlreiche Geräte mussten für die Versuche ausgeliehen (u.a. TRT-Messgerät, Temperaturfühlermessketten, Datenlogger) und getrennt voneinander betrieben werden. Das im Rahmen des Forschungsprojekts EWSplus entwickelte Mess- und Auswerteverfahren erlaubt die Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Erdwärmesonden mit einer höheren Genauigkeit als die üblicherweise hierfür eingesetzten Thermal Response Tests.

Gerade durch vereinzelte prominente Schadensfälle ist die zukünftige Entwicklung im Marktbereich der Erdwärmesonden essentiell von gesteigerten Planungssicherheiten und effizienteren Qualitätskontrollmöglichkeiten und verbesserten Handlungsempfehlungen abhängig. Ein wesentlicher Aspekt für nachhaltige Erdwärmesondenanlagen ist eine dauerhafte und stabile Gewährleistung der Systemdichtigkeit der Untergrundinstallationen. Mit Hilfe einer erstmals möglichen mobilen Überwachung der Hinterfüllqualität soll ein wichtiger Beitrag dazu geleistet werden, dass zukünftige Erdwärmesonden sicher und langzeitstabil betrieben werden können.

2.1.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Keine.

2.1.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der mobile Hinterfüll- und Sondenprüfstand wurde so umgesetzt, dass ein möglichst großer und breiter Einsatzbereich gewährleistet werden kann. Dazu wurde gemeinsam mit den Projektpartnern KIT/AGW und SOLITES geeignete Messtechnik ausgewählt (Temperaturfühler, Volumenströmegeräte, Thermostat, Pumpenfrequenz-umrichter etc., siehe AP 2). Mit der mobilen Anlage können klassische und auch in Kombination tiefenaufgelöste Thermal Response Tests (TRT) durchgeführt werden. Die Tiefenauflösung wird ermöglicht durch die Integration faseroptischer Temperaturmessgeräte und Messkonzepte (siehe AP 3).

Die Grundlage des neuen mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstandes stellt eine vorhandene mobile TRT-Anlage des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V. dar (ZAE Bayern) [Reuß et al. 2012]. Diese besteht aus einer Umwälzpumpe, einer elektrischen Heizung, zwei hochgenauen Durchflussmessgeräten und mehreren Temperaturfühlern (Abbildung 1).

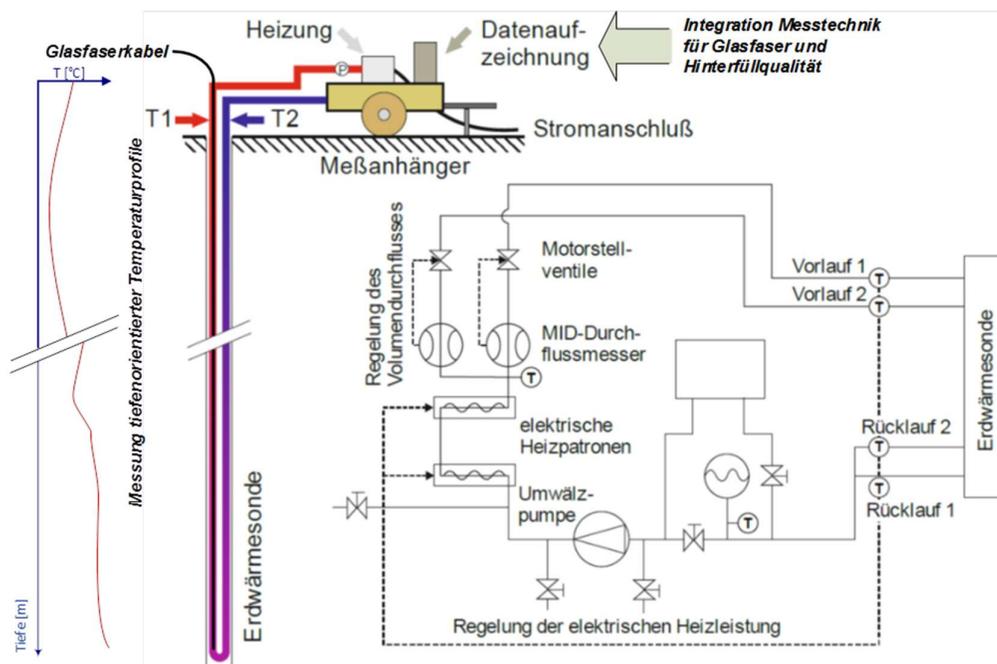


Abbildung 1: Schemaskizze der mobilen Testapparatur basierend auf der TRT-Anlage des ZAE Bayern.

Die Temperaturfühler (Pt100) und Durchflussmessgeräte (Magnetisch-induktive Durchflussmesser) wurden im Labor kalibriert. Durch den Einbau der sehr kleinen Temperatursensoren direkt in den Fluidstrom ohne Tauchhülsen werden Messfehler minimiert. Es sind zwei Fühler im Vorlauf und zwei Fühler im Rücklauf so eingebaut, dass der eigentliche Sensor auf der Geländeoberkante zu liegen kommt. Der Volumenstrom wird während der gesamten Messung auf einen vorgegebenen Wert geregelt und mit zwei Durchflussmessgeräten gemessen. Die Messwerterfassung erfolgt mit einer rechnergesteuerten Messanlage (siehe AP 3). Die dem Untergrund zugeführte Heizleistung wird während der gesamten Messung konstant gehalten. Dies erfolgt durch eine hochgenaue Regelung der elektrischen Heizleistung auf einen vorgegebenen Wert. Neben den Temperaturen werden die Volumendurchflussrate und die elektrische Heizleistung kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet.

Besonders wichtige Temperaturen werden redundant gemessen. Aus der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Erdwärmesonde, gemessen in der Verbindungsleitung zur Sonde, und dem Massendurchsatz wird die eingespeiste thermische Leistung errechnet.

Das ZAE-Testanlagenkonzept wurde hier so erweitert, dass eine Integration weiterer Messtechniken möglich ist. Eine der Erweiterungen besteht darin, dass zusätzlich gleichzeitig faseroptische Temperaturmessungen durchgeführt werden können. Die tiefenorientierten faseroptischen Messungen können an fest verbauten Glasfaserkabeln oder auch direkt an in offene Sondenrohren eingeführten Glasfaserkabeln durchgeführt werden (Abbildung 1).

In der Abbildung 2 ist die verwendete Anlage mit der integrierten Glasfasermesstechnik dargestellt.

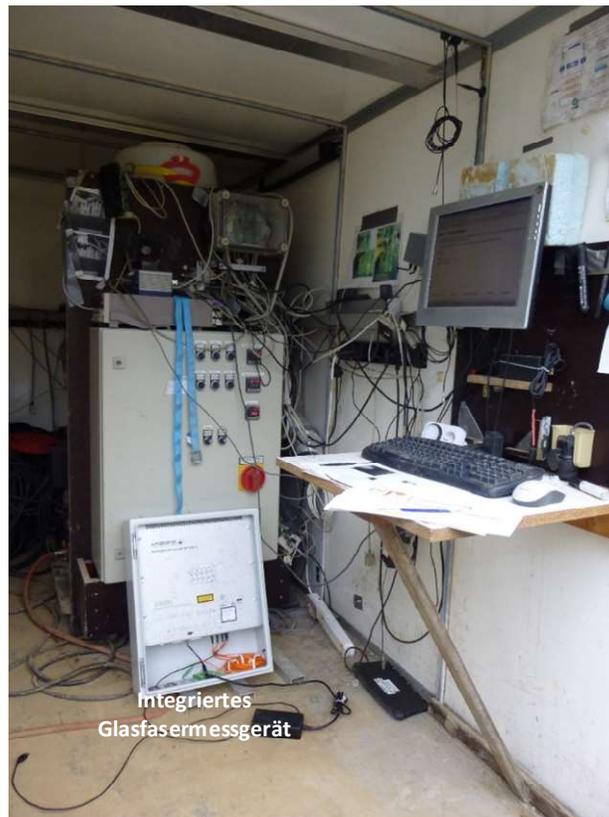


Abbildung 2 verwendete TRT Anlage mit eingebundener Glasfasermesstechnik.

Prinzipiell kann mit der Messanlage eine automatische Prüfung von Hinterfüllsuspensionen durchgeführt werden. Physikalische Parameter, wie z. B. Dichte, Viskosität und Sedimentationsverhalten, können bei entsprechender vorhandenem Messequipment zusätzlich erfasst werden. Dies konnte im Rahmen des Projektes allerdings nur exemplarisch durchgeführt werden, da das Projektbudget für die Anschaffung von z. B. einem Coriolismessgerät zur integrierten automatischen Dichtemessung nicht ausreichte.

Eine neue Variante zur automatischen Abdichtungskontrolle bietet die Integration der Glasfasermesstechnik in die Anlage, da anhand der tiefenorientierten Messung der Temperaturen und Dämpfungssignale prinzipiell eine Protokollierung des Hinterfüllvorgangs möglich ist. Verschiedene Vari-

anten wurden auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft. Zum einen geeignete Glasfaserkabelvarianten, die direkt im Ringraum (Hinterfüllung) einer Sonde eingebaut werden und zum anderen Varianten, die keine im Ringraum fest verbauten Glasfaserkabel benötigen. Die Glasfaserkabel werden dabei beim Hinterfüllvorgang direkt in die Sondenstränge eingeführt und können anschließend wieder ausgebaut und wiederverwendet werden.

2.1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammenarbeit mit dem Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Solites (Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme), Hochschule Biberach und Vegas, Universität Stuttgart.

2.1.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Mit den erzielten Ergebnissen ist ein weiterer Grundstock zur besseren Qualitätskontrolle bei der technischen Umsetzung während der Errichtung von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen gegeben. Weitere Schadensfälle in Baden-Württemberg gilt es zukünftig möglichst zu vermeiden. Die gezielte Weiterentwicklung von TRT Tests zur mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfständen kann durch eine automatisierte Erfassung multipler Parameter ein weiterer wichtiger Baustein sein für nachhaltige und langzeitstabile Erdsondenlösungen.

2.1.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

An der Hochschule Karlsruhe wurde an einem Testfeld ein tiefenorientierter Response Test durchgeführt (Details zum Testfeld siehe in [Zorn et al. 2016]). Der Test wurde mit einer konstanten Heizleistung von ca. 25 W/m an einer 32 Doppel-U-Sonde (HDPE-RX) bei einer Sondenlänge von ca. 36m durchgeführt. Die Auswertung der mittleren effektive Wärmeleitfähigkeit für den Untergrund entsprechend der Ergebniskonvergenzmethoden nach [VDI 4640, Blatt 5] kann der Abbildung 3 entnommen werden.

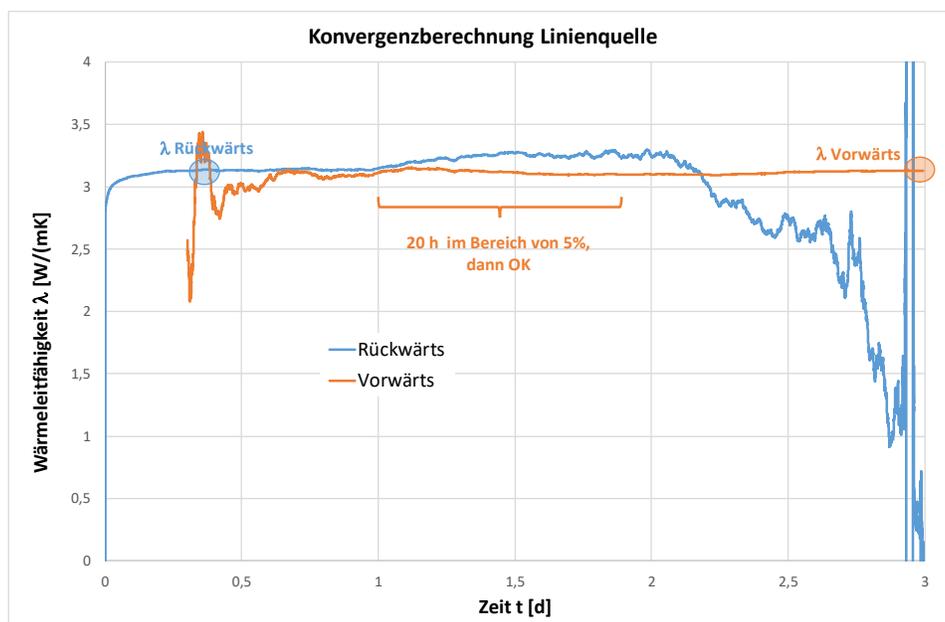


Abbildung 3: Bestimmte Wärmeleitfähigkeit nach Ergebniskonvergenz.

Sehr gut erkennbar ist, dass der Test schon nach ca. 48 Stunden eine genügende Konvergenz der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung erreicht wurde. Die effektive mittlere Wärmeleitfähigkeit kann mit $\sim 3,13 \text{ W/(mK)}$ angegeben werden. Die Auswertemethoden und Gleichungen können der [VDI 4640, Blatt 5] entnommen werden. Entscheidend für die Anwendung der Methoden und ist die Einhaltung des physikalischen und theoretischen Zeitkriteriums für die Anwendung der Linienquellentheorie zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes.

Das ungestörte Temperaturprofil und ausgewählte tiefenorientierte Temperaturprofile zeigen das Aufheizverhalten des Untergrundes (Abbildung 4).

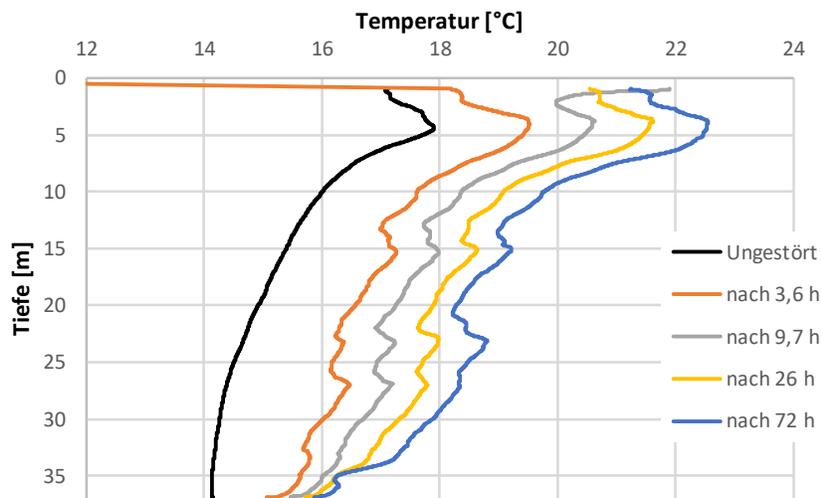


Abbildung 4: ungestörtes Temperaturprofil und Profile in der Heizphase des TRT Test.

Der Standort an der Hochschule Karlsruhe ist eine bekannte urbane Wärmeinsel (link zu AP6), so zeigt das ungestörte Temperaturprofil ein inverses Temperaturprofil, d. h. die Temperatur nimmt mit der Tiefe hin ab. Für die Auswertung der effektiven Wärmeleitfähigkeit spielt das keine Rolle, denn zur Auswertung wird jeweils der relative Anstieg der Temperaturen nach langen Zeiträumen herangezogen. Die Auswertung der tiefenorientierten Temperaturmessdaten zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit der Anwendung der Linienquellentheorie kann der Abbildung 5 entnommen werden. Die Werte für p in der Abbildung zeigt die Genauigkeit der Näherungslösung für die Linienquellentheorie an. Ein Wert für p von 5 bedeutet ein Fehler von 10,5 % und ein Wert für p von 10 bedeutet ein Fehler von 5,3 %.

Aufgrund der natürlichen und messtechnisch bedingten Schwankungen sollte die oberen 4 bis 4,5 m nicht beachtet werden. Die berechneten Wärmeleitfähigkeiten steigen bis ca. 20 m an. Der Grundwasserspiegel liegt bei ca. 5 m unter GOK bei gespannten Grundwasserverhältnissen. Der Grundwasserleiter beginnt bei ca. 7 m unter GOK, d. h. ein direkter Zusammenhang mit den Untergrundverhältnissen ist nicht zu erkennen. Der Anstieg in den berechneten Wärmeleitfähigkeiten in den letzten Metern sind auf die Auswertung nach der Linienquellentheorie zurückzuführen. Tatsächlich ist aber in diesen Bereichen eher eine Punkt- bzw. flache Zylinderquelle anzunehmen. Ins-

gesamt ergibt sich dann in diesen Bereichen einen erhöhten Wärmetransfer in und aus dem Untergrund und scheinbar höhere Wärmeleitfähigkeiten. Insgesamt ist die mittlere integrale Wärmeleitfähigkeit etwas höher als weite Bereiche der tiefenorientierten Wärmeleitfähigkeiten. Trotzdem aber scheinen die ermittelten Werte plausibel. Die Daten zeigen aber auch, dass weitere vertiefende Untersuchungen und Messungen an unterschiedlichen Standorten sinnvoll erscheinen, um die Plausibilität der Kombination aus klassischen TRT und tiefenorientierter Temperaturmessungen überprüfen zu können. Zudem sollten neben der Anwendung einfacher analytischer Lösungen zudem numerische Auswerteverfahren angewendet werden, um mehrere Eingangsparameter verwenden zu können und eine Auswertung der Gesamtmesskurven zu ermöglichen (ohne Berücksichtigung von Zeitkriterien).

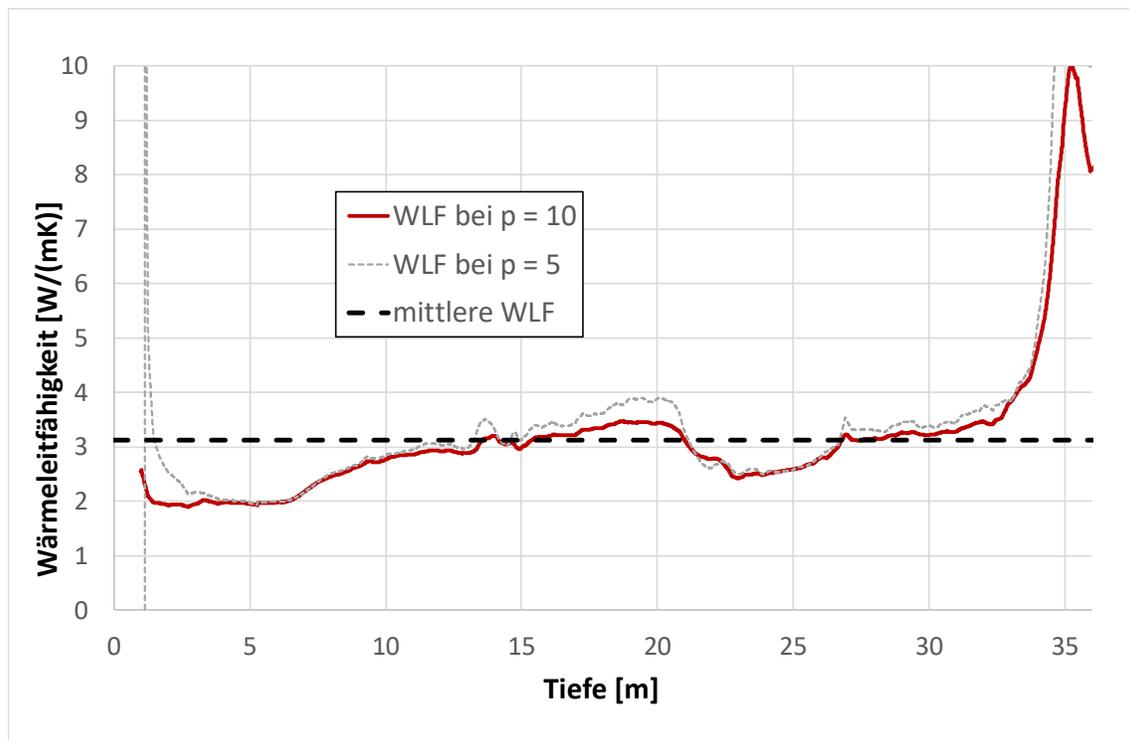


Abbildung 5: berechnete tiefenorientierte Wärmeleitfähigkeitsprofile im Vergleich zur integralen Wärmeleitfähigkeit des gesamten Untergrundes.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass eine Kombination eines klassischen Thermal Response Test mit tiefenorientierten Messungen erfolgreich umgesetzt werden konnte.

Prinzipiell muss zudem angemerkt werden, dass alle durchgeführten tiefenorientierten TRT's aus AP3 gemeinsam vom EIFER und KIT durchgeführt wurden (Ergebnisse siehe AP3).

Im Rahmen dieses Vorhabens konnte weitere automatisierte Messungen physikalischer Parameter von Hinterfüllmaterialien und Abdichtungstechniken noch nicht integriert werden, aber die Anlage ist prinzipiell vorbereitet, weitere Messsignale aufnehmen zu können (siehe auch AP2).

2.1.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die gewonnenen Ergebnisse sollen auf Tagungen (z. B. Geotherm) präsentiert werden. Weiterhin sollen die Untersuchungen im Projekt „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II“ weitergeführt werden und später in einer gesonderten Veröffentlichung aufgearbeitet werden.

In Zusammenarbeit mit dem ZAE Bayern soll an kommerzielle Lösungen für mobile Sonden und Hinterfüllprüfstände gearbeitet werden.

2.1.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die im Projekt gewonnene Datengrundlage (für AP 3 war 1 PM kalkuliert) soll im Rahmen des BMWI Projektes „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II“ einfließen und erweitert werden, so dass hieraus dann wissenschaftliche Veröffentlichungen erstellt werden können.

2.1.12 Literatur

- [Reuß et al. 2012] Reuß, M., Koenigsdorff, R. Zorn, R., Kuckelkorn, J., Steger, H., Pröll, M., & Feuerstein P (2012): Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren. Abschlussbericht, BMWi Förderkennzeichen 0327453A, ZAE Bayern.
- [Austin 1998] Austin, W.: Development of an In-situ System for Measuring Ground Thermal Properties. MSc-thesis, Oklahoma State University (OSU), USA, 164 p., 1998
- [Choudary 1976] Choudary, A.: An approach to determine the thermal conductivity and diffusivity of a rock in situ. - PhD thesis, Oklahoma State University (OSU), 1976
- [Claesson et al. 1985] Claesson, J., Efring, B., Eskilson, P. and Hellström, G.: Markvärme, enhandbok om termiska analyser. 3 vol., SCBR T16-18:1985, Stockholm 1985
- [Claesson und Eskilson 1988] Claesson, J., Eskilson, P.: Conductive Heat Extraction to a deep Borehole, Thermal Analysis and Dimensioning Rules. Energy 13/6, 509-527, 1988
- [Eklöf und Gehlin 1996] Eklöf, C. and S. Gehlin: TED - A Mobile Equipment for Thermal Response Test. MSc-thesis 1996:198E, Lulea University of Technology (LuTH), Sweden, 62 p., 1996
- [Hellström 1991] Hellström, G.: Ground Heat Storage, Thermal Analysis of Duct Storage Systems, I. Theory. 262 p., LTH, 1991
- [Mogensen 1983] Mogensen, P.: Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. Proc. International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Stockholm, Sweden, 652-657, 1983
- [Sanner et al. 2005] Sanner B., Hellström G., Spitler J. and S. Gehlin: Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application. In: Proceedings of the World Geothermal Congress 2005 in Antalya, Turkey, 24-29 April 2005
- [Riegger 2013] Riegger, M.: Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technik); Stuttgart; 2013

- [Van Gelder et al. 1999] Van Gelder, G., Witte, H.J.L., Kalma, S., Snijders, A. and Wennekes, R.G.A: Insitu-Messung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds durch Wärmeentzug. – Proc. OPET-Seminar Erdgekoppelte Wärmepumpen,. 56-58, 1999
- [VDI 4640, Blatt 5] Thermische Nutzung des Untergrunds, Thermal Response Test, Entwurf VDI 4640 Blatt 5, 2016.
- [Zorn et al. 2016] Zorn, R., Neuner, F., Friderich, J., Meier, S., und Kauffeld, M: Miniaturisierte in-situ Druck- und Temperaturmessung in Erdwärmesonden, Zeitschrift der Geothermischen Vereinigung e. V., Nr.8, 2016.

2.2 Integrative und detaillierte messtechnische Erfassung und Auswertung von Erdsondenprüfmethoden (Solites, Dipl.-Ing. Mathieu Riegger, M.Sc. Julian Rolker)

2.2.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

In diesem Arbeitspaket wurde die im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus [Riegger, 2013] neu entwickelte und unter großem Aufwand in einem ersten Stadium betriebene Versuchsanlage zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden (EWS) weiterentwickelt.

Eine zentrale Rolle kommt hierfür dem im Rahmen des Arbeitspakets 1 zu erstellenden mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstand (MOFA) zu. Dieser umfasst ein zur Durchführung der Versuche zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden erforderliches Thermal Response Test (TRT) Gerät. Im Gegensatz zu früheren Versuchen wurden mit der weiterentwickelten Versuchsanlage eine zentrale Messdatenerfassung aller für die Versuchsauswertung relevanten Messdaten und eine teilautomatisierte Testprozedur realisiert, wodurch eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und eine Minimierung des Aufwands und der Kosten bei der Versuchsdurchführung erreicht werden. Diese Verbesserungen stellen die Grundlage dafür dar, das Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden, das eine höhere Genauigkeit als die hierfür üblicherweise eingesetzten TRTs aufweist [Riegger, 2016], [Zervantonakis, Reuß, 2006], künftig als standardisiertes Messverfahren zu Forschungszwecken, für Produktentwicklungen oder für Herstellertests anbieten zu können. Darüber hinaus bietet das Messverfahren gegenüber TRTs den Vorteil, dass die ermittelten Resultate durch den möglichen zerstörungsfreien Rückbau der Erdwärmesonden mit dem tatsächlichen Zustand im Bohrloch verglichen werden können.

Die mit den Messungen zur Bestimmung der thermischen Effizienz ermittelten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände von Erdwärmesonden können in den gängigen EWS-Auslegungsprogrammen (z.B. EED, EWS, GEO-HAND^{light}) berücksichtigt werden. Für eine korrekte Berücksichtigung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands ist eine Umrechnung der bei den Versuchen ermittelten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände auf die geplanten Betriebsbedingungen (Erdwärmesondenlänge, EWS-Volumenstrom, Art und Temperatur des Wärmeträgermediums) erforderlich. Hierfür existierte bisher keine Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Die thermischen Eigenschaften von Erdwärmesonden in (quasi-)stationären Betriebszuständen werden üblicherweise mit Hilfe des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands beschrieben. Der effektive thermische Bohrlochwiderstand, der als Integralwert u. a. die konvektive Wärmeübertragung in den Sondenrohren, die Wärmeleitung durch die Sondenrohrwand und die Wärmeleitung im Verfüllmaterial zusammenfasst, dient in zahlreichen EWS-Auslegungsprogrammen (EED, EWS, GEO-HAND^{light}) als Eingabeparameter oder kann mit diesen berechnet werden.

Üblicherweise wird der effektive thermische Bohrlochwiderstand von realisierten, im Untergrund eingebauten EWS mit Hilfe eines Thermal Response Tests bestimmt. Bei diesem Verfahren gibt es allerdings keine Möglichkeit, die ermittelten Messwerte mit dem tatsächlichen Zustand im Bohrloch (insbesondere Verfüllqualität und Verlauf der Sondenrohre) zu vergleichen, um daraus fundierte Rückschlüsse über den Einfluss einzelner Faktoren auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand ziehen zu können. Zur Untersuchung dieser Aspekte wurde im Rahmen des Forschungsvorha-

bens EWSplus ein Versuchsaufbau sowie ein Mess- und Auswerteverfahren entwickelt, das die Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von zerstörungsfrei rückbaubaren Erdwärmesonden mit hoher Genauigkeit ermöglicht [Riegger, 2013].

Die hierfür verwendete Versuchsanlage wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus in einem ersten Stadium unter großem Aufwand betrieben. Um bei der Messdurchführung die Zuverlässigkeit zu erhöhen und gleichzeitig den Aufwand und die Kosten zu verringern, sind Weiterentwicklungen der Versuchsanlage insbesondere hinsichtlich einer zentralen Datenerfassung und –auswertung sowie einer (teilweisen) Versuchsautomatisierung notwendig.

Diese Verbesserungen sind erforderlich, um das Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden künftig als standardisiertes Messverfahren zu Forschungszwecken, für Produktentwicklungen oder für Herstellertests anbieten zu können.

2.2.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Die thermischen Eigenschaften von Erdwärmesonden in (quasi-)stationären Betriebszuständen werden üblicherweise mit Hilfe des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands beschrieben. Der effektive thermische Bohrlochwiderstand, der als Integralwert u.a. die konvektive Wärmeübertragung in den Sondenrohren, die Wärmeleitung durch die Sondenrohrwand und die Wärmeleitung im Verfüllmaterial zusammenfasst, dient in zahlreichen EWS-Auslegungsprogrammen (EED, EWS, GEO-HAND^{light}) als Eingabeparameter oder kann mit diesen berechnet werden.

Üblicherweise wird der effektive thermische Bohrlochwiderstand von realisierten, im Untergrund eingebauten EWS mit Hilfe eines Thermal Response Tests bestimmt. Bei diesem Verfahren gibt es allerdings keine Möglichkeit, die ermittelten Messwerte mit dem tatsächlichen Zustand im Bohrloch (insbesondere Verfüllqualität und Verlauf der Sondenrohre) zu vergleichen, um daraus fundierte Rückschlüsse über den Einfluss einzelner Faktoren auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand ziehen zu können. Zur Untersuchung dieser Aspekte wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus ein Versuchsaufbau sowie ein Mess- und Auswerteverfahren entwickelt, das die Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von zerstörungsfrei rückbaubaren Erdwärmesonden mit hoher Genauigkeit ermöglicht [Riegger 2013].

Die hierfür verwendete Versuchsanlage wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus in einem ersten Stadium unter großem Aufwand betrieben. Um bei der Messdurchführung die Zuverlässigkeit zu erhöhen und gleichzeitig den Aufwand und die Kosten zu verringern, sind Weiterentwicklungen der Versuchsanlage insbesondere hinsichtlich einer zentralen Datenerfassung und –auswertung sowie einer (teilweisen) Versuchsautomatisierung notwendig.

Diese Verbesserungen sind erforderlich, um das Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden künftig als standardisiertes Messverfahren zu Forschungszwecken, für Produktentwicklungen oder für Herstellertests anbieten zu können.

2.2.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets soll das in dem Forschungsprojekt EWSplus entwickelte Messverfahren zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands [Riegger, 2013] durch In-

tegration in den mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstand (MOFA, siehe Arbeitspaket 1) standardisiert, automatisiert sowie nach dieser Weiterentwicklung erstmals eingesetzt und überprüft werden.

Hierzu sollen diverse Temperaturfühler, ein Volumenstrommessgerät, ein Thermostat, ein Pumpenfrequenzumrichter etc. in die zentrale Datenerfassung und Steuerung des mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstands, der ein Thermal-Response-Test-Gerät beinhaltet, aufgenommen werden. Weiterhin soll der Testablauf durch Automatisierungen vereinfacht und beschleunigt werden.

Abschließend sollen erste Versuche mit dem mobilen Sonden- und Hinterfüllprüfstand an Erdwärmesonden, die im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech erstellt werden, durchgeführt und wenn möglich durch Vergleich mit bereits vorliegenden Messergebnissen derselben EWS validiert werden.

2.2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus wurde ein neues Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Effizienz von EWS entwickelt, validiert und bei zahlreichen EWS eingesetzt. Hierzu erfolgte der Aufbau einer Versuchsanlage, die bisher in einem ersten Stadium unter großem Aufwand betrieben wurde. Zahlreiche Geräte mussten für die Versuche ausgeliehen (u. a. TRT-Messgerät, Temperaturfühlermessketten, Datenlogger) und getrennt voneinander betrieben werden.

Das im Rahmen des Forschungsprojekts EWSplus entwickelte Mess- und Auswerteverfahren erlaubt die Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Erdwärmesonden mit einer höheren Genauigkeit als die üblicherweise hierfür eingesetzten TRTs [Riegger, 2016], [Zervantonakis, Reuß 2006].

Das EWSplus-Testgelände musste inzwischen rückgebaut werden und steht nicht mehr zur Verfügung. Jedoch wurde im Rahmen des vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhabens EWS-tech in Zusammenarbeit von Solites mit EIFER und dem Institut für Angewandte Geowissenschaften des KIT auf dem Gelände des KIT ein neues, weiterentwickeltes, langfristig nutzbares Testgelände erstellt [Riegger et al., 2015].

Auf Grund der finanziellen Beschränkungen des Forschungsvorhabens EWS-tech ist eine Weiterentwicklung der Versuchsanlage zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands in dem Forschungsvorhaben EWS-tech nicht möglich, obwohl entsprechende Messungen vorgesehen sind.

2.2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannte Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Keine.

2.2.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

- Fertigstellung des EWS-tech Realmaßstabsversuchsgeländes (Mitte 2015)
- Einrichtung eines mobilen Mess-PCs, auf den alle beteiligten Projektpartner per Fernzugriffsoftware zugreifen können

- Erstellung einer ersten überwiegend automatisierten Microsoft® Office Excel® Versuchs-Auswertemappe
- Abholung des Thermal Response Test Geräts am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern) im Oktober 2015
- Durchführung des ersten Versuchs (EWS 3-O Versuch 1) in der neu erstellten Versuchsanlage (Oktober 2015) unter Anwendung einer zentralen Datenerfassung und Versuchssteuerung sowie der ersten überwiegend automatisierten Microsoft® Office Excel® Versuchs-Auswertemappe
- Wiederholung des ersten Versuchs (EWS 3-O Versuch 2) nach Durchführung verschiedener Optimierungen (u. a. Anpassung der Regelstrategie zur Erreichung konstanter Ringspalttemperaturen).

Durchführung der weiteren Versuche und begleitende Optimierung der zentralen Messdatenerfassung sowie Anpassung, Optimierung und Fertigstellung der zentralen, überwiegend automatisierten Microsoft® Office Excel® Auswertemappe.

2.2.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In diesem Verbund-Forschungsvorhaben fand eine intensive Kooperation mit EIFER statt, das im Rahmen von Arbeitspaket 1 das für die Versuchsdurchführung und die messtechnische Integration erforderliche TRT Gerät zur Verfügung stellte. Eine weitere enge Zusammenarbeit mit EIFER und AGW-KIT erfolgte im Bereich der Glasfasertemperaturmessungen (Arbeitspaket 1 und 3), deren Datenerfassung in den in diesem Arbeitspaket eingerichteten mobilen Mess-PC integriert wurde. Das Arbeitspaket 3 wurde darüber hinaus von Solites durch den Einbau von Glasfaserkabeln auf dem EWS-tech Realmaßstabsversuchsgelände (dauerhafter Einbau gemeinsam mit den Außenrohren gemäß Abbildung 7; Einbau in Versuchs-EWS) und durch die Bereitstellung von Informationen zur Verfüllqualität der untersuchten EWS unterstützt, um damit eine Bewertung der von AGW-KIT in Arbeitspaket 3 durchgeführten Messungen hinsichtlich deren Aussagekraft z. B. in Bezug auf eine Fehlstellendetektion zu ermöglichen.

EIFER und AGW-KIT unterstützten die Arbeiten in diesem Arbeitspaket durch logistische Hilfen und Anregungen bei versuchs- und messtechnischen Fragestellungen.

Die Herstellung der in Arbeitspaket 5 verwendeten Versuchs-Erdwärmesonde erfolgte in dem von Solites am KIT im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens EWS-tech betriebenen Technikumsprüfstands. Hierzu erfolgte eine Kooperation der Projektpartner VEGAS, AGW-KIT, EIFER und Solites.

Die Erstellung eines Software-Werkzeugs durch die Hochschule Biberach zur Umrechnung von gemessenen effektiven thermischen Bohrlochwiderständen auf die geplanten Betriebsbedingungen (s. Arbeitspaket 4) einer Erdwärmesonde wurde von Solites beratend unterstützt.

2.2.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Erdwärmesonden eignen sich als wetter- und tageszeitunabhängige erneuerbare Energiequelle zur Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden. Durch den vermehrten Einsatz effizienter Erdwärme-

sondenanlagen können CO₂-Emissionsreduktionen gegenüber konventionellen Wärme- und Kälteversorgungsstechniken erreicht werden, wodurch zur Umsetzung der Energiewende im Wärmebereich beigetragen wird.

Neben einer stimmigen Planung des Gesamtsystems kommt hierbei der Auslegung der Erdwärmesondenanlage als Wärmequelle und/oder Wärmesenke besondere Bedeutung zu. Hierbei kann neben einer Optimierung der Tiefe und Anordnung der Erdwärmesonden lediglich über die thermischen Eigenschaften der einzelnen Erdwärmesonden, also über deren effektiven thermischen Bohrlochwiderstand, Einfluss genommen werden. Mit dem in diesem Vorhaben weiterentwickelten Messverfahren soll dazu beigetragen werden, dass zukünftig Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Faktoren auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand vereinfacht durchgeführt werden können. Die aus diesen Untersuchungen resultierenden Erkenntnisse sollen letztendlich in die Erstellung effizienter Erdwärmesondenanlagen einfließen.

2.2.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

Die Fertigstellung des für die Versuche benötigten Versuchsgeländes erfolgte bis Mitte des Jahres 2015 im Forschungsvorhaben EWS-tech [Riegger et al., 2015]. Um die Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands der zerstörungsfrei rückbaubaren Versuchs-EWS durchführen zu können, ist zusätzlich zu einem TRT Gerät der Betrieb einer Ringspaltumwälzung und -temperierung erforderlich, die in einem stationären Versuchscontainer auf dem EWS-tech Versuchsgelände eingebaut ist (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7).

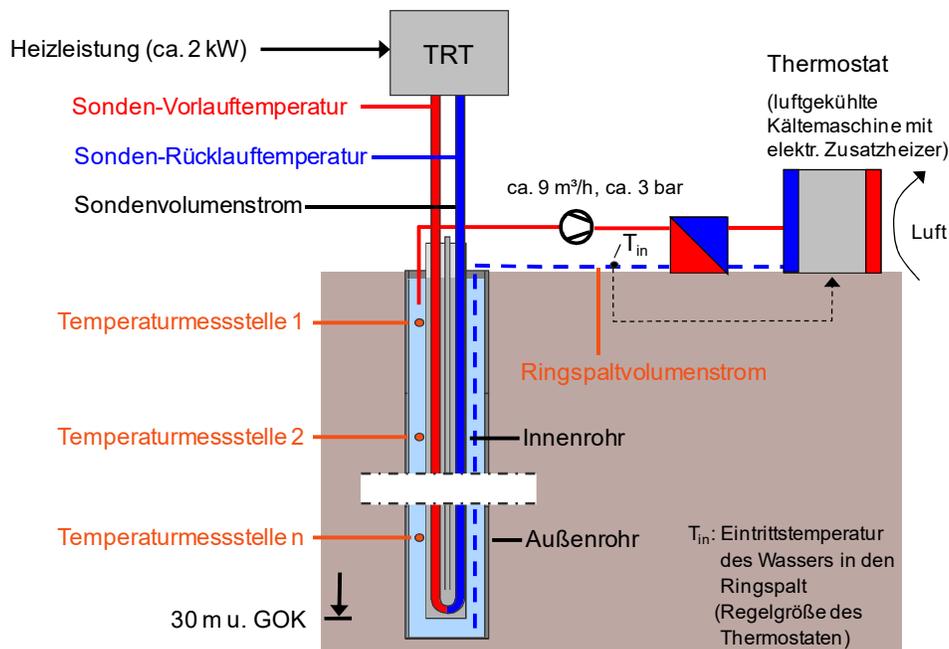


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands



30 m



- | | | |
|---|--|--------------------------------------|
| 1 Versuchsbohrungen | 5 Anschluss der Ringspaltumwälzung | 8 Alu-Portalkran mit Hebezeug |
| 2 Eingebautes PE-Innenrohr mit Erdwärmesonde | 6 Versuchscontainer mit Anlage zur Ringspaltumwälzung und -temperierung | 9 PE-Innenrohre |
| 3 Misch- und Verpressanlage | 7 Temperaturmessfühler und Datenlogger | 10 Lagercontainer |
| 4 Coriolis-Messgerät | | |

Querschnitt durch Versuchsbohrung mit eingebauter Erdwärmesonde

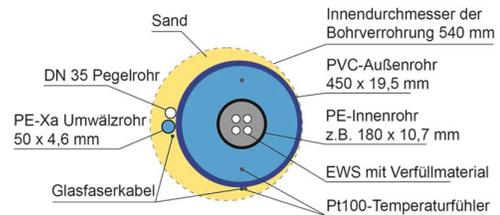


Abbildung 7: Fertiggestelltes EWS-tech Realmaßstabsversuchsgelände

Zur zentralen Messwerterfassung und Steuerung der Versuche wurde ein mobiler Mess-PC eingerichtet, auf den alle beteiligten Projektpartner über eine in den Versuchscontainer verlegte LAN-Verbindung und eine Fernzugriffsoftware zugreifen können. Auf dem Mess-PC können alle versuchsrelevanten Messwerte in eine neu erstellte zentrale Auswertemappe eingelesen werden, so dass die Versuche zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands überwiegend automatisiert ausgewertet und die Versuchsbedingungen über Fernzugriff auf die entsprechenden Geräte komfortabel angepasst werden können (siehe Abbildung 8). Die Zielsetzungen dieses Arbeitspakets (Aufbau einer zentralen Messdatenerfassung, Vereinfachung und Beschleunigung des Testablaufs durch weitgehende Automatisierungen) konnte also erreicht werden.

Mit dem mobilen Mess-PC können außerdem auch Glasfaser-temperaturmessungen durchgeführt werden (siehe AP 1 und 3).

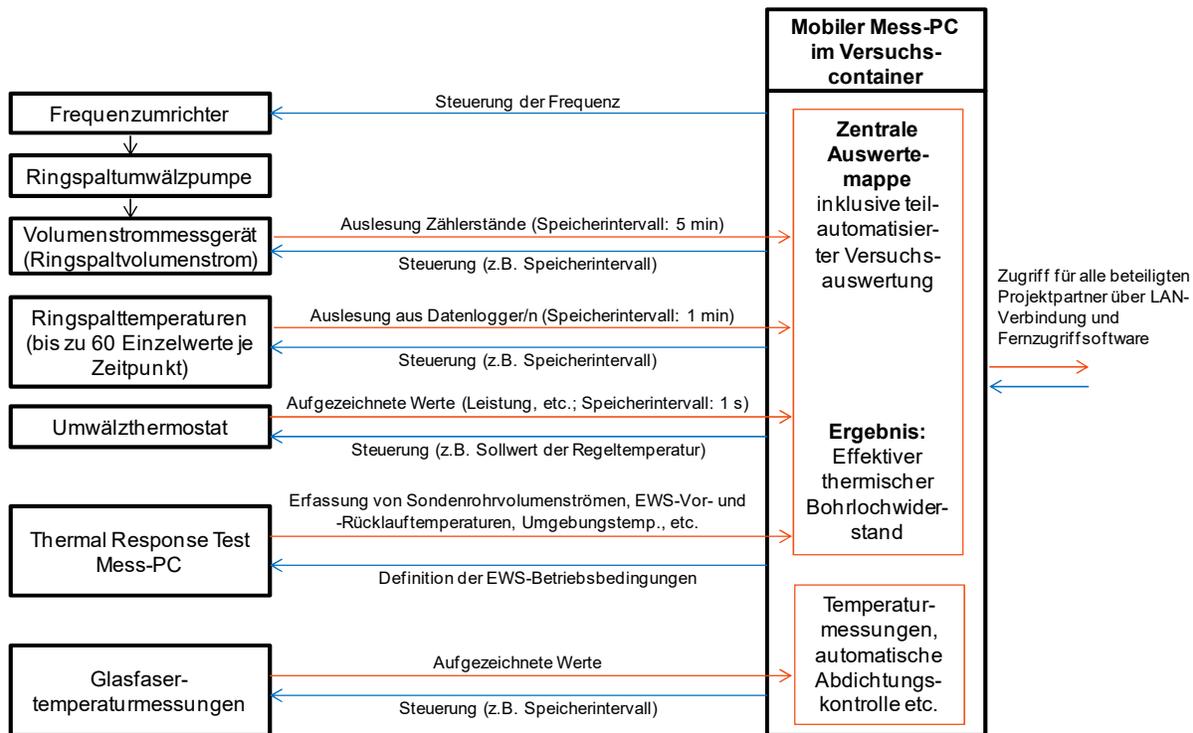


Abbildung 8: Schema der zentralen Messdatenerfassung und -steuerung

Die in diesem Arbeitspaket erreichten Verbesserungen wurden von Oktober 2015 – Februar 2016 zur effizienten Durchführung der folgenden sechs Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech für die Bestimmung von effektiven thermischen Bohrlochwiderständen genutzt:

- EWS 3-O Versuch 1
- EWS 3-O Versuch 2
- EWS 4-W mit Turbulatoren und verschiedenen EWS-Volumenströmen
- EWS 4-W ohne Turbulatoren mit verschiedenen EWS-Volumenströmen
- EWS 7-O
- EWS 8-W.

Die Ergebnisse dieser sechs Versuche werden im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens EWS-tech dargestellt, der ab ca. Juli 2016 auf der Internetseite www.solites.de zum Abruf bereitstehen wird.

Die Gesamtdauer der im Forschungsvorhaben EWS-tech durchgeführten Versuche, bei denen die in diesem Arbeitspaket erarbeiteten Verbesserungen angewendet wurden, beträgt 44 Tage. Das entspricht bei den durchgeführten sechs Versuchen einer durchschnittlichen Dauer von ca. 7 Tagen je Versuch. Durch die Behebung der bei diesen Versuchen aufgetretenen anlagen- und datenerfassungstechnischen Probleme konnte zu einer Weiterentwicklung und einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Versuchsanlage beigetragen werden. Die Probleme umfassten z. B. einen undichten Wärmeübertrager, eine unzureichende Belüftung des Versuchscontainers, Mess-PC-Abstürze aufgrund eines nicht kompatiblen Adapters sowie eine unzuverlässige Datenübermittlung eines Volumenstrommessgeräts, das daraufhin im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech ausgetauscht wurde.

Ein für die sechs durchgeführten Versuche exemplarischer Messdatenverlauf ist in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt. Der Verlauf zeigt, dass sich durch die Beheizung der EWS mit konstanter Heizleistung und die Zirkulation und Temperierung des Wassers im Ringspalt mit verschiedenen Ringspaltvolumenströmen in den Auswertephasen die für die Versuchsauswertung erforderlichen stationären Zustände einstellen. Aus den in den Auswertephasen vorliegenden Messdaten werden mit Hilfe eines indirekten in [Riegger, 2013] erläuterten Verfahrens, die Wärmeübergangszahlen an der Außenseite des Innenrohrs und der effektive thermische Bohrlochwiderstand ermittelt (s. Abbildung 11). Der für EWS 7-O ermittelte effektive thermische Bohrlochwiderstand beträgt $0,0813 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ und liegt damit in dem für diese Erdwärmesondenkonfiguration (30,5 m tiefe 2-U-EWS; Sondenrohre: PE 100 32 x 2,9 mm; „Bohrlochdurchmesser“: 159 mm; keine Abstandshalter/ Zentrierhilfen; thermisch verbessertes Verfüllmaterial mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $2 \text{ W}/\text{m}/\text{K}$ nach Datenblatt; EWS-Volumenstrom: 426 l/h; Wärmeträgermedium: Wasser) erwarteten Wertebereich.

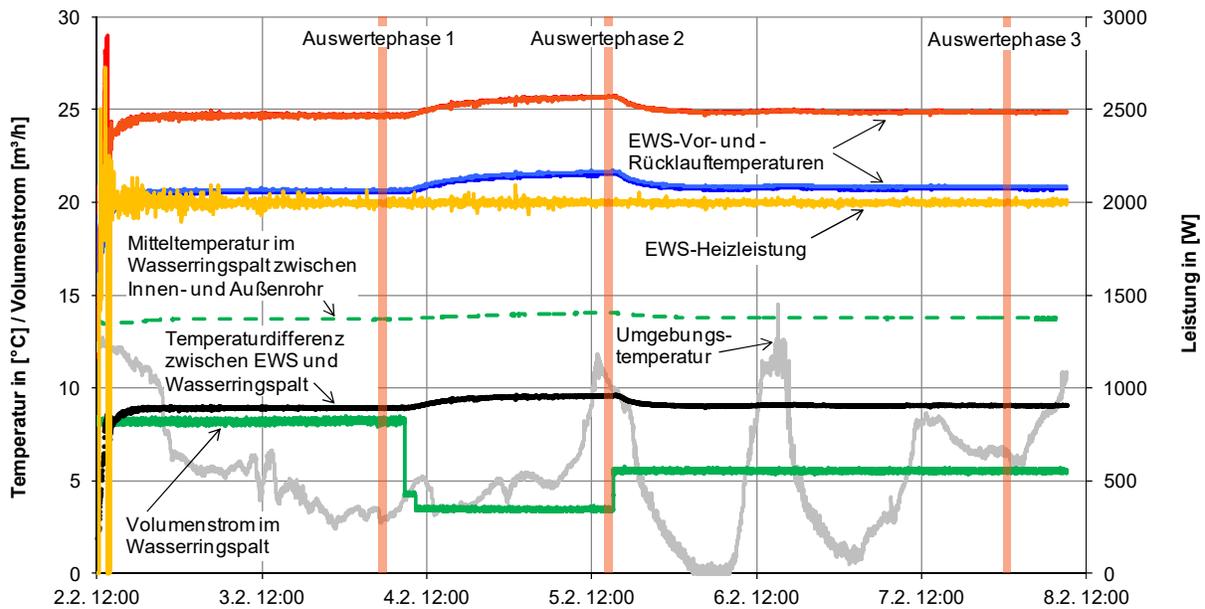


Abbildung 9: Verlauf der wesentlichen Messdaten des Versuchs an EWS 7-O zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands

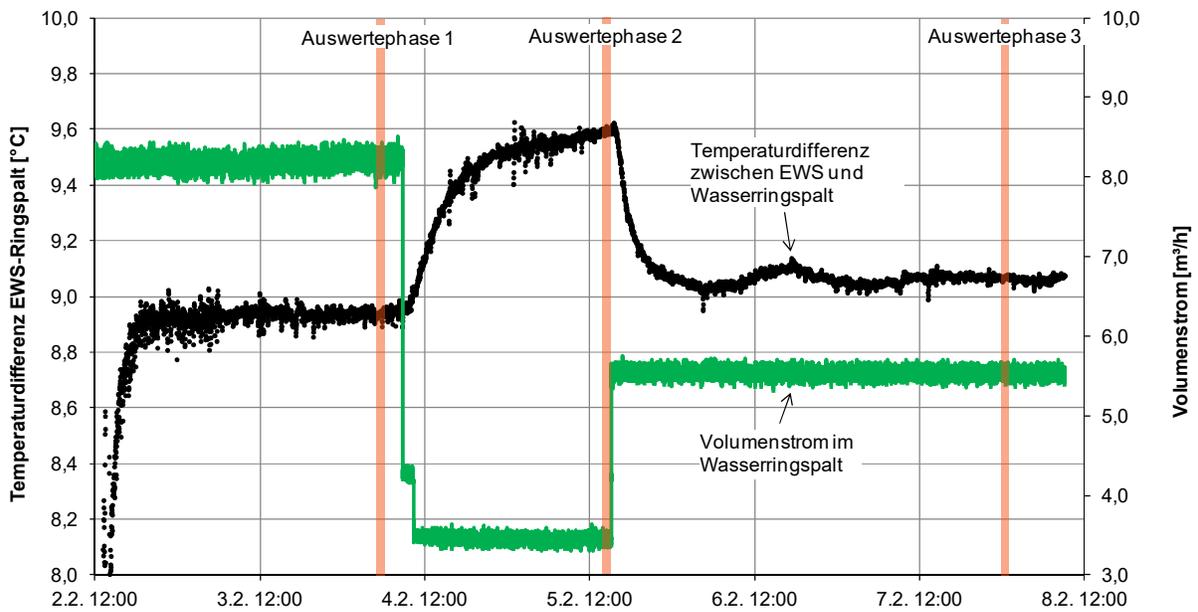


Abbildung 10: Detaildarstellung der Temperaturdifferenz zwischen der arithmetischen EWS-Fluidmittelmtemperatur und der Temperatur im Wasserringspalt bei der Messung zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von EWS 7-0

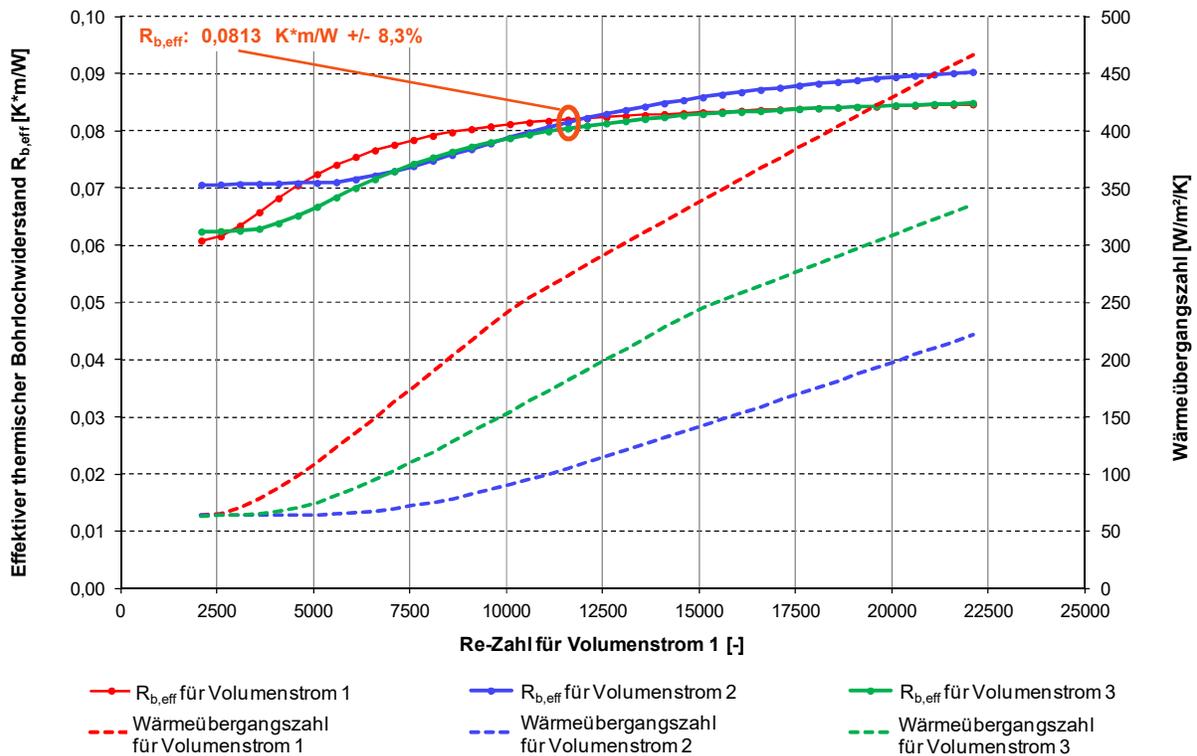


Abbildung 11: Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands $R_{b,eff}$ von EWS 7-0 durch fiktive Erhöhung der Re-Zahlen im Wasserringspalt

2.2.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfernde Anwendungen und

Branchen

Die in diesem Arbeitspaket erreichten Verbesserungen ermöglichen es, das Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden künftig als standardisiertes Messverfahren zu Forschungszwecken, für Produktentwicklungen oder für Herstellertests anbieten zu können.

2.2.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die mit dem weiterentwickelten Messverfahren erzielten Messergebnisse von sechs im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech durchgeführten Versuchen werden in dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens EWS-tech veröffentlicht, der voraussichtlich ab Juli 2016 auf www.solites.de und auf <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> verfügbar sein wird.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech erfolgt/e durch Solites ein umfangreicher Forschungstransfer unter anderem durch Vorträge bei zahlreichen verschiedenen Fachkongressen. Bei diesen Vorträgen wurde und wird auf die erweiterten und verbesserten Möglichkeiten zur Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden auf dem Realmaßstabsversuchsgelände am KIT hingewiesen.

An dem Zaun des EWS-tech Realmaßstabsversuchsgeländes wurde eine witterungsbeständige Informationstafel (2 x 1 m) angebracht, auf der die Inhalte des Forschungsvorhabens EWS-tech und das Messverfahren zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands erläutert sind.

Am Tag der offenen Tür des Karlsruher Instituts für Technologie (27.06.2015) wurden die Forschungsarbeiten im Rahmen des Vorhabens EWS-tech und das Messverfahren zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands der interessierten Öffentlichkeit auf dem Versuchsgelände nähergebracht.

2.2.12 Literatur

[Riegger, 2013] Riegger, M.: *Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technik*. Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWSplus, Stuttgart, 2013.

[Riegger et al., 2015] Riegger et al.: *Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie*. Zwischenbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-tech, Stuttgart, 2015.

[Riegger, 2016] Riegger, M.: *Entwicklung, Überprüfung und Anwendung eines neuen Mess- und Auswerteverfahrens zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Erdwärmesonden*. Dissertation in Vorbereitung, Stuttgart, voraussichtlich 2016.

[Zervantonakis, Reuß, 2006] Zervantonakis; Reuß: *Quality requirements of a thermal response test*. Ecostock Conference Proceedings, Pomona, New Jersey (USA), 2006.

2.3 Geophysikalische Messmethoden (Faseroptik) (KIT - AWG, Dr. Hagen Steger, Prof. Dr. Philipp Blum, Prof. Dr. Ingrid Stober)

2.3.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Arbeitspaket 3 wurden an mehreren Standorten sowie im Labor mehrere Temperaturmessungen mittels Glasfaserkabeln durchgeführt und mit Referenztemperaturen verglichen. Dabei wurden unterschiedliche Messverfahren angewandt. Es konnte gezeigt werden, dass Double-End-Messungen eine höhere Messgenauigkeit gegenüber Single-End-Messungen aufweisen. Die Messwerte der Single-End-Messungen lagen jedoch näher bei den Messwerten der Referenzmessungen. Darüber hinaus ist auch die Genauigkeit der Messwerte bei langen Messzeiten höher als bei kurzen Messzeiten. Hieraus lässt sich ableiten, sofern es die Fragestellung sowie die Standortbedingungen zulassen, lange Messzeiten gepaart mit einer Double-End-Messmethode genauere Temperaturmesswerte liefern als eine Single-End-Messung mit kurzen Messzeiten. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass für das jeweilige Kabel eine Kalibrierung erfolgen muss.

Neben den Temperaturmessungen wurde auch ein Enhanced Geothermal Responsetest (EGRT) in der Technikumsanlage von Vegas durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass besonders im Falle von heterogenen Standortbedingungen mit stark unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten die temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeitsentwicklung bei der Ermittlung der Heizleistung unbedingt beachtet werden muss. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass bei geringen Schichtmächtigkeiten die Auswertung mit der Linienquellen-Methode ungeeignet ist und auf die Zylinderquellen-Methode zurückgegriffen werden sollte.

2.3.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Für den ökonomischen und nachhaltigen Betrieb von Erdwärmesondenanlagen ist eine exakte Auslegung, Planung und Umsetzung, sowie die Überwachung und Kontrolle während des Baus und des Betriebs notwendig. Hierfür gibt es zurzeit bereits bestehende Techniken, wie z.B. den Thermal Response Test (AP1) und den Enhanced Geothermal Response Test sowie die Temperaturmessung mittels Glasfaserkabel. Bei der Glasfasermessung gibt es unterschiedliche Messmethoden, die einen Einfluss auf die Genauigkeit der Temperaturmesswerte sowie der genauen Tiefenzuordnung haben. Daher sollten im Projekt die Rahmenbedingungen auf den Einfluss der Messgenauigkeit untersucht werden und hieraus Empfehlungen für Messmethoden und Messzeiten erfolgen. Darüber hinaus sollte der Grundstock zur Implementierung dieser Technologie in herkömmliche Thermal Response Tests (AP1) geschaffen werden.

2.3.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Arbeitspakts AP 3 „Geophysikalische Messmethoden (Faseroptik)“ sollen unterschiedliche Glasfaserkabelösungen für Temperaturmessungen bei oberflächennahen Geothermieanlagen durchgeführt und miteinander verglichen werden, sowie diese Technologie in den Versuchsaufbau aus AP 1 (EIFER) integriert werden. Bei der Temperaturmessung mit Glasfasern wird das reflektierte Signal eines emittierten Laserstrahls ausgewertet. Da die Temperaturmessung mittels der Glasfasertechnologie ein breites Anwendungsspektrum sowie unterschiedliche Messvarianten bietet, wurden im Projekt die unterschiedlichen Szenarien nachgestellt und bewertet. Hierbei

standen folgende Optionen zur Verfügung: Vergleich von Double-End- mit Single-End-Lösungen, Messungen mit und ohne Heizdraht. Die Messungen wurden in Zusammenarbeit mit mehreren Projektpartnern an den Standorten Großbehälter an der Universität Stuttgart, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS), EWS-Testfeld des Forschungsvorhabens EWS-Tech (Solites), Testfeld Hochschule Biberach, Testfeld Bad Waldsee sowie im Labor des KIT/AGW durchgeführt. Neben der reinen Temperaturmessung wurde in Zusammenarbeit mit EIFER (AP1) auch die Hydratationswärme bei einem Hinterfüllversuch (siehe AP 2) sowie ein EGRT durchgeführt.

2.3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Temperaturmessungen mittels Glasfaserkabel werden bereits seit über 20 Jahren im Bereich des Wasserbaus bei der Überwachung von Dämmen sowie bei der Bauwerksüberwachung in der Geotechnik angewendet [Heidinger, 1998]. Darüber hinaus kann bei Tiefen Geothermie-Projekten sowohl in der Förderbohrung als auch in der Injektionsbohrung das Temperaturprofil gemessen werden und zur Bewertung die Reservoirs unterstützend herangezogen werden. Ferner kann mittels dieser Technologie die Hydratationswärmeentwicklung im Massenbeton gemessen werden [Dornstädter et al., 2008]. Die Firma GTC Kappelmeyer GmbH führt seit über 10 Jahren sogenannte Enhanced Geothermal Response Tests (EGRT) zur Ermittlung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds bei Erdwärmesondenfeldern durch [Heidinger et al., 2004]. [Lehr, Sass, 2014] bewerten die Ergebnisse einer 400 m tiefen Erdwärmesonde, die mit der Linienquellenmethode und der Zylinderquellenmethode ausgewertet wurden. Untersuchungen hinsichtlich der Messzeit und der Kabellänge (Längen von 4 und 8 km) auf die Temperaturmesswerte wurden durch [Soto et al., 2007] durchgeführt.

Bei EGRT wird zurzeit der Temperatureinfluss auf die elektrische Leitfähigkeit nicht berücksichtigt, was sich auf die Heizleistung auswirkt. Dies spielt besonders in wechselgelagerten Böden mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten eine entscheidende Rolle, da sich Bereiche mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit stärker erwärmen als Bereiche mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit (oder mit starkem Grundwasserfluss). Diese stärkere Erwärmung bedingt einen höheren Spannungsabfall in diesem Bereich und somit eine höhere Heizleistung.

2.3.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannte Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Keine.

2.3.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

Distributed-Temperature-Sensing-System (DTS)

Faseroptische Temperaturmessung eignen sich aufgrund ihrer hohen Informationsdichte im besonderen Maße für die ortsaufgelöste Erfassung der Temperaturverteilung [Heidinger, 2009]. Unter Verwendung eines Lasers kann entlang einer Glasfaserleitung, die hierbei als Sensor fungiert, die Temperaturverteilung entlang der Glasfaser bestimmt werden, da die optischen Eigenschaften der Glasfaser temperaturabhängig sind.

In Abbildung 12 ist das Messprinzip der DTS-Messung schematisch dargestellt. Das durch einen

energiereichen Laser in eine Glasfaser gesendete optische Signal wird entlang seiner gesamten Lauf-
länge reflektiert. Dieses zurückgestrahlte Signal besitzt eine sehr geringe Intensität, kann aber hin-
sichtlich seiner Frequenzverteilung analysiert werden. Dabei wird zwischen einen Rayleigh- und ein-
nen Raman-Anteil unterschieden. Die beiden Komponenten des Raman-Anteils, das Stokes-Licht
und das Anti-Stokes-Licht sind hinsichtlich ihres Frequenzspektrums von der Temperatur am Ort der
Reflexion in der Glasfaser abhängig. Eine Frequenzanalyse ermöglicht eine vergleichsweise genaue
Bestimmung der Temperatur am Ort der Reflexion. Die Lagebestimmung wird durch eine sehr
exakte Messung der Reflexionszeiten, unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit in der Glas-
faser, durchgeführt [Heidinger, 2009]. Zur Durchführung von Temperaturmessungen werden die
optischen Fasern mittels Steckverbindungen (Pigtail) an den Laser angeschlossen. Die Messungen
können sowohl quasi-kontinuierlich, als auch in beliebig festgelegten Zeitintervallen durchgeführt
werden.

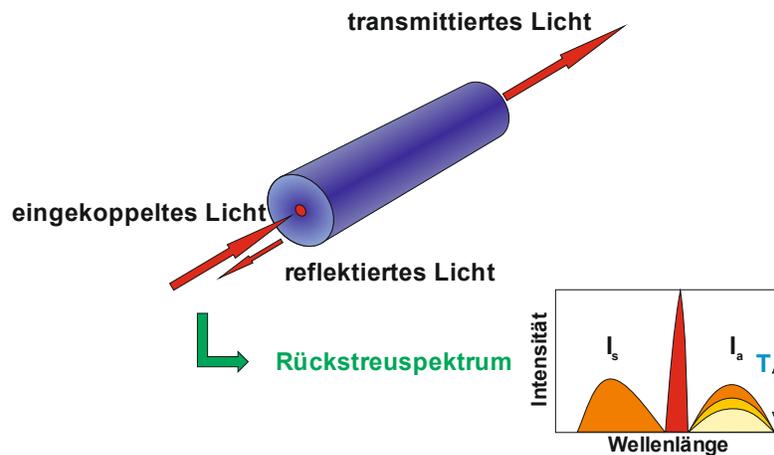


Abbildung 12: Faseroptisches Messprinzip.

Bei allen in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurde ein Glasfaserhybridkabel (HELUKOM A-
DSQ(ZN)B2Y; 1x4 G 50/125 + Cu 3x0,5 mm²) verwendet. Dieses Kabel ermöglicht neben der Tempe-
raturmessung eine gezielte Einspeisung von Wärme über die parallel zur Glasfaser verlaufenden
Kupferdrähte und somit die Durchführung von Enhanced Geothermal Response Tests ermöglichen.
Die DTS-Messungen wurden mit dem Gerät N4386A der Firma AP Sensing (4 Kanal, 4km, Outdoor-
Ausführung) durchgeführt. Dabei wurden je nach Fragestellung des Versuchs Messzeiten zwischen
1,5-15,0 Minuten festgelegt. Zur weiteren Beurteilung der Qualität der Messwerte wurden Single-
End- und Double-End-Messungen durchgeführt. Bei der Single-End-Messung erfolgt die Messung in
eine Richtung, während bei der Double-End-Messung von Beiden Kabelenden aus gemessen wird.

Neben den Temperaturmessungen mittels Glasfaser wurde im Großversuch bei Vegas ein Enhanced
Geothermal Response Test (EGRT) durchgeführt (siehe auch AP 5). Hierbei wurden die Kupferleiter
des Hybridkabels Kurzgeschlossen und an 2 Manson E-925 Netzgeräte angeschlossen. Die Spannung
während des Versuchs wurde mit einem Hewlett Packard Datenlogger 34970A mit einer 20 Kanal
34901A-Karte aufgezeichnet. Der Gesamtwiderstand des Kupferdrahts wurde zu Versuchsbeginn
bei Raumtemperatur sowie im aufgeheizten Zustand gemessen. Dies ist notwendig, da der spezifi-
sche Widerstand temperaturabhängig ist und für den folgende Beziehung gilt [Kuchling, 1991]:

$$\rho_T = \rho_{T_0} [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

ρ_T ist hierbei der spez. Widerstand bei Versuchstemperatur, ρ_{T_0} der spez. Widerstand zu Versuchsbeginn, α der Temperaturkoeffizient (für Leitungskupfer 0,0039 1/K), T die Temperatur während des Versuchs und T_0 die Temperatur zu Versuchsbeginn.

Da sich das Hybridkabel je nach der umgebenden Wärmeleitfähigkeit aufheizt, muss für die Berechnung der ortsabhängigen Wärmeleitfähigkeit die Heizleistung für diesen Bereich bekannt sein. Diese einzelnen Messbereiche können hierbei als Einzelwiderstände angesehen werden. Für das gesamte Kabel bedeutet dies eine Reihenschaltung der einzelnen Teilwiderstände der einzelnen Messbereiche. Damit lässt sich mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes der Spannungsabfall für den betrachteten Längenabschnitt des Hybridkabels errechnen sowie unter Zuhilfenahme folgender Gleichung deren Heizleistung:

$$P=U \cdot I \tag{2}$$

In Abbildung 13 sind die elektrischen Parameter während des EGRT dargestellt, die als Grundlage zur Auswertung dienen.

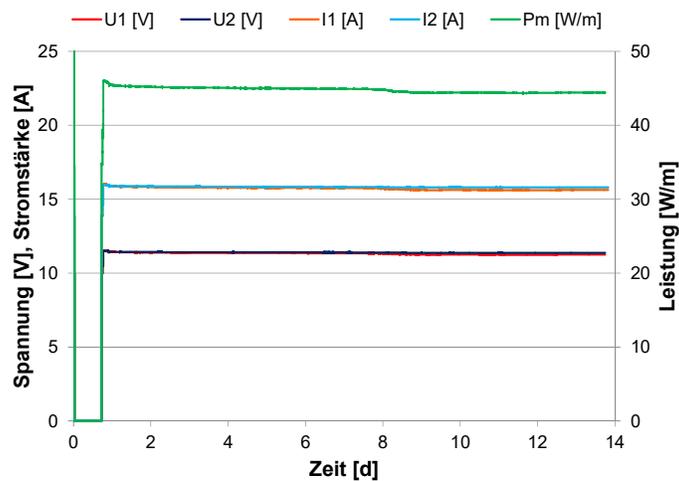


Abbildung 13: Entwicklung der elektrischen Parameter während des EGRT.

Der EGRT, kann nach der Linienquellentheorie ausgewertet werden. Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung für den Temperaturverlauf einer Linienquelle wird wie folgt angegeben [Heske et al., 2011]:

Für $\frac{\kappa t}{r^2} \gg 1$ oder $\frac{\kappa t}{r^2} \geq 5$ gilt:

$$T(r, t) = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\kappa t}{r^2}\right) - \gamma \right) + T_0 \tag{3}$$

mit $T(r, t)$ als Temperatur [K] der Linienquelle (LWL), r der Entfernung zur Linienquelle [m], t der Zeit [s] seit Anschalten der Quelle, q_l Heizleistung pro Längeneinheit [W/m], π Pi (3,14...), κ Diffusivität des Mediums (Boden) [m²/s], λ Wärmeleitfähigkeit des Mediums (Boden) [W/(m·K)], γ Eulersche Konstante (0,577...) und T_0 die ungestörte Bodentemperatur [K].

Wird diese Gleichung zur Berechnung der Fluidtemperatur einer Erdwärmesonde verwendet, wird

die Temperatur am Bohrlochrand ($r = r_b$) berechnet und der Effekt des Bohrlochwiderstandes hinzuaddiert. Die Temperatur des Fluids als Funktion der Zeit wird dann wie folgt beschrieben [Heske et al., 2011]:

$$T_F(t) = \frac{q_L}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\kappa t}{r^2} \right) - \gamma \right) + q_{L0} R_b + T_0 \quad (4)$$

wobei r der Radius der Bohrung [m] und R_b der Bohrlochwiderstand $[(K \cdot m)/W]$ ($q \cdot R_b = T_f - T_{bw}$) ist.

In der Praxis berechnet sich die längennormierte Heizleistung zu [Heske et al., 2011]:

$$q_L = \frac{RI^2}{L} \quad (5)$$

mit R als Widerstand des Heizdrahtes $[\Omega]$, I als der konstanter Heizstrom [A] und L als die Länge des beheizten Kabels [m].

Die angegebene Lösung der Wärmeleitungsgleichung bezeichnet man als Langzeitlösung für eine ideale Linienquelle in einem homogenen, isotropen Medium [Heske et al., 2011]. Nach der oben angegebenen Langzeitlösung können die Messungen wie folgt ausgewertet werden.

Die mit der optischen Faser gemessene Temperatur $T(t)$ wird über den Logarithmus der Heizzeit ($\ln(t/t_0)$) aufgetragen. Die daraus resultierende Aufheizkurve geht für große Heizzeiten t in eine Gerade mit der Steigung $q_L/(4\lambda\pi)$ über, aus welcher sich die Wärmeleitfähigkeit λ des umgebenden Mediums berechnen lässt:

$$\frac{q_L}{4\pi\lambda} = \frac{T(t_2) - T(t_1)}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{q_L}{4\pi} \frac{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}{T(t_2) - T(t_1)} \quad \text{mit } t_2 > t_1 \quad (7)$$

Da die Heizleistung durch Messen des Heizstroms und des Widerstandes der Heizentwicklung bekannt ist, kann die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden [Heske et al., 2011].

Wird die Heizquelle abgeschaltet, verteilt sich die eingebrachte Energie in der Umgebung und die Temperaturen gleichen sich wieder an den ungestörten Ausgangszustand an. Da die konduktive Wärmeleitung aus Potentialen abgeleitet werden kann, gilt hier das Superpositionsprinzip und die Gleichung für den Relaxationsprozess kann aus der Lösung für den Temperaturverlauf einer Linienquelle entwickelt werden [Heske et al., 2011].

Für $t > t_h$ und $\frac{\kappa(t-t_h)}{r^2} \gg 1$ gilt:

$$T(t) = \frac{q_L}{4\pi\lambda} \ln \left(\frac{t}{t - t_h} \right) \quad (8)$$

mit t_h als die Dauer des Heat-Pulses [s].

Werden die registrierten Temperaturen des Relaxationsvorgangs über $\ln(t/(t-t_h))$ aufgetragen, so kann aus der Steigung dieser Geraden die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden [Heske et al., 2011].

Die nach der Heat-Pulse-Methode gewonnene Wärmeleitfähigkeit ist nicht allein dem die Bohrung

umgebenden Material zuzuordnen, sondern sie wird durch die darin stattfindende Grundwasserbewegung mit beeinflusst. Die durch dieses Verfahren gewonnene Größe beschreibt damit nicht nur die konduktive Wärmeleitung, sondern auch die konvektive (durch Wasserströmung) und wird deshalb als effektive Wärmeleitung bezeichnet [Heske et al., 2011].

Durchströmte Bereiche zeichnen sich durch besonders hohe Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus. In Verbindung mit den geologischen Schichten sind in Verbindung mittels Pécletzahlanalyse nicht nur relative Geschwindigkeitsunterschiede, sondern auch die absolute Filtergeschwindigkeit (DARCY-Geschwindigkeit) des durchströmten Bodens tiefenabhängig bestimmbar.

Die Pécletzahlanalyse ist ein eindimensionaler Ansatz, um die Filtergeschwindigkeit des Grundwassers zu ermitteln. Die Pécletzahl P_e beschreibt das Verhältnis zwischen konvektivem und konduktivem Wärmetransport. Dieses Verhältnis muss aus der effektiven Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. Werden Bereiche mit hohen effektiven Wärmeleitfähigkeiten als Aquifere und Bereiche mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten als Schichten ohne Grundwasserbewegung identifiziert und wird bei beiden Schichten von einer gleichen Wärmeleitfähigkeit der Bodenmatrix ausgegangen, ist in der Schicht ohne Grundwasserbewegung die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{kond.}$ proportional zum konduktiven Wärmetransport und in der Schicht mit Grundwasserbewegung die scheinbare Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{kond.+konv.}$ proportional der Summe des konvektiven und konduktiven Wärmetransports. Die Pécletzahl ist somit durch

$$P_e = \frac{\lambda_{kond.+konv.} - \lambda_{kond.}}{\lambda_{kond.}} = \frac{\lambda_{kond.+konv.}}{\lambda_{kond.}} - 1 \quad (9)$$

bestimmbar und die Filtergeschwindigkeit kann über die Definition der Pécletzahl ausgerechnet werden:

$$P_e = \frac{q_a}{\frac{\rho c_p v_f \Delta T}{\lambda \left(\frac{\Delta T}{l}\right)}} = \quad (10)$$

$$V_f = \frac{P_e \lambda}{l \rho c_p} \quad (11)$$

$$v_f = \frac{\lambda_{Kond.+konv.} - \lambda_{kond.}}{l \rho c_p} \quad (12)$$

wobei q_a der konvektiver Wärmestrom [W/m^2], q_c der konduktiver Wärmestrom [W/m^2], ρ die Dichte des Fluids [kg/m^3], c_p die spezifische Wärmekapazität des Fluids bei konstantem Druck [($J \cdot K$)/ kg], v_f die Filtergeschwindigkeit des Fluids [m/s], ΔT die Temperaturdifferenz [K] und l die charakteristische Länge [m] ist.

Die Pécletanalyse ist eine schnelle und direkte Möglichkeit, die Filtergeschwindigkeit durch die Heat-Pulse-Methode zu bestimmen. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist nur dann gewährleistet, wenn der lithologische Aufbau des Untergrundes durch geologische Ansprache bekannt ist, da ansonsten der konduktive Anteil des Wärmestroms in dem durchströmten Aquifer durch einen möglicherweise heterogenen Schichtaufbau falsch bestimmt wird [Heidinger, 2009].

In Tabelle 1 sind die im Projekt durchgeführten Versuche sowie die Versuchsbedingungen aufgelistet.

Tabelle 1: Durchgeführte Versuche.

Ort	Versuch	Art	S	D	U	I	V
Vegas/Stuttgart	EGRT	EWS			X		
Hochschule Biberach Testfeld	DTS-Messung	EWS	X		X		X
Hochschule Biberach Testfeld	DTS-Messung	EWS		X	X		X
Bad Waldsee Testfeld	DTS-Messung	Heat pipe	X		X		X
Bad Waldsee Testfeld	DTS-Messung	Oberflächensystem/ Heat pipe		X		X	X
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Hydratationswärme in EWS	X			X	
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Rohrtour Außen	X			X	X
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Rohrtour Ringraum	X		X		X
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Rohrtour Ringraum	X		X		X
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Rohrtour Ringraum		X	X		X
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Rohrtour Außen	X		X		
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Rohrtour Außen		X	X		
Karlsruhe Labor	DTS-Messung	Labor, Langes Messintervall	X		X		X
Karlsruhe Labor	DTS-Messung	Labor, Langes Messintervall		X	X		X
Karlsruhe Labor	DTS-Messung	Labor, Kurzes Messintervall	X		X		X
Karlsruhe Labor	DTS-Messung	Labor, Kurzes Messintervall		X	X		X
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	DTS-Messung	Hydratationswärme in Hinterfüllung		X	X		X
Karlsruhe EWS-Tech-Testfeld	TRT	EWS		X	X		X

S = Single-End; D = Double-End; U = Loop; I = Einfachstrang; V = Temperaturdaten anderer Messmethoden

2.3.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammenarbeit mit dem European Institute for Energy Research (EIFER), Solites (Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme), Hochschule Biberach und Vegas, Universität Stuttgart.

2.3.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Mit den erzielten Ergebnissen ist ein weiterer Grundstock zur besseren Auslegung und der Kontrolle bei der technischen Umsetzung während der Errichtung von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen gegeben. Somit können Temperaturmessung mittels Glasfasern für den nachhaltigen ökologisch und ökonomischen Betrieb für Erdwärmesonden zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden als unterstützende Maßnahme angesehen werden (siehe auch AP 1 und erzielte Ergebnisse).

2.3.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

Testfeld Bad Waldsee

Ein Standort zur DTS-Messung war das im Jahr 2010 errichtete geothermische Testfeld in Bad Waldsee [Zorn et al., 2010], [Zorn et al., 2015]. Hier wird eine Feuerwehruzufahrt zur Eis- und Schneefreihaltung mit einem Oberflächensystem betrieben, das über Heatpipes mit geothermischer Energie beheizt wird. Hierzu wurden 5 Bohrungen abgeteuft und mit insgesamt 20 Heatpipes ausgestattet. Sowohl das Oberflächensystem als auch eine der Bohrungen wurden mit einem Glasfaserkabel zur

Temperaturmessung ausgestattet. In der Bohrung wurde das Glasfaserkabel im Loop verlegt und die darin enthaltenen 3 einzelnen Glasfasern miteinander verspleißt, so dass bei jeder einzelnen Messung dreimal nach unten (blaue Pfeile in Abbildung 14 links oben) und dreimal nach oben (grüne Pfeile in Abbildung 14 links oben) gemessen wurde. Zusätzlich wurden 18 Pt-100-Temperaturmessfühler sowie eine Wärmebildkamera installiert. Aufgrund der geringen Außentemperaturen von ca. 0 °C am Tag der Messung war die Anlage in Betrieb.

In Abbildung 14 oben ist der Temperaturverlauf der Bohrung 5, die bis in eine Tiefe von 73m reicht, für den 27.11.2015 dargestellt. Die Messzeit betrug hierbei 2 Minuten. Beim Öffnen der wasserdichten Verteilermuffe, in der die Spleißkassetten montiert sind, hat sich gezeigt, dass Feuchtigkeit eingedrungen ist. Dies hatte zur Folge, dass auch Feuchtigkeit über Kapillarkräfte in den 3. Loop des DTS-Kabels eindringen konnte. Durch den Feuchtigkeitzutritt verändert die Glasfaser ihre optischen Eigenschaften und verfälscht damit auch die gemessenen Temperaturen. Dies zeigt sich deutlich in Abbildung 14. Die gemessenen Temperaturen im Loop 3 zeigen eine deutliche Drift. Aus diesem Grund konnte hier auch nur eine Single-End-Messung ausgehend von Loop 1 durchgeführt werden. Die Abweichung zwischen den Temperaturen der DTS-Messung im Vergleich zur Pt-100-Messung betragen bis zu 2 K, wobei hier zu beachten ist, dass die Pt-100-Fühler bereits 5 Jahre eingebaut sind und diese, unter den gegebenen Bedingungen, wahrscheinlich bereits gealtert sind. Eine neue Kalibrierung ist im eingebauten Zustand nicht möglich, sodass die Qualität der Pt-100-Messwerte nicht abgeschätzt werden kann. Für die Interpretation von Temperaturmesswerten ist daher die Kenntnis des Fühlerzustands (Alter, Feuchtigkeit, Korrosion, usw.) mit entscheidend.

Der Temperaturverlauf des Oberflächensystems ist in Abbildung 14 unten dargestellt. Hier wurde die Messung mit der Double-End-Methode mit einer Messzeit von 4 Minuten durchgeführt. Der blau unterlegte Bereich entspricht hier der geteerten Feuerwehrezufahrt, der graue Bereich deckt in etwa den Messbereich der Wärmebildkamera ab. Insgesamt sind in der Asphaltsschicht 20 unterschiedlich dimensionierte Register (R1-R20) zur Eisfreihaltung eingebaut. Bei den rot gekennzeichneten Registern verläuft das DTS-Kabel direkt in der Heizzone, während an den schwarz gekennzeichneten Registern das DTS-Kabel entlang der Verteilerrohre der Register verläuft. Die Temperaturmesswerte der Pt-100-Fühler liegen im Oberflächensystem näher an den Messwerten des DTS-Kabels mit einer Abweichung von ca. 1 K. Der Temperaturverlauf entlang des DTS-Kabels zeigt auch deutlich, dass die einzelnen Register unterschiedlich gut funktionieren da bei einheitlicher Außenlufttemperatur die Register 3, 10, 14 und 18 bis zu 4 K höhere Temperaturen aufweisen als die übrigen Register. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit dem Bild der Wärmebildkamera, wenn auch die gemessenen Absoluttemperaturen der Wärmebildkamera etwas höher sind als die des Glasfaserkabels. An diesem Beispiel zeigt sich aber auch, dass die Temperaturinformationsdichte ausgehend von den Pt-100-Fühlern über das DTS-Kabel bis hin zur Wärmebildkamera höher wird, bei gleichzeitiger Abnahme der Messgenauigkeit. Darüber hinaus zeigt diese Messung, dass entlang von Glasfasern räumlich zugeordnet Temperaturen gemessen werden können, diese aber aufgrund der messtechnisch bedingten Interpolation besonders bei größeren ΔT zwischen benachbarten Messpunkten Ungenauigkeiten aufweisen.

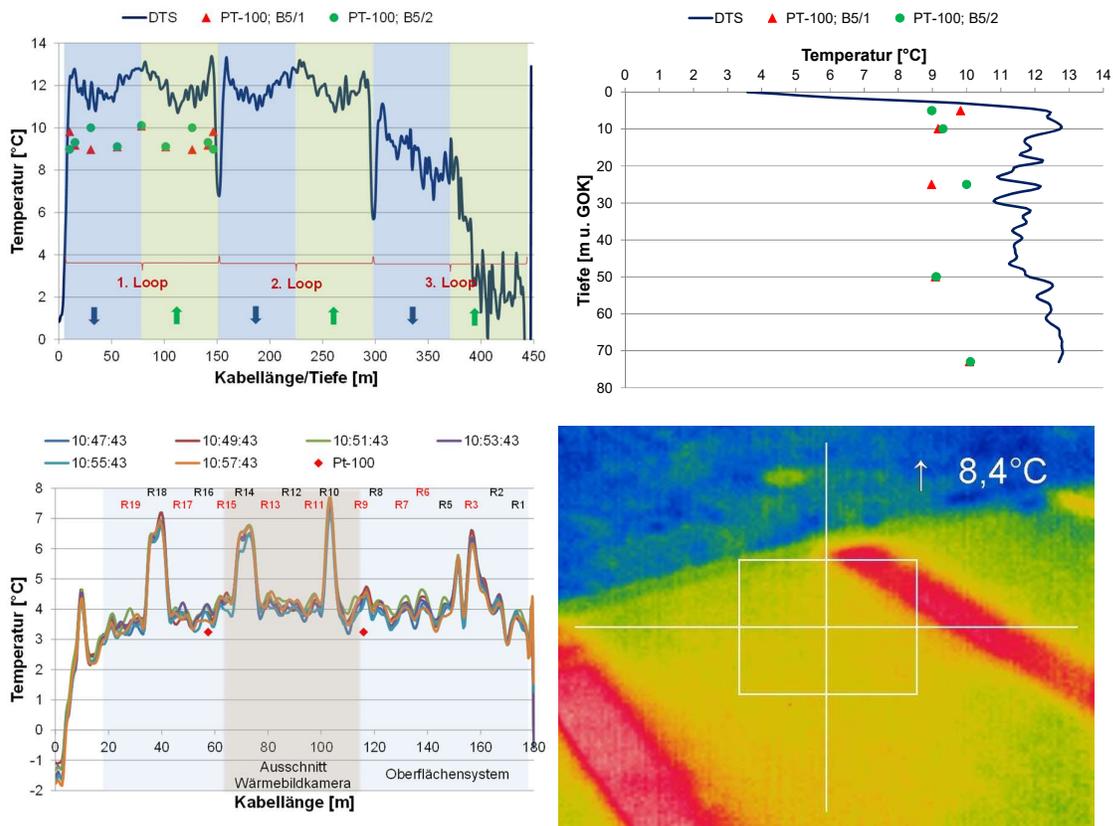


Abbildung 14: Temperaturverlauf der 75 m tiefen Bohrung (oben) und des Oberflächensystems (unten) in Bad Waldsee am 27.11.2015.

Testfeld Hochschule Biberach

Auf dem geothermischen Testfeld der Hochschule Biberach, das im Januar 2010 errichtet wurde, befindet sich unter anderem eine 24 m tiefe Erdwärmesonde, die mit 21 Pt-100-Widerstandsfühlern und einem DTS-Hybridkabel ausgestattet ist. Neben der Pt-100-Messung wurde am 27.11.2015 sowohl eine Single-End-Messung als auch eine Double-End-Messung mit einer Messzeit von jeweils 2 Minuten durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Temperaturverlauf der beiden Glasfasermessungen als auch der, der Pt-100-Fühler sich ähnelt, wenn auch die Werte bis zu 2 K auseinander liegen. Die Temperaturen der Pt-100-Messungen liegen dabei in etwa zwischen den Werten der Single-End- und Double-End-Messung. Da auch hier das Testfeld bereits schon über 5 Jahre besteht, kann aufgrund der Alterung letztendlich nicht sicher festgestellt werden, wie hoch die Temperatur genau ist. In den Tiefen 5, 10, 15 und 20 m ist sowohl am Vor- als auch am Rücklauf der Erdwärmesonde jeweils ein Pt-100-Fühler angebracht. Da mit Ausnahme des Fühlers in 15 m Tiefe die übrigen Fühler \pm denselben Wert anzeigen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Pt-100-Fühler noch einwandfrei arbeiten sehr hoch. In Abbildung 15 zeigt sich nun, dass in 5 m Tiefe der Pt-100-Messwert sich nahezu mit der Double-End-Messung deckt, während er in 10 m Tiefe eher im Bereich der Single-End-Messung liegt und 20 m Tiefe genau zwischen beiden Messmethoden. Um die Frage zu klären welches Messverfahren nun genauer ist, wurden im weiteren Projektverlauf Laboruntersuchungen durchgeführt, die später diskutiert werden. Die Problematik mit der Interpolation bei höheren ΔT zeigt sich auch

in diesem Bereich in den ersten 4 m, was dazu führt, dass bei beiden Messverfahren die Temperaturen in etwa deckungsgleich sind.

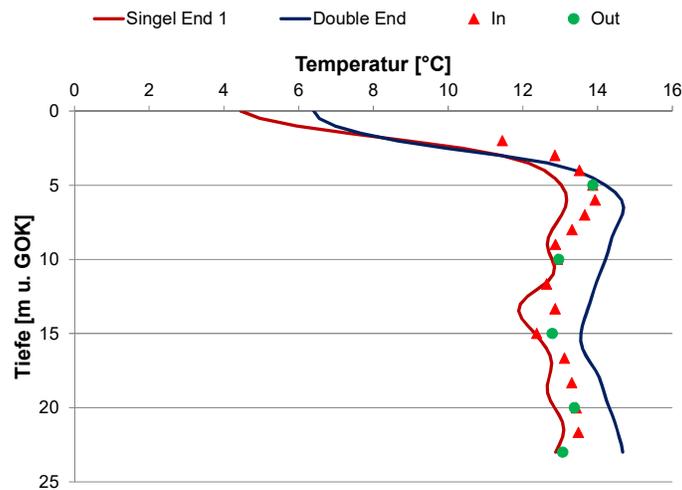


Abbildung 15: Temperaturverlauf der 24 m tiefen EWS 3 auf dem geothermischen Testfeld an der Hochschule Biberach am 27.11.2015.

Testfeld KIT

Im Rahmen des EWS-Tech Projekts wurde auf dem Gelände des KIT von Solites ein geothermisches Testfeld eingerichtet (siehe AP2). In diesem Testfeld können in einer Rohrtour (DN450) Erdwärmesonden installiert und der Verpressvorgang sowie die Effizienz der Sonden untersucht werden. Innerhalb des Projekts wurden hier unterschiedliche Versuche durchgeführt (Tabelle 1). Hierbei wurde die Messeinrichtung in den Thermal Response Teststand gemäß AP 1 implementiert.

Hydratationswärme

Um den Hinterfüllvorgang zu untersuchen, wurde in einen Schenkel einer Erdwärmesonde ein Glasfaserkabel installiert und die Temperaturentwicklung während des Hinterfüllvorgangs und der ersten Stunden des Hydratationsprozesses gemessen. Neben den standortspezifischen Gegebenheiten ist die Hydratationswärmeentwicklung dabei unter anderem von der Zementart als auch von der Zementmenge im Hinterfüllmaterial abhängig. Aufgrund des geringen Durchmessers des EWS-Rohrs, konnte nur eine Single-End-Messung mit offenem Ende (ohne Pigtail, aber Wasserdicht verschweißt) durchgeführt werden. Um den relativ schnellen Verfüllvorgang erfassen zu können, wurde eine kurze Messzeit von 0,5 Minuten festgelegt. Der Versuch wurde am 09.12.2015 durchgeführt. Die dunkelblaue Kurve in Abbildung 16 (links) zeigt die Außentemperatur, die in der Nacht Werte um den Gefrierpunkt annimmt. Im Sondenrohr nimmt hingegen mit zunehmender Tiefe die Temperatur aufgrund der Hydratationswärme um bis zu 2 K zu. Aufgrund der kurzen Messzeiten schwanken allerdings die einzelnen Messwerte wesentlich stärker als in den vorher beschriebenen Versuchen in Bad Waldsee und Biberach. Die Standardabweichung in diesem Versuch beträgt 0,2. Ferner zeigt sich, dass die Messwerte am offenen Ende bei einer Teufe von 30 m deutlich von den übrigen abweichen. Dies bedeutet letztendlich, dass bei Single-End-Messungen mit offenem Ende

messtechnisch bedingt die letzten Temperaturmesswerte nicht realistisch sind.

Der durchgeführte Versuch sollte auch zur Beurteilung der Hinterfüllqualität herangezogen werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass bedingt durch den Versuchsaufbau, die Art und Größe der Fehlstellen sowie durch den Verlauf der Sondenrohre innerhalb der Hinterfüllung nicht alle Fehlstellen detektiert werden konnten. Dies liegt zum einen am geringen Temperaturanstieg innerhalb des Sondenrohrs von ca. 2 K. Damit sind deutliche Temperatursignale, die für Fehlstellen charakteristisch sind schwierig auszumachen, besonders dann, wenn die Fehlstellen klein sind oder die Fehlstellen nicht im unmittelbaren Kontakt zum Sondenrohr, in dem gemessen wird, liegen. Um hier eine höhere Aussagesicherheit zu erlangen, wäre es sinnvoll, in allen vier Sondenrohren gleichzeitig zu messen. Dies bedeutet jedoch, dass entweder mehrere DTS-Geräte oder ein Messgerät mit 8 Kanälen (entspricht 4 Single-End-Messplätzen) eingesetzt werden müssten, wodurch die Untersuchung teuer würde. Im durchgeführten Versuch konnten zwei Fehlstellen gut detektiert werden (Abbildung 16 links, Abbildung 17). Es zeigt sich, dass im Bereich dieser Fehlstellen die Temperatur in den ersten Stunden nach Versuchsbeginn um ca. 0,4 - 0,6 K geringer ist als in den jeweils daran anschließenden Bereichen.

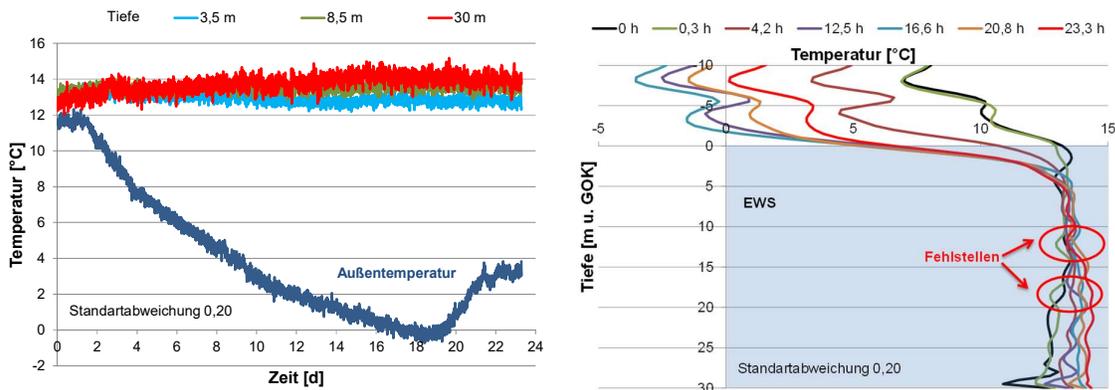


Abbildung 16: Hydratationswärme FZU (Messzeit 0,5 Min, Single-End mit offenem Ende(ohne Pigtail))

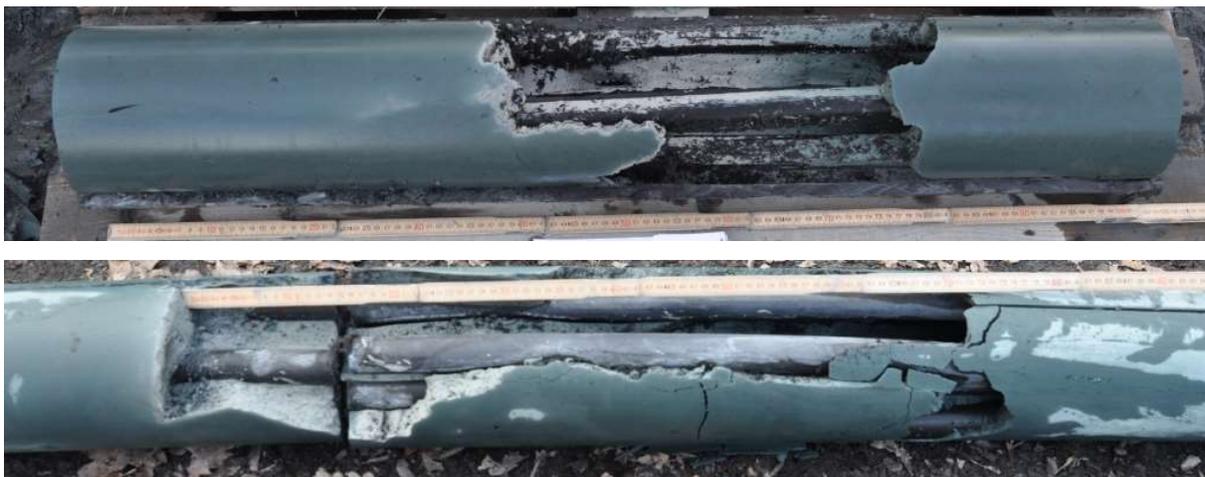
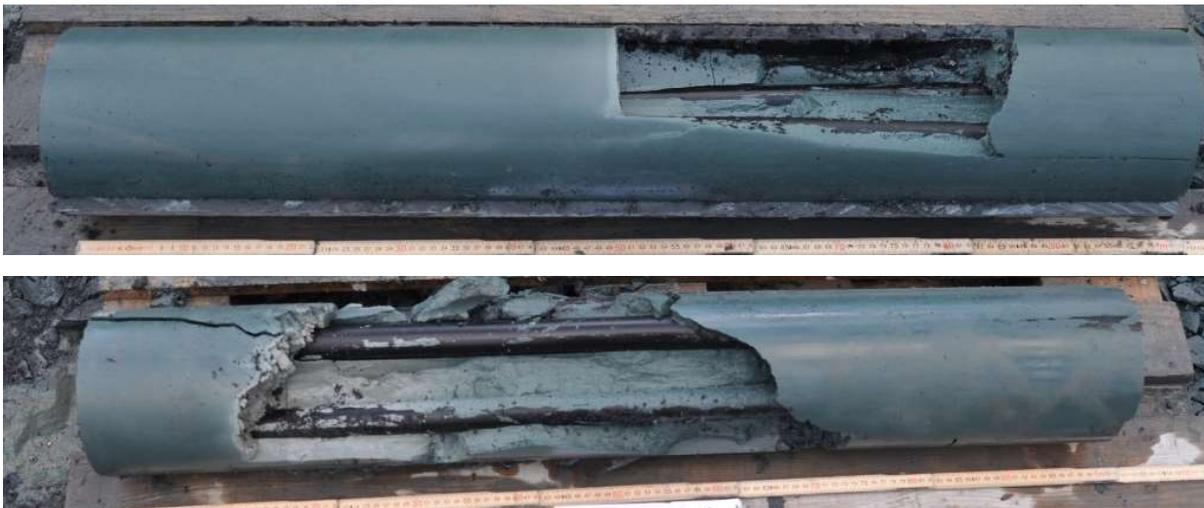


Abbildung 17: Detektierte Fehlstelle in ca. 13 m (oben) und ca. 18 m (unten)
(Fotos von Riegger, Solites, AP2).

Die Fehlstellen in 1 m und 5 m Tiefe konnten in diesem Versuch nicht nachgewiesen werden. Bei der oberen Fehlstelle liegt der Grund hierfür wahrscheinlich an der geräteinternen Interpolation der Messwerte bei großen Temperaturunterschieden benachbarter Messintervalle, was sich gemäß Abbildung 16 und Abbildung 18 bis in eine Tiefe von ca. 3-4 m bemerkbar macht. Hierdurch werden die schwachen Temperaturantworten durch die Fehlstelle überlagert. Im Falle der Fehlstelle in 5 m Tiefe gibt es zwei Gründe, warum sie nicht detektiert werden konnte. Zum einen kann das DTS-Kabel in einem der Sondenrohre verlaufen, die von der Hinterfüllmasse umgeben ist und zum anderen ist das Messintervall für die Längenzuordnung 0,5 m über das die Temperatur gemittelt wird. Diese Länge entspricht in etwa der Längenausdehnung der Fehlstelle. Liegt nun diese Fehlstelle so ungünstig, dass sie gleichermaßen zwei Längenmessintervallen zugeordnet ist, so ist in diesem Fall die Temperaturantwort der Fehlstelle auf diese zwei Intervalle verteilt und liegt damit bereits in der Messgenauigkeit der DTS-Messtechnik. Um diesem Umstand gerecht zu werden, könnte ein zweites DTS-Kabel in die Sonde eingebaut werden, das 0,25 m kürzer ist. Weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Detektion von Fehlstellen waren innerhalb dieses Projekts nicht möglich. Diese sollen jedoch im beantragten Projekt „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II“ weitergeführt werden.



*Abbildung 18: Nicht detektierte Fehlstellen in ca. 1 m (oben) und ca. 5 m (unten)
(Fotos von Riegger, Solites, AP 2).*

Zum direkten Vergleich der unterschiedlichen Messmethoden wurden im Testfeld mehrere Single-End- und Double-End-Messungen durchgeführt. In Abbildung 19 links sind die Temperaturverläufe einer Single-End-Messung und einer Double-End-Messung dargestellt, die im Ringraum der Rohrtour durchgeführt wurden. Die Messungen wurden am 18.11.2015 bei gleichen Randbedingungen unmittelbar hintereinander durchgeführt, wobei die Messzeit 2 Minuten betrug. In diesen Fall zeigt sich, dass die Single-End-Messung zwar eine höhere Standardabweichung aufweist, die Temperaturen aber näher an den Referenztemperaturen der kalibrierten Pt-100-Fühler liegen. Die Temperaturwerte der Double-End-Messung liegen ca. 2 K über denen der Single-End-Messung. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der Messungen in Biberach (Abbildung 15).

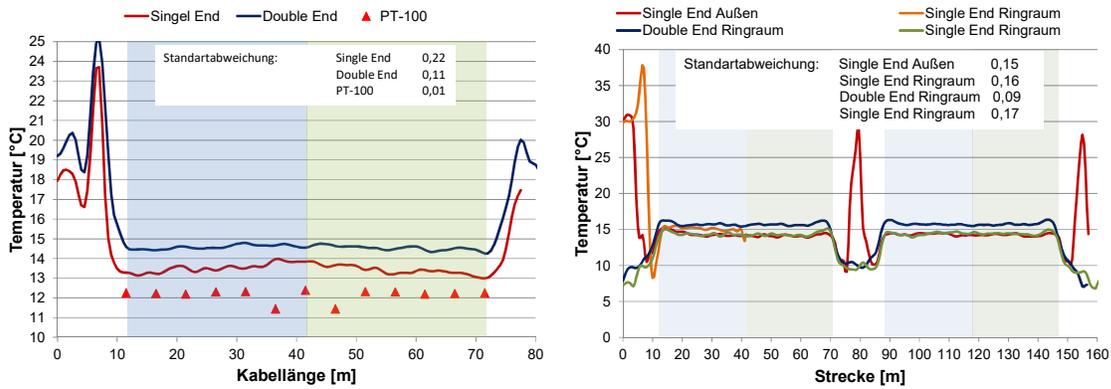


Abbildung 19: Temperaturverlauf vom 18.11.2015 im Ringraum bei einer Messzeit von 2 Minuten (links) sowie vom 21-22.10.2015 bei einer Messzeit von 4 Minuten (rechts).

Ein weiterer Versuch wurde am 21-22.10.2015 durchgeführt. Hierbei wurde mit einem DTS-Kabel, das außen an der Rohrtour angebracht war, die Bodentemperatur im Single-End-Modus gemessen. Darüber hinaus wurden eine Single-End-Messung mit offenem Ende, eine Single-End-Messung sowie eine Double-End-Messung bei gleichen Randbedingungen innerhalb der Rohrtour mit einer Messzeit von 4 Minuten gemessen. Die Single-End-Messung im Ringraum und außen sind hierbei weitgehend deckungsgleich (Abbildung 19 rechts). Die Temperaturen der Single-End-Messung mit offenem Ende sind hingegen ca. 1 K höher als die übrigen Single-End-Messungen. Außerdem weichen die letzten Messwerte im Bereich des offenen Endes wieder deutlich von den übrigen Messwerten ab. Die Standardabweichung ist in diesem Fall mit 0,17 auch geringfügig höher. Wie im vorher beschriebenen Versuch ist auch hier die gemessene Temperatur der Double-End-Messung wieder ca. 2 K höher aber die Standardabweichung deutlich niedriger als bei der Single-End-Messung.

Labormessungen

Um die einzelnen Messverfahren besser miteinander vergleichen zu können wurden im Labor des KIT-AGW weitere Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt. Dabei wurden Messungen bei einer Messzeit von 1,5 Minuten sowie bei 15 Minuten getätigt. Die Single-End- und Double-End-Messungen die bei gleichen Messzeiten erfolgten, wurden jeweils zeitgleich im gleichen 80 m langen Hybridkabel gemessen. Als Referenztemperatur (RT) wurde die Temperatur eines geeichten Thermometers herangezogen.

Wie in den zuvor besprochenen Versuchsergebnissen, zeigt sich auch in diesen Versuchen, dass die Messgenauigkeit der Double-End-Messungen höher als die der Single-End-Messungen ist. Dies liegt daran, dass bei der Double-End-Messung von beiden Kabelenden aus gemessen wird und damit Fehler die durch Reflexion und Streuung verursacht werden, minimiert werden. Wie in den vorangegangenen Versuchen liegen auch in diesem Versuch die gemessenen Temperaturen der Single-End-Messung mit einem ΔT von ca. 0 - 1 K näher an den Referenztemperatur als bei den Double-End-Messungen in denen die Abweichung ca. 1,5 - 2 K beträgt (Abbildung 20). Für die zeitliche Temperaturentwicklung bei 10 m sowie bei 70 m haben die Referenztemperaturen und die mit dem Glasfaserkabel gemessenen Temperaturen sogar \pm denselben Wert (Abbildung 21).

Neben der Messmethode wirkt sich aber auch die Messzeit auf die Genauigkeit der DTS-Messung

aus. Dies zeigt der Vergleich der Temperaturverläufe in Abbildung 20 sowie der Temperaturentwicklung in Abbildung 21. Die Messzeit betragen 1,5 Minuten (Abbildung 20, links) bzw. 15 Minuten (Abbildung 20, rechts). Die Standardabweichung ist in diesem Versuch bei langen Messzeiten unabhängig von der Messmethode um 0,11 - 0,16 niedriger. Besonders bei der zeitlichen Temperaturentwicklung sind die starken Schwankungen bei kurzen Messzeiten deutlich erkennbar (Abbildung 21). Dies liegt daran, dass bei langen Messzeiten mehr Werte gestapelt werden als bei kurzen Messzeiten.

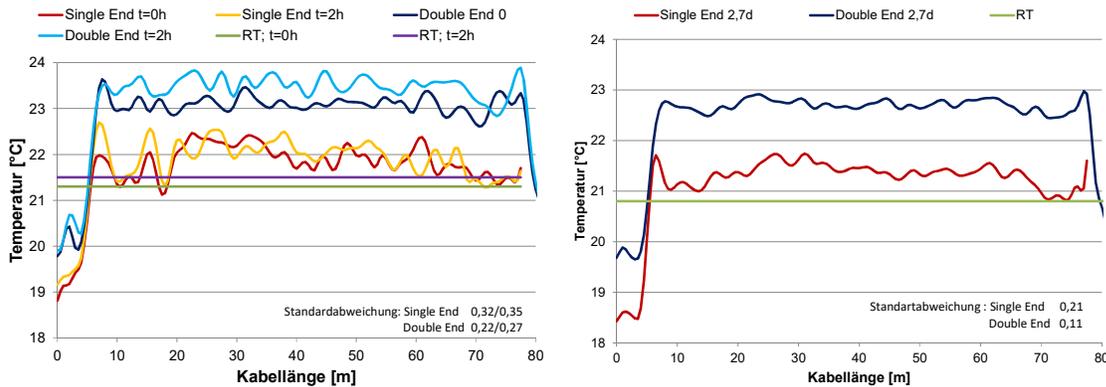


Abbildung 20: Temperaturverlauf im Hybridkabel unter Laborbedingungen bei kurzen Messzeiten von 1,5 Minuten (links) und bei langen Messzeiten von 15 Minuten (rechts).

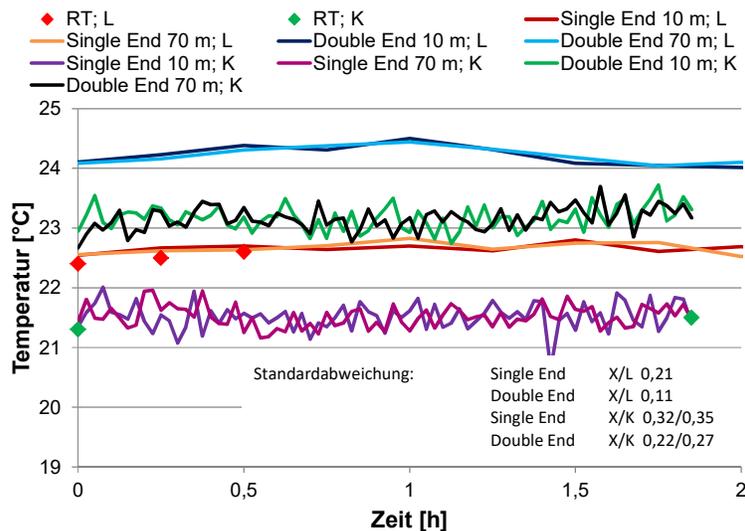


Abbildung 21: Vergleich der zeitlichen Temperaturentwicklung der unterschiedlichen Messverfahren bei 10 m und 70 m. Die Kürzel „L“ steht für lange Messzeit und „K“ für kurze Messzeit.

EGRT in der Versuchsanlage Vegas-Universität Stuttgart

In Abbildung 22 ist der Versuchsaufbau des Technikumsversuch der Universität Stuttgart, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen Großbehälter mit den Abmaßen 9,0 m x 6,0 m x 4,5 m, der mit 4 Sandschichten mit unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten befüllt ist. Eine genaue Beschreibung hierzu findet sich im AP 5. Der Verlauf des Glasfaserkabels ist in Abbildung 22 links als gelbe Linie eingezeichnet. Im

Projekt wurde ein EGRT bei wassergesättigten Bedingungen jedoch ohne Grundwasserfluss durchgeführt. Der elektrische Widerstand des Kupferleiters im Glasfaserhybridkabel betrug im kalten Zustand 1,344 Ohm und im warmen Zustand 1,440 Ohm, bei einer einfachen Kabellänge von 32,099 m. Für die Temperaturmessung wurden zwei Glasfasern miteinander verspleißt, so dass mit den Anschlussleitungen (Pigtails) eine gesamte Glasfaserlänge von ca. 80 m genutzt wurde. Die Versuchsbeschreibung ist im Kapitel „Planung und Ablauf des Vorhabens“ erläutert.

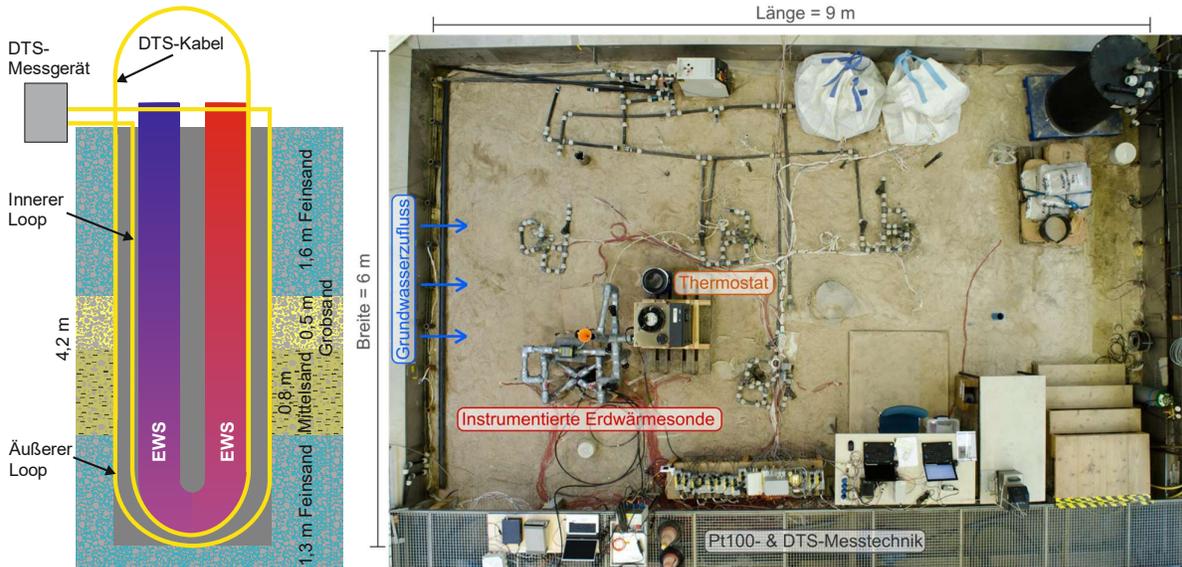


Abbildung 22: Versuchsaufbau des Technikumsversuchs in Vegas (Foto von Kleinknecht, Vegas).

Linienquellen-Methode

In Abbildung 23 ist der Temperaturverlauf zu Versuchsbeginn des EGRT sowie nach 2,5 Tagen Laufzeit dargestellt. Es zeigt sich, dass sich im DTS-Hybridkabel aufgrund des Wärmetransports im umgebenden Medium (Sand, Luft) deutlich unterschiedliche Temperaturen einstellen. Die Temperaturdifferenzen sind hierbei bis zu 13 K. Da die elektrische Leitfähigkeit temperaturabhängig ist (Gleichung 1), machen sich Temperaturdifferenzen in dieser Größenordnung bei der Heizleistungsbeurteilung deutlich bemerkbar. In Tabelle 2 sind die Widerstände für unterschiedliche Bedingungen während des Versuchs dargestellt. Der auf die Kabellänge gemittelte Widerstandswert bei Versuchsbeginn beträgt 0,0449 Ohm/m. Dieser Wert wurde als 100 % festgelegt. Wird nun nach Gleichung 1 der Widerstand bei 7,5 m und bei 64 m ausgerechnet, so zeigt sich eine erhebliche Abweichung von bis zu 28 %. Dies hat eine signifikante Auswirkung auf die Berechnung der Heizleistung nach Gleichung 5 in diesem Bereich und damit auch auf die Wärmeleitfähigkeit. Aus diesem Grund sollte bei wechselgelagerten Untergrundbedingungen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten eine Anpassung der Heizleistung an den temperaturabhängigen Widerstand gemäß Gleichung 1 erfolgen.

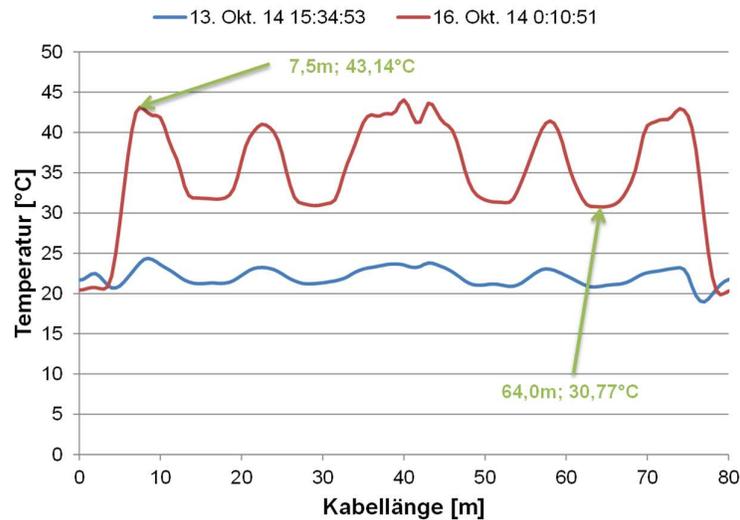


Abbildung 23: Temperaturverlauf im Glasfaserkabel während des EGRT.

Tabelle 2: Temperaturabhängige Widerstandsverteilung (Widerstand pro Meter Kabel).

	Widerstand	Abweichung
Gemittelt im kalten Zustand (21,6 °C Raumtemperatur)	0,0419 Ohm/m	93,3 %
Gemittelt im warmen Zustand	0,0449 Ohm/m	100 %
Bei 7,5 m bei 43,14 °C	0,0575 Ohm/m	128,1 %
Bei 64,0 m bei 30,77 °C	0,0424 Ohm/m	94,4 %

Die Temperaturentwicklung innerhalb der einzelnen Schichten sowie deren Auswertung nach der Linienquellen-Methode ist in Abbildung 24 sowie in Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt. Die hieraus berechneten Wärmeleitfähigkeiten sind in Tabelle 3 aufgelistet und Literaturwerten, sowie Messwerten aus Laboruntersuchungen für die eingebauten Sande gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Labormesswerte geringfügig niedriger als die üblichen Rechenwerte nach VDI 4640 Blatt 1 ausfallen. Dem gegenüber sind die nach der Linienquellen-Methode berechneten Wärmeleitfähigkeiten deutlich zu hoch (Versuch ohne Grundwasserfluss). Dies liegt daran, dass die Annahmen der Linienquellen-Methode (Verhältnis Länge/Durchmesser) für die geringen Schichtmächtigkeiten, wie sie in diesem Technikumsversuch vorliegen, nicht gültig sind und damit zu falschen Ergebnissen für die Wärmeleitfähigkeit und den Bohrlochwiderstand führen. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von [Lehr, Sass, 2014], die für einen zylindrischen Energiepfahl bei der Auswertung nach der Linienquellen-Methode eine deutlich zu hohe Wärmeleitfähigkeit berechneten, während die Berechnung nach der Zylinderquellen-Methode einen realistische Wert ergab.

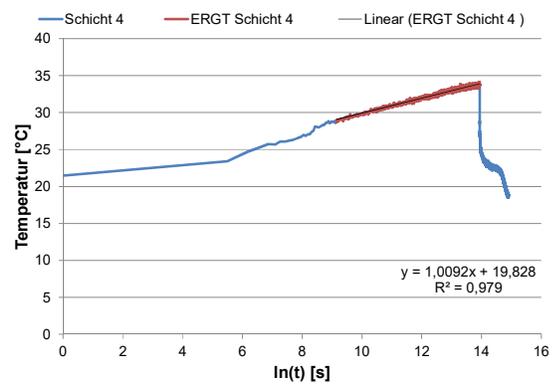
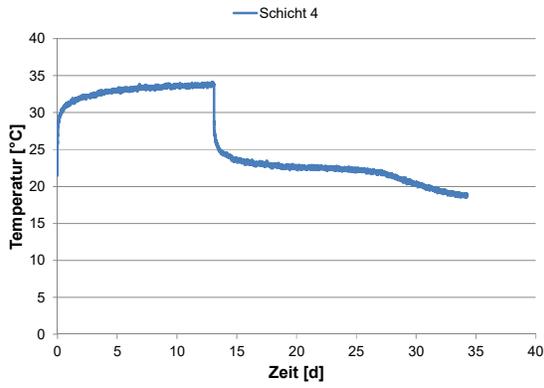


Abbildung 24: Temperaturentwicklung in der Schicht 4 während des EGRT (links) sowie Auswertung nach der Linienquellenmethode (rechts).

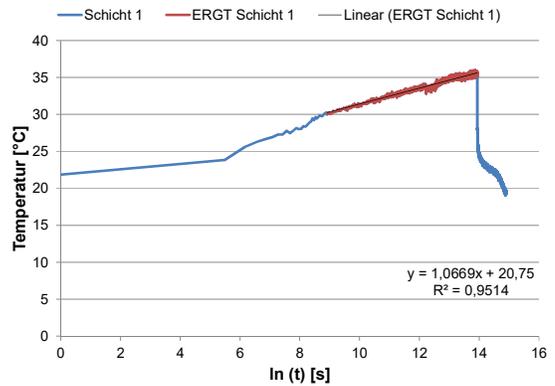
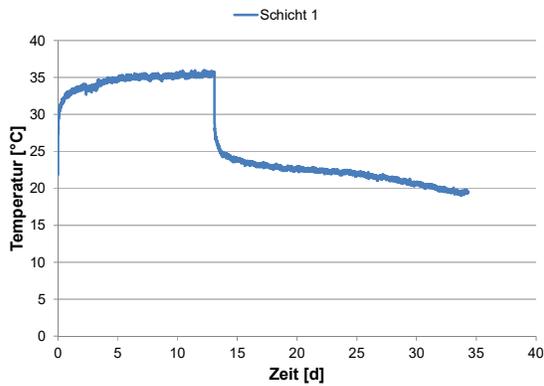


Abbildung 25: Temperaturentwicklung in der Schicht 1 während des EGRT (links) sowie Auswertung nach der Linienquellenmethode (rechts)

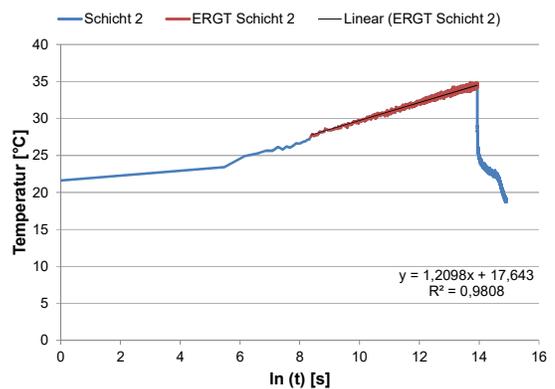
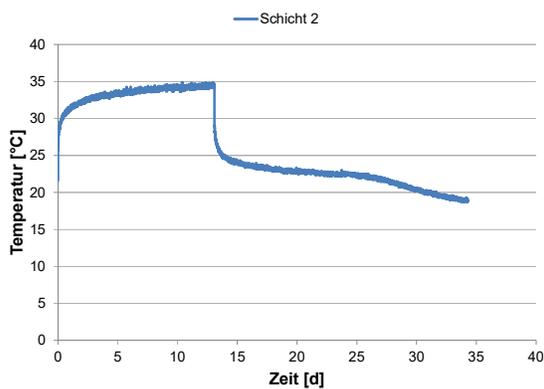


Abbildung 26: Temperaturentwicklung in der Schicht 2 während des EGRT (links) sowie Auswertung nach der Linienquellenmethode (rechts)

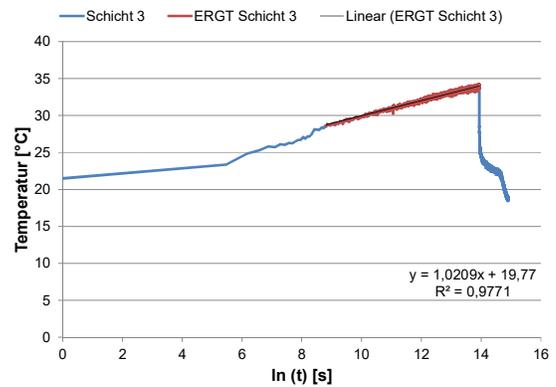
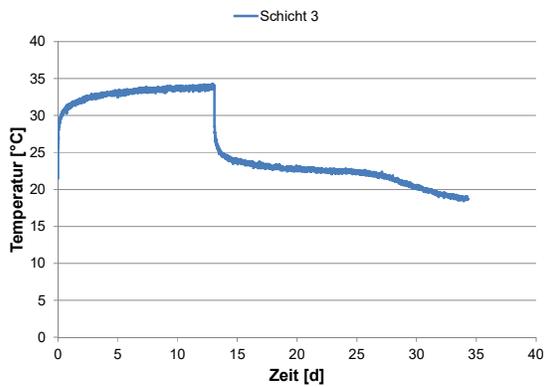


Abbildung 27: Temperaturentwicklung in der Schicht 3 während des EGRT (links) sowie Auswertung nach der Linienquellenmethode (rechts)

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Wärmeleitfähigkeit aus Literatur, Labormessungen und EGRT.

Schicht	Mächtigkeit	$\lambda_{\text{Literatur}}^{(1)}$	$\lambda_{\text{Labor}}^{(2)}$	$\lambda_{\text{EGRT Linie}}$	R_b
	[m]	[W/m*K]	[W/m*K]	[W/m*K]	[-]
1 (Feinsand)	1,6	2,0-3,0 (2,4)	2,22	3,33	0,120
2 (Grobsand)	0,5	2,0-3,0 (2,4)	2,18	2,93	0,100
3 (Mittelsand)	0,8	2,0-3,0 (2,4)	2,23	3,48	0,091
4 (Feinsand)	1,3	2,0-3,0 (2,4)	2,22	3,52	0,090

(1) Nach [VDI 4640, 2010], die Werte in Klammer sind die üblicherweise verwendeten Rechenwerte;

(2) [Bisch, Klaas, 2014]

2.3.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die gewonnenen Ergebnisse sollen auf Tagungen (z.B. OTTI) präsentiert werden. Darüber hinaus fließen die Erkenntnisse sowie die praktische Umsetzung der Messung in Vorlesungen sowie als Inhalt bei Praktika im Studiengang Angewandte Geowissenschaften am KIT mit ein. Weiterhin sollen die Untersuchungen im beantragten Projekt „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II“ weitergeführt werden und später in einer gesonderten Veröffentlichung aufgearbeitet werden.

2.3.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die im Projekt gewonnene Datengrundlage (für AP 3 war 1 PM kalkuliert) reicht für eine eigenständige Veröffentlichung nicht aus. In einem bei BMWI beantragten Projekt „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II“ sollen aufbauend auf den Ergebnissen dieser Forschung weitere Untersuchungen erfolgen und hieraus eine Veröffentlichung zur DTS-Messung im Rahmen von oberflächennahen Geothermieprojekten erstellt werden.

2.3.12 Literatur

- [Bisch, Klaas, 2014] Bisch, G.; Klaas, N.: *Kosteneffiziente Messsysteme und Konzepte zur Überwachung oberflächennaher Erdwärmennutzung*. Technischer Bericht TB 10/2014 (VEG 66). Schlussbericht, Vegas Stuttgart, 2014.
- [Dornstädter et al., 2008] Dornstädter, J., Heidinger, P.; Heinemann-Glutsch, B.: *Erfahrungen aus der Praxis mit dem Enhanced Geothermal Response Test (EGRT)*. Tagungsband des Geothermiekongresses, Karlsruhe, 2008, S. 271-279.
- [Heidinger, 1998] Heidinger, P.: *Bestimmung der Sickerwasserfließgeschwindigkeit durch Wärmezufuhr*. Diplomarbeit am Geophysikalischen Institut der Universität Karlsruhe, 1998.
- [Heidinger et al., 2004] Heidinger, P., Dornstädter, J., Fabritius, A., Welter, M., Wahl, G. & Zurek, K.: *EGRT – Enhanced Geothermal Response Tests. Die neue Rolle der Geothermie*, Tagungsband 10.-12. November 2004 Landau in der Pfalz, Geothermische Vereinigung e. V., 2004.
- [Heidinger, 2009] Heidinger, P.H.: *Enhanced Geothermal Response Test*. GTC Kappelmeyer, Karlsruhe –Bericht, 2009.
- [Heske et al., 2011] Heske, C., Kohlsch, O., Dornstädter, J. & Heidinger, P.: *Der Enhanced-Geothermal-Response-Test als Auslegungsgrundlage und Optimierungstool*. Bbr Oberflächennahe Geothermie, Sonderheft 2011, Bonn, 2011, 36-43.
- [Kuchling, 1991] Kuchling, H.: *Taschenbuch der Physik*.- 13. Aufl., 672 S.; Leipzig (Fachbuchverlag Leipzig), 1991.
- [Lehr, Sass, 2014] Lehr, C.; Sass, S.: *Thermo-optical parameter acquisition and characterization of geologic properties: a 400-m deep BHE in a karstic alpine marble aquifer*.- Environ Earth Sciences:72, 2014, 1403-1419.
- [Soto et al., 2007] Soto, M. A., Sahu, P. K., Faralli, S., Sacchi, G., Bolognini, G., Pasquale, F. Di., Nebendahl, B. & Rueck, C.: *High performance and highly reliable Raman-based distributed temperature sensors based on correlation-coded OTDR and multimode graded-index fibers*. Proc. Of Spie: 6619, 2007, 66193B1-66193B-4.
- [VDI 4640, 2010] VDI 4640-1: *Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*.- 33 S.; Düsseldorf, 2010.
- [Zorn et al., 2010] Zorn, R. Kölbel, T., Orywall, P. & Steger, H.: *Schnee- und Eisfreihaltung mittels innovativer Wärmerohrtechnik*. bbr Fachmagazin für Brunnen-und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie, 2010, S. 94-97.
- [Zorn et al., 2015] Zorn, R.; Steger, H.; Kölbel, T.: *De-icing and snow melting system with inovative heat pipe technology*. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

2.4 Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulationsprogrammen (Hochschule Biberach, Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff , M.Sc. Philipp Feuerstein, M.Sc. Adinda Van de Ven)

2.4.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Um zu erreichen, dass Erdwärmesonden als Wärmequelle für Wärmepumpen oder Wärmesenke zur geothermischen Kühlung einen nachhaltigen Beitrag zu einer CO₂-armen Energieversorgung leisten, ist eine möglichst genaue Auslegung und Planung erforderlich. Nur mit einer korrekten Dimensionierung lassen sich sowohl energieeffiziente und wirtschaftliche, d. h. nicht überdimensionierte Anlagen, realisieren und gleichzeitig Fehldimensionierungen (Unterdimensionierungen) mit der Gefahr von Schäden im Betrieb vermeiden.

Vor diesem Hintergrund war das Hauptziel des Arbeitspakets AP 4 die praxisrelevante Weiterentwicklung des Wissensstandes und der Methoden, wie die durch In-situ-Messungen und Tests, insbesondere Thermal Response Tests, gewonnenen Ergebnisse und Parameter methodisch korrekt sowie quantitativ exakter als bisher in Planungs- und Auslegungsmethoden von Erdwärmesondenanlagen, d. h. Berechnungsverfahren sowie Modellen und Simulationsprogrammen, zu verwenden sind. Innerhalb des Arbeitspaketes wurden Beiträge zu einer besseren Auslegung von Erdwärmesonden in drei Punkten erarbeitet:

1. Umrechnung des Bohrlochwiderstands von Erdwärmesonden vom Messwert aus einem Thermal Response Test (TRT) auf den vorgesehenen späteren Betriebszustand bzw. Betriebsbereich.
2. Erarbeiten von Hinweisen, Empfehlungen und Ansätzen für die Verwendung der im TRT ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit bei konvektivem Grundwassereinfluss in Auslegungsprogrammen sowie Analyse der Kurzzeitdynamik von EWS.
3. Erarbeiten von Hinweisen, wie die ungestörte Untergrund- und/oder Erdoberflächentemperatur in Auslegungsprogrammen für Erdwärmesonden anzusetzen ist, unter Verwendung von Literaturwerten und Messergebnissen in der Region der Hochschule Biberach.

Ad 1.: Es wurde, aufbauend auf vorangegangenen Untersuchungen, eine Methode entwickelt, mit der experimentell ermittelte Werte des effektiven Bohrlochwiderstands nach- und auf abweichende spätere Betriebsbedingungen umgerechnet werden können. Diese Methode wurde in einer Software prototypisch implementiert. Mit der Prüfung bzw. Umrechnung der Werte des Bohrlochwiderstands aus Thermal Response Tests wird die Genauigkeit der Auslegung verbessert und u. a. das im Betrieb vorgesehene Strömungsregime (laminar oder turbulent) überprüft.

Ad 2.: Die Analyse von Messdaten des Anfahrverhaltens unterschiedlicher Erdwärmesonden-Typen bei Wärmeeintrag (TRT) und Wärmeentzug (Anlagenbetrieb mit Wärmepumpe) führte zu einem einfachen Ansatz, wie das Kurzzeitverhalten (Spitzenlastverhalten während weniger Betriebsstunden) genauer als mit dem bisher üblichen Ansatz (Standard-Auswertemodell von Thermal Response Tests) beschrieben werden kann. Dieser Ansatz fußt auf der Überlagerung einer genaueren Näherungslösung der Kelvin'schen Linienquellentheorie (Reihenentwicklung mit mehreren Gliedern) und einem sich (analog zu einem thermischen Speicher) dynamisch aufbauenden Bohrlochwiderstand.

Ad 3.: Die Analyse der Auswirkung der angesetzten ungestörten Untergrundtemperatur auf die daraus resultierende Bemessung von Erdwärmesonden zeigt die Bedeutung dieses Parameters. Die häufig verfügbaren Messwerte des Jahresmittelwerts der Außentemperatur am Standort sollten deshalb nicht unverändert übernommen, sondern mit einer Anhebung um zumindest +1 K verwendet werden. Sind valide Messwerte der Untergrundtemperatur über den relevanten Tiefenbereich vorhanden, z. B. aus einem Thermal Response Test, sind diese vorzuziehen. Bei sehr kurzen Sonden ist zudem der Einsatz von Simulationsmodellen, welche die Sonde tiefenabhängig abbilden, dem Einsatz von Modellen mit konzentrierten Parametern vorzuziehen.

Die einzelnen Arbeitsschritte/Teil-Arbeitspakete von AP 4 stellen durchweg Beiträge zu einer verbesserten und genaueren Bemessung von Erdwärmesonden mithilfe entsprechender Simulations- und Auslegungsprogramme dar. Neben der allgemeinen Verbesserung der Auslegungsgenauigkeit wird mit der Entwicklung einer verbesserten Abbildung des Kurzzeitverhaltens von Erdwärmesonden die Wirtschaftlichkeit verbessert, weil der bisherige Standard-Ansatz grundsätzlich konservativer ist.

2.4.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Die Auslegung einer Erdwärmesonden-Anlage hängt von verschiedensten Parametern und Randbedingungen ab. Je präziser diese angegeben werden können, desto genauer und wirtschaftlicher kann die Auslegung erfolgen, ohne dass die Betriebssicherheit darunter leidet, was somit einen Beitrag zu einer ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Nutzung von Erdwärmesonden darstellt.

Bei den auslegungsrelevanten Parametern und Randbedingungen ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den nutzungsseitigen Parametern (Temperatur-, Leistungs- und Energieanforderungen sowie deren zeitliche Verläufe) und den geothermieseitigen - d. h. die geologischen und die Geothermieanlage betreffenden - Parametern und Randbedingungen. Um letztere in situ zu ermitteln, werden vielfach Thermal Response Tests (TRTs) durchgeführt und ggf. um weitere Messungen oder Datenerhebungen ergänzt. Die dabei gewonnenen Daten dürfen jedoch grundsätzlich nur dann direkt als Parameter für Auslegungs- und Simulationsmodelle verwendet werden, wenn der Auswertung des Thermal Response Tests und der späteren Anlagenauslegung übereinstimmende Modellansätze zugrunde liegen. Darüber hinaus ist die Abhängigkeit von z. B. dem ermittelten Wert des Bohrlochwiderstands auf den späteren Anlagenbetrieb zu beachten und ggf. der Bohrlochwiderstand umzurechnen.

2.4.3 Aufgabenstellung

Hauptziel dieses Arbeitspakets ist die praxisrelevante Weiterentwicklung des Wissensstandes und der Methoden, wie die durch In-situ-Messungen und Tests, insbesondere Thermal Response Tests, gewonnenen Ergebnisse und Parameter methodisch korrekt sowie quantitativ exakter als bisher in Planungs- und Auslegungsmethoden von Erdwärmesondenanlagen, d. h. Berechnungsverfahren sowie Modellen und Simulationsprogrammen, zu verwenden sind. Primär soll ein Software-Werkzeug für die Umrechnung von in Thermal Response Tests ermittelten Bohrlochwiderständen auf die späteren Betriebsbedingungen entstehen. Darüber hinaus werden Hinweise entwickelt, wie mit weiteren dabei ermittelten Werten (z. B. Wärmeleitfähigkeit, ungestörte Bodentemperatur) und ggf. anderen Parametern, unter Berücksichtigung der Randbedingungen während der Messung, bei der

Auslegung und Simulation umgegangen werden soll.

Das Arbeitsprogramm in diesem Arbeitspaket war zunächst in drei Arbeitsschritte unterteilt (1 -3). Nach Projektbeginn stellte sich ein weiterer Arbeitsschritt (4) als sinnvoll und zielführend heraus, zu dessen Gunsten die Arbeitsschritte 2 & 3 zusammengefasst wurden, um den gegebenen Zeit- und Kostenrahmen einzuhalten:

- Arbeitsschritt 1: Entwicklung eines einfach anzuwendenden Software-Werkzeuges zur Umrechnung des im Thermal Response Test (TRT) ermittelten R_b -Werts (effektiver Bohrlochwiderstand) auf die geplanten Betriebsbedingungen.
- Arbeitsschritte 2 & 3: Erarbeiten von Hinweisen, Empfehlungen und Ansätzen für die Verwendung der im TRT ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit bei konvektivem Grundwassereinfluss in Auslegungsprogrammen sowie Analyse der Kurzzeitdynamik von EWS.
- Arbeitsschritt 4 (neu ergänzt): Erarbeiten von Hinweisen, wie die ungestörte Untergrund- und/oder Erdoberflächentemperatur in Auslegungsprogrammen für Erdwärmesonden anzusetzen ist, unter Verwendung von Literaturwerten und Messergebnissen in der Region der Hochschule Biberach.

2.4.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In vorgehenden Arbeiten zu Thermal Response Tests (TRT) an Erdwärmesonden im Rahmen von Forschungshaben (GEOSYST, QEWS) und in Gremien zur Festlegung technischer Regeln (IEA Annex, Richtlinienausschuss VDI 4640, Blatt 5) befasste sich die Hochschule Biberach mit der Übertragbarkeit von in Thermal Response Tests gewonnenen Messergebnissen auf die Planung und Auslegung von Erdwärmesonden [Koenigsdorff, Feuerstein, Köhler, 2012].

Grundlegende Erkenntnisse und Anwendungsbeispiele hierzu in punkto Bohrlochwiderstand wurden von der Hochschule bereits veröffentlicht [Koenigsdorff, 2011]. Darüber hinaus wurden Modellsätze zur Berechnung des Bohrlochwiderstands geprüft und verglichen, was zum Teil bereits in Kooperation mit Solites geschah. Darauf aufbauend wurden Hinweise entwickelt, wie mit der ermittelten Wärmeleitfähigkeit bei Auslegungsberechnungen unter Berücksichtigung der sonstigen Randbedingungen umgegangen werden muss [Koenigsdorff, Feuerstein, 2012]. Um diese Erkenntnisse bzw. z. T. bislang nur Ansätze zu vervollständigen sowie Hilfswerkzeuge für die Praxis zur Verfügung zu stellen, ist die Fortführung der Arbeiten notwendig, was im Rahmen dieses Vorhabens erfolgte (Arbeitsschritt 1 in AP 4).

Zur Beschreibung eines konvektiven/advektiven Grundwassereinflusses auf Erdwärmesonden sowie zur Analyse von deren Kurzzeitdynamik liegen einige theoretische und zum Teil auch experimentelle Untersuchungen vor. Diese umfassen z. B. die Erweiterung des Standard-Ansatzes der (ruhenden) Linienquelle zu bewegten Linienquellen (Moving Line Source) [Kölbel, 2010], die Erweiterung von Modellen der Wärmeübertragung im Bohrloch um thermische Kapazitäten [Bauer, 2011], [Kübert, 2013] sowie die mehrdimensionale Modellierung, z. B. [Wagner, Blum et al., 2013]. Bislang hat sich jedoch noch kein Ansatz für die einfache Anwendung zur Dimensionierung und Simulation von Erdwärmesonden als Standard durchgesetzt – im Gegensatz zum etablierten Ansatz der „g-functions“, welche weder eine Grundwasserströmung noch die Kurzzeitdynamik behandeln [Hellström,

Sanner, 2000]. Unabhängig von weiteren, tiefergehenden und umfangreicheren Forschungsarbeiten, die in diesem Bereich noch erforderlich sind, wäre es wünschenswert, zumindest Teilaspekte mit empirischen bzw. halbempirischen Ansätzen zu beschreiben und damit kurzfristig eine einfache planungspraktische Behandlung zu ermöglichen. Dies wurde in den zusammengefassten Arbeitsschritten 2 & 3 in AP dieses Vorhabens begonnen.

Die ungestörte Temperatur des Untergrundes bzw. der Erdoberfläche stellt eine wichtige Randbedingung bei der Auslegung von Erdwärmesondenanlagen dar. Diese ist in den meisten Fällen höher anzusetzen, als in der Bibliotheken gängiger Auslegungsprogramme [Hellström, Sanner, 2000] als Standardwerte hinterlegt ist. Neben Literaturwerten und Messergebnissen der ungestörten Untergrundtemperatur aus Thermal Response Tests liegen hierzu langjährige Messungen am Technikum Gebäudeklimatik der Hochschule Biberach sowie aus der Region vor. Diese konnten bislang jedoch noch nicht umfassend ausgewertet und in den Kontext mit anderen Datenquellen gestellt werden, was deshalb als ergänzender Arbeitsschritt 4 in AP 4 dieses Vorhabens mit aufgenommen wurde.

2.4.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannte Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Außerhalb des Projektverbunds bzw. LFZG sind während des Vorhabens keine Fortschritte auf dem Gebiet dieses Arbeitspakets bekannt geworden. Lediglich die Arbeiten unter Beteiligung von Blum aus dem KIT & LFZG [Wagner, Blum et al., 2013] zum Grundwassereinfluss auf Thermal Response Tests an Erdwärmesonden flossen als zusätzliche Information mit ein.

2.4.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens verlief grundsätzlich planungsgemäß mit einer Modifikation einer Verzögerung. Die Arbeitsschritte/Teil-Arbeitspakete des AP 4 sind thematisch aufeinander bezogen und ergänzen sich, weisen aber keine operativen Abhängigkeiten voneinander auf. Sie wurden deshalb parallel und kontinuierlich über die Vorhabenslaufzeit bearbeitet.

Kurz nach Beginn des Vorhabens stellte sich die Ergänzung des Arbeitsprogramms um Arbeitsschritt 4 (Untersuchungen zur ungestörten Untergrundtemperatur) als wünschenswert und sinnvoll heraus. In der Folge wurden die Arbeitsschritte 2 & 3 zusammengefasst. Dies erfolgte in Absprache mit den Projektpartnern und dem Fördermittelgeber, u. a. im Zuge der regelmäßig stattfindenden LFZG-Beiratssitzungen.

Eine Verzögerung im Arbeitsschritt 4 trat durch einen fremdverursachten Bauschaden im Juni 2014 auf. Bei der Erstellung von Rasenkanten mit Hilfe von Randsteinen im Bereich des Geothermietetestfelds der Hochschule Biberach (siehe Abbildung 37) wurden von der beauftragten Fremdfirma Kabel und Fühler aus dem Erdreich herausgezogen sowie z. T. beschädigt sowie Schachtringe von Brunnenpegeln ohne Rücksprache mit der HBC in der Höhe versetzt, wodurch Höhenbezugsmaße verändert wurden. Der Schaden wurde bis ca. Mitte 2015 soweit möglich vom Verursacher behoben bzw. von den Haftpflichtversicherung Mittel zur Reparatur bereitgestellt. Durch diesen Bauschaden wurden Messreihen der Untergrundtemperatur z. T. unterbrochen und Auswertungen verzögert. Im Zuge der Arbeiten zur Schadensbehebung ergab sich jedoch die Möglichkeit, die über 10 Jahre alte Erdwärmesonde HBC-EWS1 am Kopf zugänglich zu machen, sodass künftig mit einem kalibrierten

Absenkföhler in den Sondenrohren Kontrollmessungen möglich sind, was zeitlich jedoch nicht mehr innerhalb dieses Vorhabens umgesetzt werden konnte.

2.4.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es erfolgte ein organisatorischer und fachlicher Austausch innerhalb des Projektverbunds mit allen Verbundpartnern im Zuge der Projektkoordination. Darüber hinaus wurde fachlich vertieft zusammengearbeitet mit:

- Dipl.-Ing. Mathieu Riegger, Solites (beratende Unterstützung und fachlicher Austausch zum Software-Werkzeug für die Umrechnung des Bohrlochwiderstands, siehe Arbeitsschritt 1 in AP 4)
- Prof. Dr. Philipp Blum, KIT (Informationsaustausch zu Untergrundtemperaturen sowie zum dynamischen Kurzzeitverhalten von Erdwärmesonden, Arbeitsschritte 2&3 sowie 4 in AP 4)
- Dr. Hagen Steger, KIT (Glasfaser-Temperaturmessungen durch das KIT am Geothermie-testfeld der HBC im Rahmen von AP 3).

2.4.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Um zu erreichen, dass Erdwärmesonden als Wärmequelle für Wärmepumpen oder Wärmesenke zur geothermischen Kühlung einen nachhaltigen Beitrag zu einer CO₂-armen Energieversorgung leisten, ist eine möglichst genaue Auslegung und Planung erforderlich. Nur mit einer korrekten Dimensionierung lassen sich sowohl energieeffiziente und wirtschaftliche, d. h. nicht überdimensionierte Anlagen, realisieren und gleichzeitig Fehldimensionierungen (Unterdimensionierungen) mit der Gefahr von Schäden im Betrieb vermeiden. Die einzelnen Arbeitsschritte/Teil-Arbeitspakete von AP 4 stellen durchweg Beiträge zu einer verbesserten und genaueren Bemessung von Erdwärmesonden mithilfe entsprechender Simulations- und Auslegungsprogramme dar. Neben der allgemeinen Verbesserung der Auslegungsgenauigkeit wird mit der Entwicklung einer verbesserten Abbildung des Kurzzeitverhaltens von Erdwärmesonden die Wirtschaftlichkeit verbessert, weil der bisherige Standard-Ansatz grundsätzlich konservativer ist.

2.4.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

2.4.9.1 AP 4 – Arbeitsschritt 1: Softwarewerkzeug zur Umrechnung des Bohrlochwiderstands

Die folgende Zusammenfassung der Ergebnisse zu diesem Teil-Arbeitspaket ist in wesentlichen Teilen dem Manuskript zum zugehörigen Vortrag beim 15. OTTI-Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie [Koenigsdorff, 2016] entnommen. Diese Arbeiten wurden im fachlichen Austausch mit Solites durchgeführt (vgl. AP 2).

Der effektive Bohrlochwiderstand einer Erdwärmesonde setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen, die als Teilwiderstände in einer Dreieckschaltung interpretiert werden können, siehe Abbildung 28.

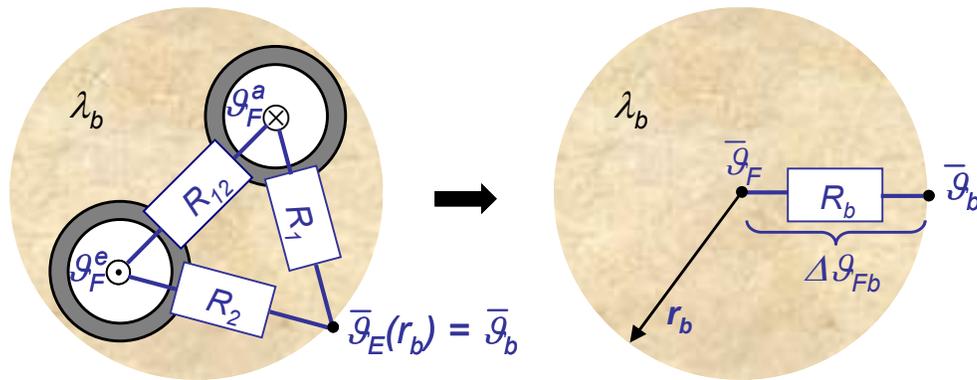


Abbildung 28: Widerstandsmodell des Bohrlochwiderstands einer Erdwärmesonde [Koenigsdorff, 2011b]

Abgesehen von einer i. d. R. geringen Temperaturabhängigkeit können darin die Wärmeleitfähigkeiten des Rohrmaterials sowie des Verfüllmaterials im Bohrloch und evtl. Kontaktwiderstände zwischen Verfüllmaterial und Rohren bzw. Bohrlochrand als Konstanten betrachtet werden. Ebenfalls konstant, aber vorab schwer bzw. nicht bestimmbar, sind die Lage der Sondenrohre im Bohrloch und damit ihre Abstände zueinander sowie zum Bohrlochrand. Der Wärmeübergang zwischen dem Wärmeträgerfluid und den Innenoberflächen der Sondenrohre sowie der thermische Kurzschluss zwischen auf- und absteigendem Fluidstrom sind dagegen nicht konstant, sondern hängen stark vom Fluid und dessen Betriebszustand ab [Koenigsdorff, 2011a], [Koenigsdorff, Feuerstein, 2012].

In einem TRT wird ein Effektivwert des Bohrlochwiderstands R_b messtechnisch aus der Temperaturantwort der untersuchten Erdwärmesonde auf einen aufgeprägten Wärmestrom bestimmt [Sanner et al., 1999]. Ermittelt wird damit der effektive Gesamtwiderstand R_b in Abbildung 28, während die drei Einzelwiderstände R_1 , R_2 und R_{12} zunächst nicht quantifiziert sind. Weiterhin erfolgt der TRT i. d. R. mit Wasser als Wärmeträgermedium und bei turbulenter Rohrströmung, während die spätere Anlage meist mit einem Wasser-Glykol-Gemisch betrieben wird und dabei der Strömungszustand – gewollt oder unbeabsichtigt – mitunter auch von einer voll turbulenten Strömung abweichen kann.

Damit stellt sich die Aufgabe, bei abweichenden Betriebsbedingungen zwischen TRT und späterem Anlagenbetrieb den aus TRT-Messergebnissen abgeleiteten R_b -Wert auf die späteren Betriebsbedingungen umzurechnen bzw. zu überprüfen, ob sich die Werte für beide Betriebszustände signifikant unterscheiden. Um eine solche Umrechnung zu bewerkstelligen, sind die drei Einzelwiderstände und der effektive Gesamtwiderstand zunächst rechnerisch so zu ermitteln, dass der gemessene R_b -Wert nachvollzogen werden kann und eine realistische Umrechnung auf ein anderes Fluid in den Sonden und/oder ein anderes Betriebsregime des Fluids möglich ist.

Als Lösungsansatz bei U- und Doppel-U-Sonden für diese Aufgabe wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Positionen der Sondenrohre in der Bohrung unbekannt sind. Diese variieren über die Tiefe des meist nicht vollkommen geraden und gleichförmigen Bohrlochs, sodass es keine einfachen und eindeutigen Positionsangaben gibt. Für den Zweck der Nach- und Umrechnung des resultierenden effektiven Bohrlochwiderstands wird nun postuliert, dass sich die Auswirkung der über die Bohrlöchtiefe variierenden Sondenpositionen auf die Wärmeübertragung im Bohrloch durch eine konstante mittlere Positionen beschreiben lässt.

Da i. d. R. aus einem TRT nur ein Messwert für R_b vorliegt, sollte eine Nachrechnung des effektiven

Bohrlochwiderstands mittels Parameteranpassung nur einen freien Parameter aufweisen. Um dies zu erreichen, wird weiter die Vereinfachung eingeführt, dass die Sondenrohre auf einer bzw. zwei zueinander senkrecht liegenden Linien durch den Mittelpunkt des Kreisquerschnitts des Bohrlochs liegen und die Rohre alle stets denselben Abstand vom Mittelpunkt haben, d. h. auf demselben konzentrischen Kreis liegen, siehe Abbildung 29. Bei einer U-Sonde ist dabei eine punkt- und eine achsensymmetrische Anordnung möglich. Bei einer Doppel-U-Sonde liegen stets alle vier Sondenrohre symmetrisch zum Mittelpunkt, es können jedoch die beiden Rohre jeweils mit gleicher Strömungsrichtung (abwärts bzw. aufwärts) entweder nebeneinander oder einander gegenüber liegen.

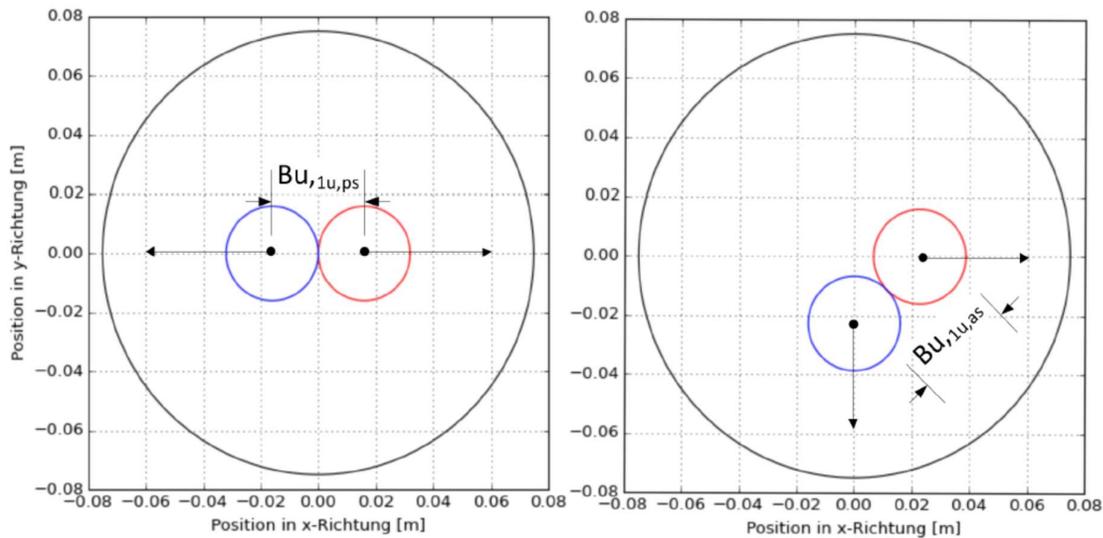


Abbildung 29: Punkt- und achsensymmetrische Rohranordnung bei einer U-Sonde [Döbele, 2015]

Mit diesen Annahmen und Einschränkungen der geometrischen Vielfalt lässt sich der in Abbildung 29 dargestellte mittlere effektive Schenkelabstand Bu als einziger relevanter Geometrieparameter definieren. Dieser kann als Anpassungsparameter in einem Rechenmodell verwendet werden, um den in einem TRT gemessenen R_b -Wert nachzubilden. Im Bedarfsfall kann dabei noch zwischen der punkt- und der achsensymmetrischen Rohranordnung gewählt werden. Ist die Nachrechnung des TRT-Messwerts von R_b erfolgreich durchgeführt, kann eine Umrechnung auf abweichende Betriebsbedingungen erfolgen. Gelingt dies nicht, ist entweder der hier gewählte Ansatz zu eingeschränkt oder es liegen signifikante Abweichungen bei anderen Parametern vor. Im Einzelfall kann dies z. B. ein Hinweis auf einen eventuellen Ausführungsfehler sein.

Die Umsetzung des vorstehend beschriebenen Lösungsansatzes in einem prototypischen Rechenprogramm erfolgte durch Michael Döbele in dessen Masterarbeit [Döbele, 2015]. Darin wurde zur Berechnung der mehrdimensionalen Wärmeleitung zwischen Sondenrohren und Bohrlochverfüllung und daraus des effektiven Bohrlochwiderstands über die gesamte Bohrlochtiefe die sog. Multipole-Methode verwendet [Claesson, Hellström, 2001]. Diese erlaubt eine sehr genaue Berechnung bei sehr geringer Rechenzeit. Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Eingabemenüs des Programms:

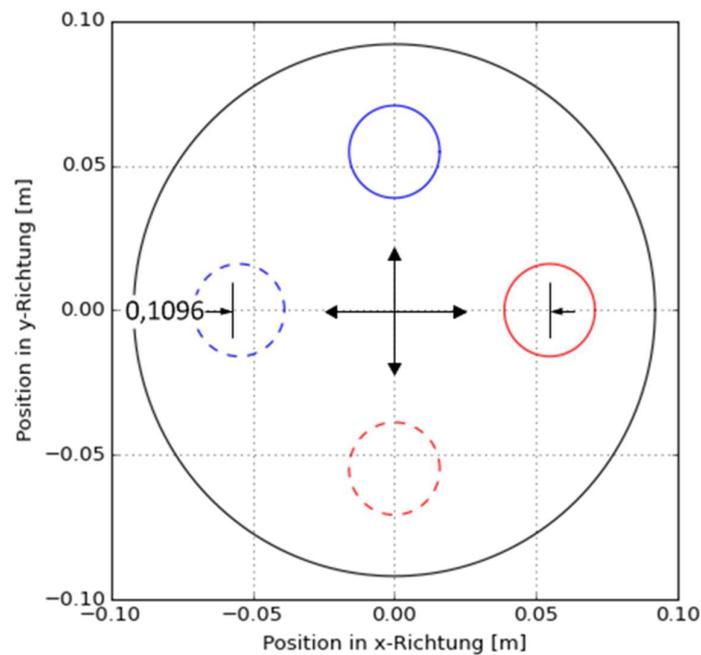
Eingaben Erdwärmesonde			
	TRT	Betriebsbedingungen	
Wärmeleitfähigkeit Verfüllung λ_b	2.0	2.0	W/(m*K)
Wärmeleitfähigkeit Erdreich λ	1.968	1.968	W/(m*K)
Innen-Radius r_b	0.092	0.092	m
Außen-Radius r_c	50	50	m
Thermischer Widerstands-Koeff β_c	0	0	-
Temperatur am äußeren Rand T_c	0	0	°C
Länge Erdwärmesonde L_{bhe}	80	80	m
Volumenstrom im Sondenrohr V_{dot}	0.35	0.52	m ³ /h
$R_{b,eff}$ aus TRT	0.0773		(m*K)/W

Abbildung 30: Menu-Ausschnitt des Programm-Prototyps zur R_b -Umrechnung [Döbele, 2015]

In die linke der beiden Eingabespalten für numerische Werte sind die Sonden- und Betriebsparameter sowie TRT-Ergebnisse einzugeben, in die rechte Spalte die Daten für den späteren Anlagenbetrieb. Das Programm bestimmt dann den mittleren effektiven Schenkelabstand der Sondenrohre Bu iterativ so, dass der R_b -Wert aus dem TRT möglich genau wiedergegeben wird. Anschließend erfolgt die Umrechnung auf den späteren Anlagenbetrieb.

In Abbildung 31 ist dieses Vorgehen illustriert anhand des Beispiels einer Erdwärmesonde in Wolfersdorf, die im Rahmen des in [Koenigsdorff et al., 2012] dokumentierten Forschungsprojekts mehreren Thermal Response Tests und ergänzenden Messungen unterzogen wurde. In diesem Fall einer Doppel-U-Sonde mit 80 m Sondenlänge wurde mit Wasser im TRT $R_b = 0,0774 \text{ m}^*\text{K}/\text{W}$ ermittelt. Nach iterativer Variation des mittleren effektiven Schenkelabstands Bu kann das Programm den Wert von R_b im vorliegenden Fall nahezu exakt (Abweichung < 1 %) für $Bu = 0,1096 \text{ m}$ wiedergeben. Die Umrechnung vom TRT-Heizbetrieb mit Wasser mit im Mittel ca. 35 °C Temperatur auf ein Wasser-Glykol-Gemisch bei 5 °C für den künftigen Wärmeentzug durch eine Wärmepumpe resultiert in einem um 40 % größeren effektiven Bohrlochwiderstand von $R_b = 0,1094 \text{ m}^*\text{K}/\text{W}$. Weiterhin meldet das Programm, dass die Nachrechnung des TRT-Messwerts und damit auch die Umrechnung auf den künftigen Betriebszustand erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Bislang wurde das Programm anhand von vier Thermal Response Tests an drei Doppel-U-Sonden und einer (Einfach-)U-Sonde an den Standorten Wolfersdorf und Biberach getestet [Koenigsdorff et al., 2012], [Döbele, 2015]. In drei der vier Fälle führen die Berechnungen zum Erfolg. Lediglich bei einer Doppel-U-Sonde in Wolfersdorf lässt sich der TRT-Messwert von R_b nicht nachbilden. Hierfür kommen allerdings auch unzutreffenden Angabe bei den Sondenparametern in Betracht [Döbele, 2015].



Ausgabe Berechnungen

	TRT	Betriebsbedingungen	
Ra	0.2606	0.4186	(m*K)/W
Rb	0.0651	0.1054	(m*K)/W
η	0.7539	0.3398	-
Rb,eff (einheitl. Wärmestrom)	0.0774 (Δ -TRT: 0.2 %)	0.1094 (Δ -TRT: 41.5 %)	(m*K)/W
Rb,eff (einheitl. Bohrlochwand-Temperatur)	0.0770 (Δ -TRT: -0.4 %)	0.1094 (Δ -TRT: 41.5 %)	(m*K)/W
Schenkelabstand Bu	0.1096	0.1096	m
Rb,eff aus TRT abbildbar?	Ja		

Abbildung 31: Berechnungsbeispiel zur Rb-Umrechnung [Döbele, 2015]

Aber auch bei korrekter Datenlage ist es möglich, dass der hier vorgestellte Lösungsansatz mit einem mittleren effektiven Schenkelabstand und der Lage auf einem konzentrischen Kreis im Bohrloch nicht funktioniert, weil die Rohre auch exzentrisch zur Bohrlochmittellinie liegen können, siehe Abbildung 32. Deshalb wurde in [Döbele, 2015] zusätzlich untersucht, inwieweit sich beliebige exzentrische Rohranordnungen grundsätzlich durch konzentrische Ersatzanordnungen mit anderem Schenkelabstand bei identischem thermischem Verhalten ersetzen lassen. Hierfür wurde eine Programmvariante erstellt, bei welcher die einzelnen Rohre beliebig im Bohrloch positioniert werden können. Ergebnis: In den meisten Fällen ist eine Nachbildung mit konzentrischer Ersatzanordnung möglich. Lediglich exzentrische Rohranordnungen mit sehr kleinen Schenkelabständen lassen sich nicht übertragen, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds um das Bohrloch kleiner ist als die des Verfüllmaterials im Bohrloch [Döbele, 2015] – was einem eher seltenen Anwendungsfall entspricht.

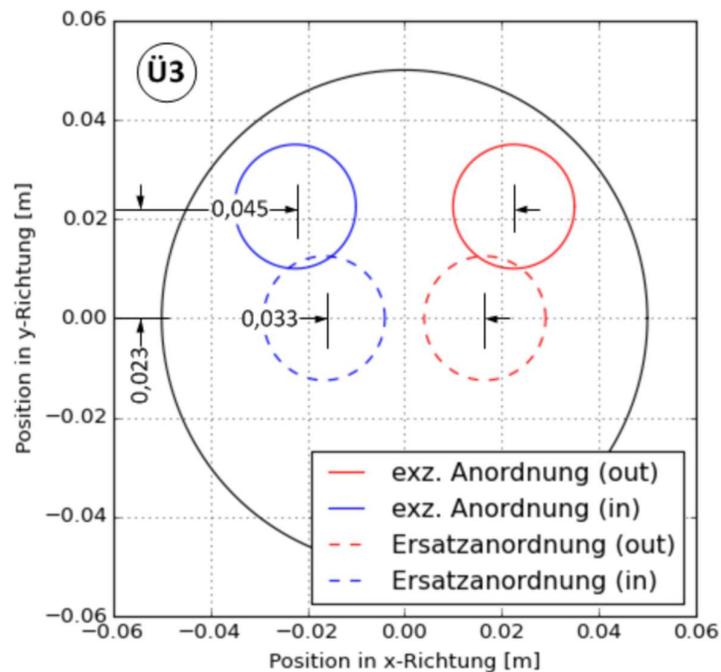


Abbildung 32: Ersatz exzentrischer Rohranordnung durch konzentrische Anordnung [Döbele, 2015]

2.4.9.2 AP 4 – Arbeitsschritte 2 & 3:

Die vorhandenen komplexen Theorien und numerischen Modellansätze zum Grundwassereinfluss auf Erdwärmesonden und zu deren Kurzzeitdynamik zu erweitern war im Rahmen des vorliegenden Vorhabens nicht möglich, insbesondere da sich diesbezüglich verschiedene, noch nicht miteinander verglichene Ansätze in Diskussion befinden (siehe Abschnitt 2.4.4). Während strömendes Grundwasser das thermisch-energetische Verhalten von Erdwärmesonden und Erdwärmesonden-Feldern auf allen Zeitskalen beeinflussen, spielt die Kurzzeitdynamik, dem Begriff entsprechend, nur bei kurzen dynamischen Belastungen eine Rolle. Gemeint ist damit das thermische Anlaufverhalten unter thermische Belastung (Wärmeentzug oder Wärmeeintrag) für Betriebszeiten, die sich im Bereich von minimal unter einer bis wenigen Stunden bewegen und damit häufig kürzer sind als das Mindestzeitkriterium für die Auswertung eines Thermal Response Tests mit der dort üblichen Vereinfachung der Kelvin'schen Linienquellentheorie [Sanner et al., 1999].

Das dynamische Kurzzeitverhalten von Erdwärmesonden (ohne oder mit Grundwassereinfluss) ist für die Auslegung und Erdwärmesondenanlagen von großer Relevanz, weil es das sogenannte Spitzenlastverhalten der Sonden bestimmt. Dieses beschreibt die Entwicklung der Sonden- und Fluidtemperaturen während einzelner Betriebstakte der angeschlossenen Wärmepumpe und hängt maßgeblich von der (dynamischen) Wärmeübertragung in der Sonde sowie deren nächster Umgebung ab. Neben der Wärmeleitung und ggf. Advektion/Konvektion im Untergrund nahe der Sonde ist hierbei u. a. die thermische (Speicher-)Kapazität der eingesetzten Erdwärmesonde inkl. Bohrloch und dessen Verfüllung entscheidend. Konventionelle U- und Doppel-U-Sonden unterscheiden sich dabei deutlich von Sonderkonstruktionen mit erhöhter Wärmekapazität wie z. B. Koaxial-Speichersonden [Kübert, 2013].

Im Rahmen dieses Vorhabens erfolgte eine Beschränkung auf das vorstehend beschriebene Kurzzeitverhalten von Erdwärmesonden. Um kurzfristig zumindest für einige Fälle eine einfache planungspraktische Behandlung zu ermöglichen, wurden empirische und halbempirische Ansätze anhand von Messdaten untersucht. Ausgangspunkt waren Messreihen aus Thermal Response Tests, also der Sprungantwort auf eine konstante Wärmezufuhr, für konventionelle Doppel-U-Sonden sowie Koaxial-Speichersonden eines Herstellers, der im Rahmen einer separaten Kooperation Messdaten seiner Sonden zur Verfügung stellte, die zusätzlich in diesem Vorhaben verwendet werden konnten.

In Abbildung 33 ist zunächst das Anlaufverhalten von Doppel-U- und Speicher-Koaxial-Erdwärmesonden aus verschiedenen Thermal Response Tests einander gegenüber gestellt.

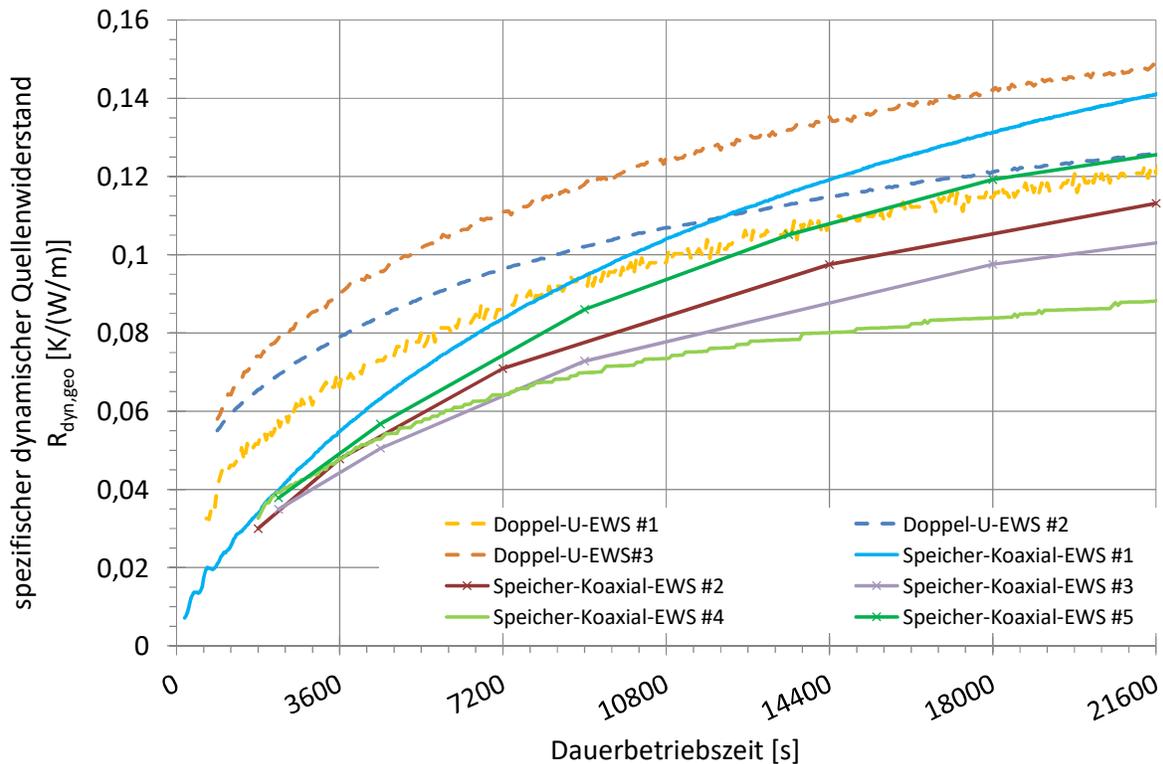


Abbildung 33: Anlaufverhalten verschiedener Sonden aus Thermal Response Tests

Da die zeitabhängige Temperaturantwort einer Erdwärmesonde bei einem Thermal Response Test zur eingebrachten spezifischen (auf die Sondenlänge bzw. Bohrlochtiefe bezogene) Wärmeleistung proportional ist, ist in der Abbildung nicht die zeitabhängige Erhöhung der Fluid-Mitteltemperatur (Mittelwert aus Sondeneintritts- und Sondenaustrittstemperatur) aufgetragen, sondern der sich daraus ergebende dynamische thermische Gesamtwiderstand des geothermischen Systems:

$$R_{dyn,geo}(t) = \frac{\Delta \bar{\vartheta}_F}{\dot{q}} \quad (13)$$

Für hinreichend lange Zeiten, d. h. Zeiten (u. U. deutlich) größer als das Mindestzeitkriterium des jeweiligen Thermal Response Tests, stimmt $R_{dyn,geo}$ recht gut mit dem Widerstand überein, der sich aus dem Standard-Modellansatz zur Auswertung von Thermal Response Test ergibt, siehe Gleichungen (13) und (14) sowie Abbildung 36.

$$\Delta \bar{\vartheta}_F = \frac{\dot{q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha_E \cdot t}{r^2} \right) - \gamma \right) + R_b \cdot \dot{q} \quad (14)$$

Dies ist zwangsläufig der Fall, weil die Parameter effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds und Bohrlochwiderstand mit genau diesem Modell durch Parameteranpassung aus den Messwerten für Zeiten größer als das Mindestzeitkriterium bestimmt werden. Für kürzere Zeiten, also für die hier untersuchte Kurzzeitdynamik, weichen TRT-Modell und gemessenes Verhalten jedoch deutlich voneinander ab. Dies hat zwei Gründe:

1. Das zur TRT-Auswertung verwendete Rechenmodell ist eine Näherungslösung der Linienquellentheorie, die rein mathematisch für Zeiten unterhalb des Mindestzeitkriteriums ungenau ist.
2. Das reale physikalische Verhalten der Sonden weicht vom physikalischen Modell Linienquelle + konstanter Bohrlochwiderstand ab. Insbesondere ist für die betrachteten kurzen Zeiten der Bohrlochwiderstand noch keine Konstante, sondern baut sich aufgrund der thermischen Kapazität von Sonde und Bohrloch erst allmählich auf.

Um dieses, vom TRT-Standardauswertemodell, Gleichung (14), abweichende Verhalten hinreichend genau abzubilden ohne auf komplexe Modelle zurückzugreifen, wurden die beiden Folgenden Ansätze untersucht:

1. Empirisch: Anpassung der Kurvenparameter ausgewählter Funktionen an die Messwerte nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.
2. Semi-empirisch: Verwendung einer genaueren, für kurze Zeiten ab minimal ca. 0,5 h geltenden Lösung der Kelvin'schen Linienquellentheorie plus Ansatz eines sich (analog zu einem thermischen Speicher) dynamisch aufbauenden Bohrlochwiderstands.

In Abbildung 34 und Abbildung 35 sind exemplarische Ergebnisse für den ersten Ansatz dargestellt. Zur Approximation der Messergebnisse sind dort Wurzelfunktionen sowie Polynome vierter Ordnung herangezogen, und zwar jeweils sowohl (erzwungen) durch den Ursprung verlaufend (siehe Abbildung 34) als auch die y-Achse bei einem Wert größer Null schneidend (siehe Abbildung 35), wobei der Schnittpunkt aus der Parameteranpassung resultiert. Es zeigt sich, dass beide Funktionen, Wurzelfunktion und Polynom, den Verlauf der Messergebnisse dann besser wiedergeben, wenn kein Verlauf durch den Ursprung erzwungen wird. Offenbar gibt ein positiver „Offset“ zu Beginn der Beheizung das reale Verhalten besser wieder.

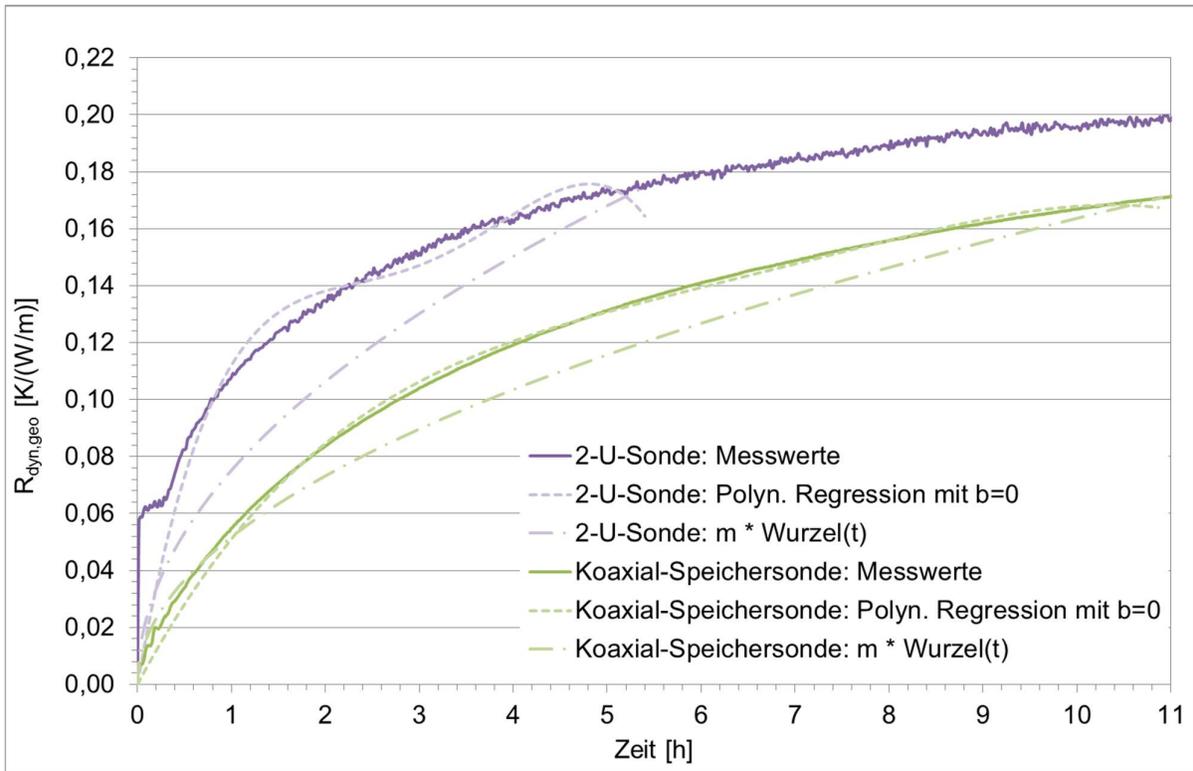


Abbildung 34: Annäherung des Anlaufverhaltens mittels Wurzelfunktion und polynomialer Regression erzwungen durch den Ursprung

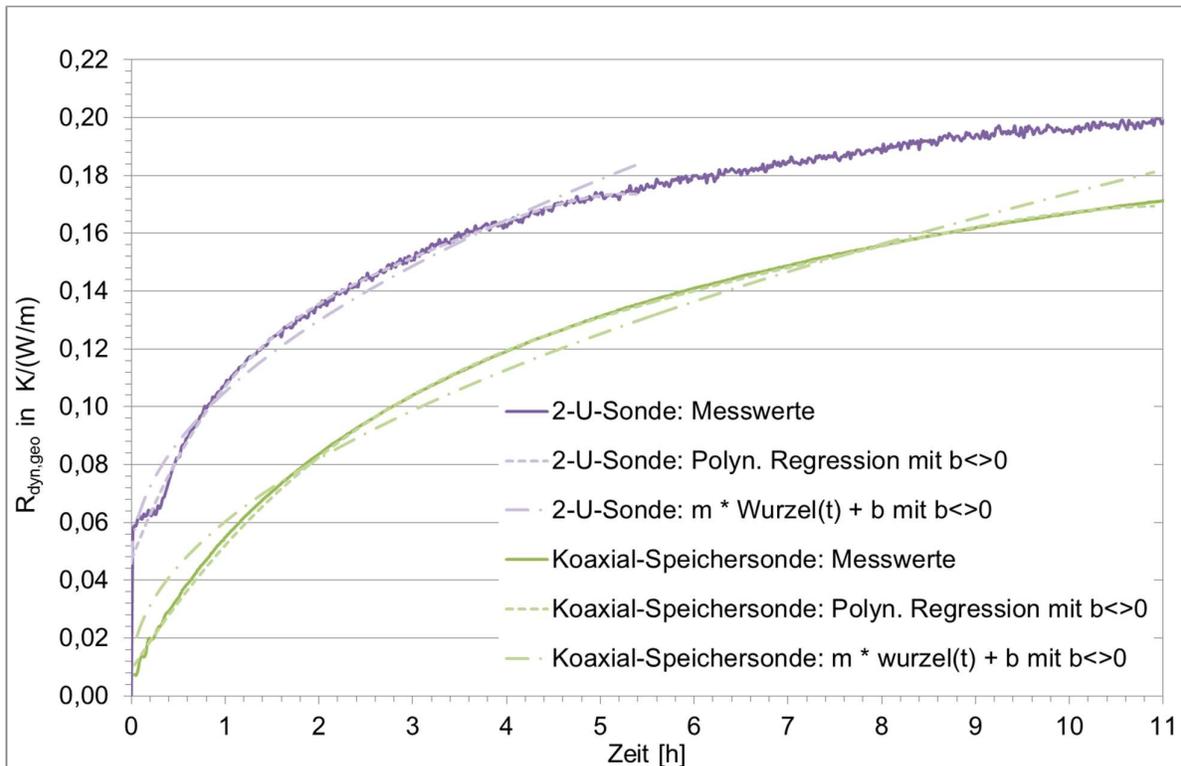


Abbildung 35: Annäherung des Anlaufverhaltens mittels Wurzelfunktion und polynomialer Regression mit positivem Offset

Dies lässt sich physikalisch erklären: Ohne Beheizung weist das umgepumpte Wärmeträgerfluid in den Sonden die vor dem TRT noch ungestörte Untergrundtemperatur auf. Sobald das Wärmeträgerfluid mit der Heizleistung \dot{Q} beaufschlagt wird, baut sich umgehend die entsprechende Spreizung zwischen Ein- und Austrittstemperatur des Wärmeträgerfluids auf:

$$\Delta \bar{\mathcal{G}}_F = \mathcal{G}_{EWS,ein} - \mathcal{G}_{EWS,aus} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (15)$$

Zur Auswertung von Thermal Response Tests und damit auch zur Bestimmung von $R_{dyn,geo}(t)$ wird die zeitabhängige Erhöhung der Fluid-Mitteltemperatur herangezogen. Diese liegt definitionsgemäß in der Mitte zwischen der Ein- und der Austrittstemperatur des Wärmeträgerfluids. Somit steigt zu Beginn der Beheizung die Fluidmitteltemperatur nahezu sofort um die halbe Temperaturspreizung an, auch wenn die Erdwärmesonde noch nicht mit einer Erwärmung reagiert hat. Es existiert also bei Beginn der Beheizung eine umgehend auftretende Temperaturerhöhung um

$\frac{\Delta \mathcal{G}_F^{e-a}}{2}$, die sich in einen entsprechenden Startwert von $R_{b,0}$ umrechnen lässt:

$$R_{b,dyn}(t=0) = R_{b,0} = \frac{\Delta \mathcal{G}_F^{e-a}}{2 \cdot \dot{q}} \quad (16)$$

Dies erklärt nicht nur den Offset beim rein empirischen ersten Ansatz, sondern kann auch für den zweiten, halbempirischen Ansatz verwendet werden. Bei diesem wird das dynamische Verhalten des sich allmählich aufbauenden Bohrlochwiderstands mit einer Exponentialfunktion analog zur Aufheizung eines Speichers beschrieben, aber mit dem zusätzlichen Offset:

$$R_{b,dyn}(t) = R_{b,0} + (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \cdot (R_b - R_{b,0}) \quad (17)$$

Der darin zunächst noch unbekannt Parameter ist die Zeitkonstante τ . Um die Tauglichkeit des semi-empirischen Ansatzes überprüfen, wird diese zunächst so gewählt, dass das gemessene Verhalten möglichst gut wiedergegeben wird. Abbildung 36 zeigt, dass in den dort dargestellten Fällen mit $\tau = 2,5$ h für die Doppel-U-Sonde und $\tau = 3,5$ h für die Koaxial-Speichersonde das Kurzzeitverhalten der untersuchten Erdwärmesonden sehr gut wiedergegeben wird, wenn er mit einer genaueren Lösung der Kelvin'schen Linienquellentheorie kombiniert wird (siehe Abbildung 36). Dieser Ansatz erscheint damit für eine Implementierung in GEO-HAND^{light} [Koenigsdorff et al., 2007] geeignet. Dies ist im Nachgang zum vorliegenden Projekt vorgesehen.

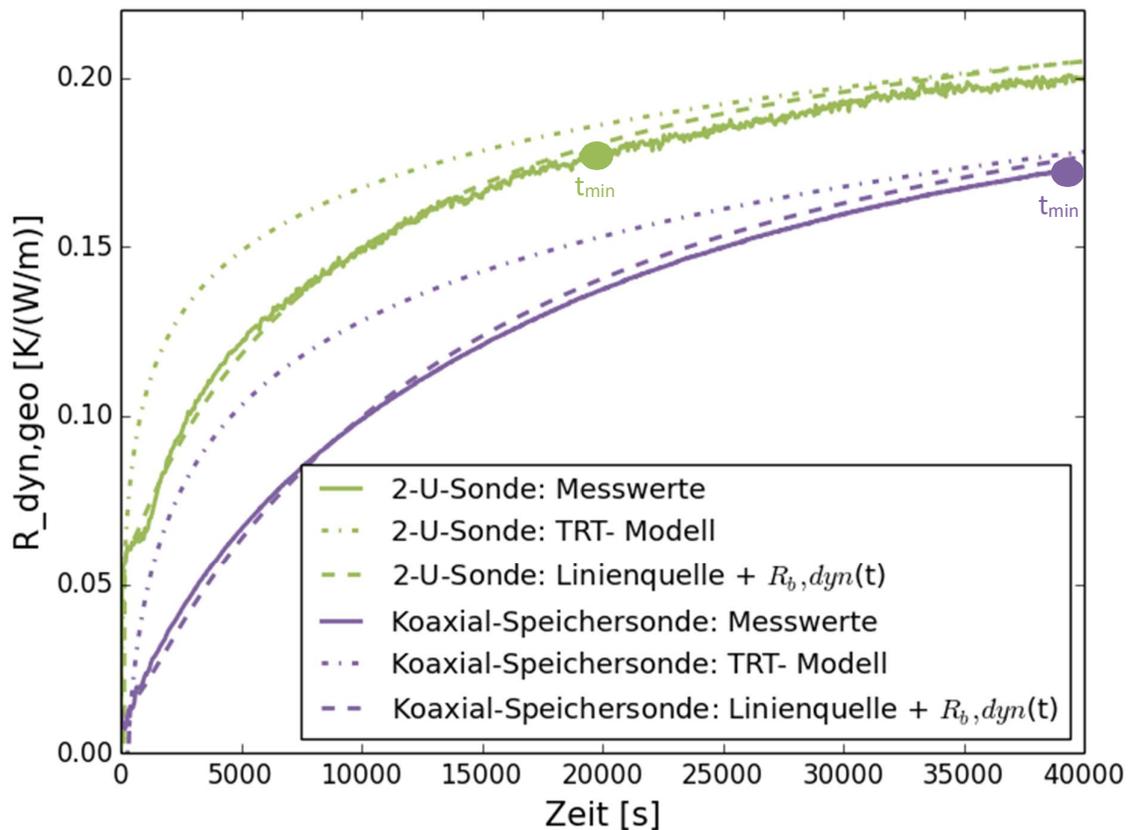


Abbildung 36: Halbempirischer Ansatz zur Berechnung des Anlaufverhaltens von EWS

2.4.9.3 AP 4 – Arbeitsschritt 4: Ungestörte Untergrundtemperatur als Auslegungsparameter

Die folgende Zusammenfassung der Ergebnisse zu diesem Teil-Arbeitspaket ist in Teilen der Veröffentlichung [Koenigsdorff, Köhler, Kopp, 2014] entnommen, ergänzt um weitere Ergebnisse aus der Zeit nach dieser Veröffentlichung.

Die ungestörte Untergrundtemperatur am Standort einer Erdwärmesonden-Anlage stellt den Startwert der dynamischen Temperaturentwicklung im Anlagenbetrieb dar. Hierfür liegen entweder Messwerte vor, z. B. aus einem Thermal Response Test, oder es muss auf die meteorologischen Daten des jeweiligen Standorts zurückgegriffen werden.

Die – zumindest in Standardfällen – am häufigsten verwendeten Auslegungswerkzeuge für Erdwärmesonden bilden den Untergrund vereinfacht als System mit konzentrierten Parametern ab. Das heißt, sie simulieren das zeitabhängige thermisch-energetische Verhalten von Erdwärmesonden(-feldern) ohne vertikale örtliche Auflösung, indem ausschließlich über die Bohrlochtiefe gemittelte Parameter, Temperaturen und Wärmeströme abgebildet werden. Liegen keine Messwerte der ungestörten Untergrundtemperatur vor, wird bei diesen Programmen, wie z. B. Earth Energy Designer (EED) [Hellström, Sanner, 2000] und GEO-HAND^{light} [Koenigsdorff et al., 2007], [Koenigsdorff, Kirschmann, 2007] die ungestörte mittlere Untergrundtemperatur $\bar{\mathcal{G}}_{E,0}$ aus der mittleren Erdoberflächentemperatur \mathcal{G}_m (Jahresmittelwert), der mittleren Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs λ_E , der

Bohrlochtiefe H und der terrestrischen Wärmestromdichte \dot{q}_{geo} am Standort mit Gleichung (18) ermittelt [Koenigsdorff, 2011b]:

$$\bar{\vartheta}_{E,0} \approx \vartheta_E(H/2) = \vartheta_m + \frac{H}{2} \cdot \frac{\dot{q}_{geo}}{\lambda_E} \quad (18)$$

Bei dynamischen Erdwärmesonden-Simulationsprogrammen, welche den Untergrund und die Sonden örtlich (vertikal) aufgelöst, d. h. als System mit verteilten Parametern, abbilden (z. B. EWS [Huber, 2009]), besteht über den o. g. Ansatz hinaus die Möglichkeit, mit einer dynamischen Anlaufrechnung ohne Sondenbetrieb eine örtlich und zeitlich eingeschwungene, ungestörte Temperaturverteilung im Boden mithilfe dynamischer Wetterdaten an der Erdoberfläche zu berechnen.

Unabhängig davon, ob eine stationäre, mittlere oder eine örtlich aufgelöste, dynamisch eingeschwungene ungestörte Untergrundtemperatur als Startwert für eine Auslegungssimulation verwendet wird, stellt sich die Frage nach dem Einfluss der angesetzten Werte auf das Ergebnis der Sondenauslegung. Bei einer solchen Auslegung einer Erdwärmesonden-Anlage wird die minimal bzw. maximal auftretende Fluidtemperatur in der Erdwärmesonden-Anlage berechnet bzw. die Sondenlänge so ermittelt, dass die minimal bzw. maximal zulässige Fluidtemperatur auf Dauer eingehalten wird. Für ein gegebenes, der Sondenanlage aufgeprägtes Lastprofil ist dabei in erster Näherung die maximale Differenz zwischen der Fluid-Mitteltemperatur und der ungestörten mittleren Bodentemperatur $\Delta \bar{\vartheta}_F^{\min/\max}$ näherungsweise proportional zur auf die Gesamtsondenlänge bezogenen Spitzenlast \hat{q}_{EWS} :

$$\Delta \bar{\vartheta}_F^{\min/\max} / \hat{q}_{EWS} \approx \text{konst.} \quad (19)$$

Tabelle 4 enthält typische Beispielwerte für Boden- und Auslegungstemperaturen für den Heizfall (Wärmeentzug) und den Kühlfall (Wärmeeintrag), aus denen der Einfluss der (tatsächlichen oder für die Auslegung angesetzten) ungestörten Untergrundtemperatur ablesbar ist. In den aufgeführten Beispielen führt eine um 1 K höhere mittlere Untergrundtemperatur zu Änderungen der maximal zulässigen Temperaturdifferenz $\Delta \bar{\vartheta}_F^{\min/\max}$ und damit näherungsweise der maximal möglichen Spitzenlast zwischen +7 % und -20 %. Der Einfluss des für die Auslegung angesetzten Wertes der ungestörten Untergrundtemperatur ist damit nicht vernachlässigbar. Er kann insbesondere im Kühlfall (Wärmeeintrag) sowie bei engeren Grenzen der zulässigen Auskühlung bei Wärmeentzug (Frostfreiheit) signifikant sein.

Tabelle 4: Typische mittlere Untergrundtemperaturen und Grenzen der Fluidtemperatur für oberflächen-

Ungestörte mittlere Untergrundtemperatur	Zulässige Fluid-Mitteltemperatur $\bar{g}_F^{\text{min/max}}$	Temperatur-differenz $\Delta \bar{g}_F^{\text{min/max}}$	Betriebsfall / %-Änderung v. $\Delta \bar{g}_F^{\text{min/max}}$
11 °C	-3 °C	-14 K	Wärmeentzug / +7 %
12 °C	-3 °C	-15 K	
11 °C	1 °C	-10 K	Wärmeentzug / + 10 %
12 °C	1 °C	-11 K	
11 °C	16 °C	+5 K	Wärmeeintrag / - 20 %
12 °C	16 °C	+ 4 K	

Eine vielfach genannte Empfehlung lautet, bei nicht bekannter Erdoberflächentemperatur den für den jeweiligen Standort geltenden Mittelwert der Außenlufttemperatur als Näherungswert heranzuziehen. Diese Näherung liegt offenbar auch den in EED hinterlegten Werten zugrunde, wie aus Tabelle 5 ersichtlich ist. Dort sind den in EED hinterlegten Werten auf Messungen beruhende Werte für Außenluft- und oberflächennahe Bodentemperaturen innerhalb der Klimaregion 13 in Deutschland (Referenzstation: Passau, wegen Auflösung dieser Station später Mühldorf/Inn [BBSR, 2011]), in welcher auch die Hochschule Biberach liegt, gegenübergestellt. Die Jahresmittelwerte der in Tabelle 5 aufgeführten oberflächennahen Bodentemperaturen liegen um etwa 1 - 2 °C höher als die zugehörigen Außenlufttemperaturen. Dies spiegelt die bekannte Tatsache wider, dass der Boden aufgrund von Witterungseinflüssen (Sonneneinstrahlung), geothermischem Wärmefluss von unten und ggf. Wärmeeintrag durch Bauwerke (die Bodenmesswerte der Hochschule Biberach werden wenige Meter von Gebäuden entfernt gemessen) gegenüber der Außenluft erwärmt wird.

Neben dem grundsätzlichen Vergleich von Boden- und Lufttemperaturen auf Basis von Literaturwerten und Messergebnissen Dritter war ein wesentlicher Inhalt dieses Teil-Arbeitspaketes, die z. T. langjährig erfassten Messwerte von Untergrundtemperaturen am Geothermiefeldes des Technikums Gebäudeklimatik (Gebäude G) der Hochschule Biberach zu prüfen, zu ergänzen und gesamtheitlich zusammenzufassen. Im Vorhaben wurde neben einer Erweiterung der Messstellen um bodennahe Messsonden auch eine durchgängige Nomenklatur zur Systematisierung eingeführt. In Abbildung 37 ist diese Nomenklatur dargestellt und der sich an einem Ort konzentrierende Hauptteil der Messstellen abgebildet. Diese umfassen sowohl permanente Messstellen der Bodentemperaturen an unterschiedlichen Stellen als auch Zugänglichkeiten für temporäre Messungen. Insgesamt wird ein Tiefenbereich von 0 bis 100 m unter GOK abgedeckt; die jüngsten Messreihen laufen seit ca. zwei Jahren, die ältesten seit über einem Jahrzehnt. Die Prüfung der Messwerte umfasste auch Untersuchungen zur Messgenauigkeit und Kalibrierung sowie zur Datenfilterung und Überlegungen zu Möglichkeiten, die Daten frei zu machen [Gutstein, 2015].

Tabelle 5: Jahresmittelwerte von Außenluft- und oberflächennahen Bodentemperaturen innerhalb der Klimazone 13 in Deutschland

“Ground surface temperature” aus EED [Hellström, Sanner, 2000]	Jahresmittelwerte Außenlufttemperatur verschiedener Wetterstationen		
München: 8,9 °C	Passau (1976 – 1990): 8,0 °C [DIN 4701, 2003]	-	Bad Schussenried (1980 - 2013): 8,4 °C [Roth, 2014]
Nürnberg: 8.8 °C	Passau / Mühl- dorf/Inn (1998 – 2007): 8,6 °C [BBSR, 2011], [DIN V 18599, 2011]	Biberach a. d. Riß (2013): 8,6 °C [Gerber, Bachseitz, 2014]	Bad Schussenried (2013): 8,5 °C [Roth, 2014]
Jahresmittelwerte oberflächennahe Bodentemperaturen verschiedener Wetter-/Mess-Stationen			
München: 8,9 °C	Passau (1976 – 1990): 0,05 – 1,0 m unter GOK: 9,7 – 9,8 °C [DIN 4701, 2003]	Biberach a. d. Riß (2013): 0,05 – 1,0 m unter GOK: 10,1 – 10,8 °C [Kopp, 2014]	Bad Schussenried (1980 - 2013): 0,1 – 1,0 m unter GOK: 9 – 10,8 °C [Roth, 2014]
Nürnberg: 8.8 °C			



Abbildung 37: Messstellen für Untergrundtemperaturen an der HBC (LET im Foto nicht abgebildet).

Abbildung 38 zeigt als Beispiel für die Messergebnisse den Vergleich von oberflächennahen Bodentemperaturen mit der Außenlufttemperatur an der Hochschule Biberach im Jahresverlauf. Es ist erkennbar, dass der gegenüber der Außenlufttemperatur höhere Jahresmittelwert der oberflächennahen Bodentemperatur vor allem aus den Wintermonaten resultiert, während in den Sommermonaten die Verhältnisse je nach Witterung und Bodentiefe unterschiedlich sind.

Diese Ergebnisse stimmen mit einschlägigen anderen Untersuchungen überein und finden sich auch in der DIN 4710 [DIN 4701, 2003]. Die Verwendung von Außenlufttemperaturen als Werte für die oberflächennahe Bodentemperatur ist demnach allenfalls eine Näherung, Jahresmittelwerte der oberflächennahen Bodentemperatur werden dabei systematisch unterschätzt: Die oberflächennahe Bodentemperatur liegt im Jahresmittel meist um 1 - 2 °C über der Außenlufttemperatur. Unter großen Städten und Ballungszentren ist sogar eine Erwärmung im Bereich von 2 - 5 °C festzustellen und Grundwassertemperaturen, die in Extremfällen 17 °C überschreiten können [Koenigsdorff, 2011b], [Zhu et al., 2010/2011]. Mehr zu den Untersuchungen des geothermischen Wärme- und Kälte-Speicherpotentials im urbanen Untergrund ist im Arbeitspaket 6 in Kapitel 2.6 beschrieben.

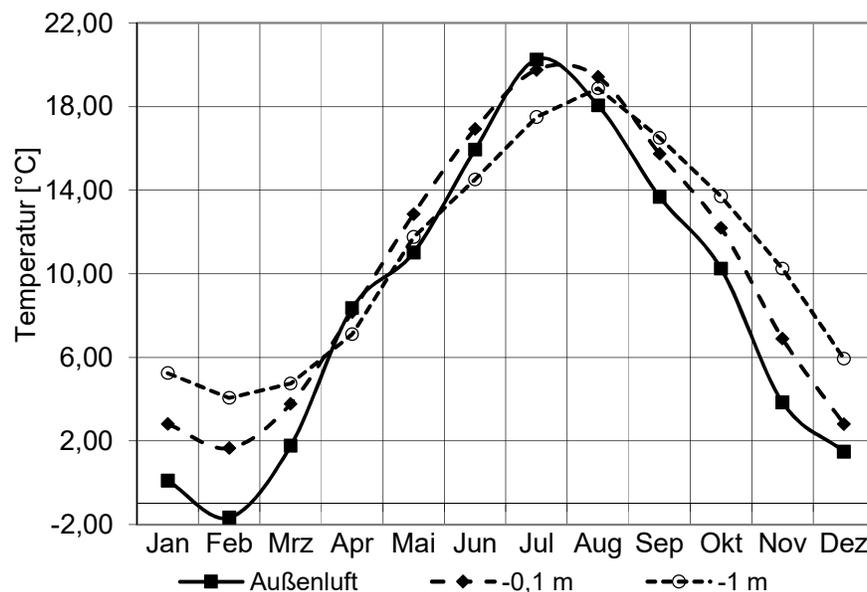


Abbildung 38: Messwerte (Monatsmittelwerte) oberflächennaher Bodentemperaturen (Tiefen: 0,1 m und 1,0 m unter GOK und der Außenlufttemperatur an der Hochschule Biberach im Jahr 2013, Messstelle MOS1 [Gerber, Bachseitz, 2014], [Kopp, 2014].

Werden an einer oder mehreren Erdwärmesonden einer Anlage Thermal Response Tests oder separate Temperaturmessungen im Bohrloch bzw. in den Sondenrohren vorgenommen, ist es sinnvoll für die Ermittlung der ungestörten Bodentemperaturen heranzuziehen. In der Regel wird dabei davon ausgegangen, dass unterhalb der neutralen Zone, also ab ca. 10 bis 20 m Tiefe, kein jahreszeitlicher Einfluss mehr vorliegt, d. h. die gemessene Bodentemperatur dort unabhängig vom Zeitpunkt der Messung ist und direkt als Jahresmittelwert für entsprechende Auslegungsberechnungen und Simulationen herangezogen werden kann. Oberhalb der neutralen Zone sind dagegen der jahreszeitliche Einfluss und damit der Zeitpunkt der Messung bedeutsam.

Insbesondere bei stark ausgeprägten oberflächennahen Grundwasserleitern kann der saisonale Einfluss jedoch auch bis in noch größere Tiefen deutlich spürbar sein, wie Abbildung 39 am Beispiel der 23 m tiefen Versuchssonde an der Hochschule Biberach zeigt. Dort weist die Untergrundtemperatur bis in 23 m Tiefe, d. h. bis auf den Grund des obersten, stark durchströmten Grundwasserleiters, eine deutliche saisonale Schwankung auf. Mit einer Schwankungsbreite von ca. 1,6 K ($\pm 0,8$ K) ist die neutrale Zone (gekennzeichnet durch eine Schwankungsbreite von nicht mehr als $\pm 0,1$ K [VDI 4640, 2010]) in dieser Tiefe noch nicht erreicht. Die zeitweilige Überhitzung in 1 m Tiefe in Abbildung 39 ist auf eine zu hoch eingestellte Begleitheizung zurückzuführen.

Darüber hinaus fällt auf, dass die in Abbildung 39 dargestellten Messwerte im zeitlichen Mittel bei ca. 12 °C liegen und damit höher liegen als die ca. 20 m entfernt gemessenen Bodentemperaturen (Jahresmittelwert 2013: 10,8 °C, siehe Tabelle 4 und Abbildung 38). Ein Gesamtbild gemessener Jahresmittelwerte der Untergrundtemperatur am Geothermiefeld der HBC gibt Abbildung 40 wieder. Die Heterogenität der Jahresmittelwerte von Temperaturen in derselben Tiefe lässt sich zum Teil auf Einflüsse durch die Gebäude am Standort zurückführen. Dass unter dem Gebäude Technikum G (Bodenabsorber) die höchsten bodennahen Temperaturen auftreten, ist zu erwarten. Die weiteren Unterschiede zwischen den bodennahen Temperaturwerten sind zum Teil ebenfalls durch bauliche Einflüsse und ggf. Grundwasserfluss erklärbar. Es werden jedoch auch Messfehler vermutet, da sich die Temperaturfühler an den Messstellen HBC-LET1 und HBC-EWS3 seit über 10 Jahren vor Ort befinden. Da diese nicht zugänglich sind, konnten die Messwerte bislang nicht validiert werden. Zwischenzeitlich wurde jedoch die Sonde HBC-EWS1 am Kopf zugänglich gemacht, sodass künftig mit einem kalibrierten Absenkfühler in den Sondenrohren Kontrollmessungen durchführbar sind.

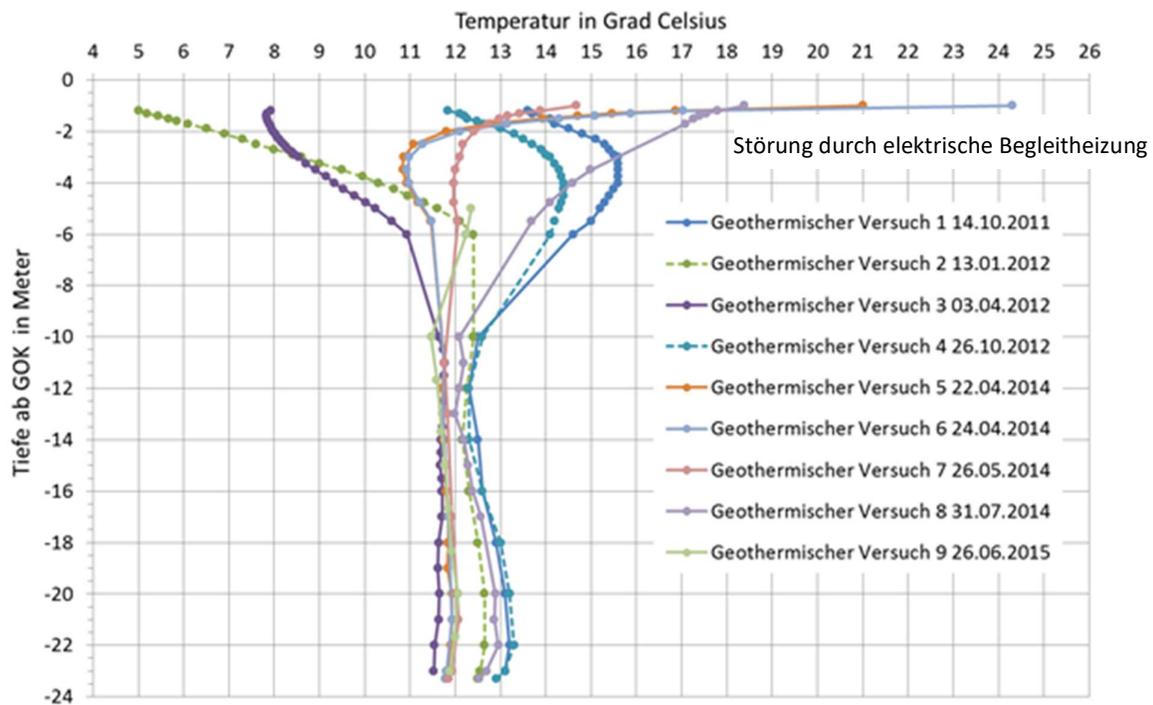


Abbildung 39: Mit einem Absenkfühler gemessene Temperaturprofile in der 23 m tiefen Erdwärmesonde der Hochschule Biberach (HBC-EWS3) [Gutstein, 2015].

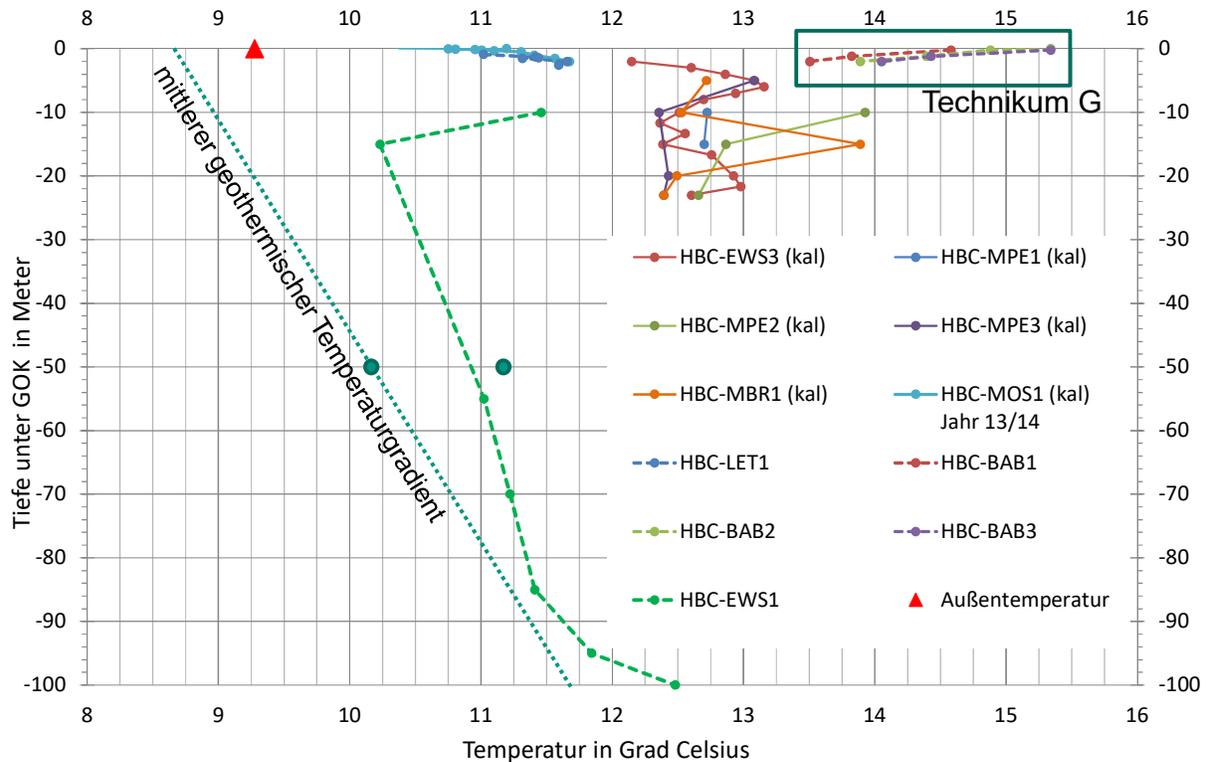


Abbildung 40: Zusammenstellung von Jahresmittelwerten der Boden- und Untergrundtemperaturen am Geothermtestfeld der HBC, nach [Gutstein, 2015] mit Ergänzungen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zur ungestörten Untergrundtemperatur lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Abweichung des Jahresmittelwerts der Außentemperatur von der Bodenoberflächentemperatur hat in vielen Fällen einen signifikanten Einfluss auf die Sondenauslegung, sodass möglichst genaue Werte der Bodenoberflächentemperatur als Eingangsparameter für Auslegungsmodelle und Auslegungsberechnungen verwendet werden sollten.
- Fehlen Messwerte der Untergrundtemperatur, sollte für eine erste Näherung der Jahresmittelwert der Außenlufttemperatur (und damit z. B. die in EED hinterlegten Werte) mit einer Anhebung um zumindest +1 K verwendet werden.
- Sind valide Messwerte der Untergrundtemperatur über den relevanten Tiefenbereich vorhanden, z. B. aus einem Thermal Response Test, sind diese vorzuziehen.
- Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Bodentemperatur nahe der Erdoberfläche saisonalen Schwankungen unterworfen ist, die u. U. auch in Tiefen bis unterhalb 20 m reichen können, was bei der Ermittlung des Jahresmittelwerts der ungestörten Bodentemperatur aus Messwerten zu berücksichtigen ist. Vor allem bei kürzeren Erdwärmesonden kann der Einfluss signifikant sein. Bei sehr kurzen Sonden ist deshalb der Einsatz von Simulationsmodellen, welche die Sonde tiefenabhängig abbilden, dem Einsatz von Modellen mit konzentrierten Parametern vorzuziehen.

2.4.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und

Branchen

Der Ergebnis- und Forschungstransfer erfolgt auf vier Wegen:

- Allgemeiner Ergebnistransfer in die Fachöffentlichkeit: Kongress- bzw. Tagungsvorträge und Fachveröffentlichungen (siehe folgender Abschnitt „Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse“).
- Wissenstransfer an Studierende in der Hochschule Biberach: Die Projektergebnisse fließen ein in Vorlesungen (Bachelor-Studiengang Energiesysteme: Pflichtfach „Grundlagen der Geothermie“, Master-Studiengang Energie- und Gebäudesysteme: Wahlfach „Geothermische Systeme“) sowie in studentische Arbeiten (Projekt- und Abschlussarbeiten), wobei in letzteren auch eine Weiterentwicklung der Projektergebnisse erfolgt.
- Software: Der entwickelte Programm-Prototyp zur Umrechnung von Bohrlochwiderständen wird derzeit von ausgewählten Testnutzern erprobt und soll auf Basis von deren Rückmeldungen und Erfahrungen zur Verbreitungsreife gebracht werden. Im nächsten Schritt sollen dieses Programm-Modul sowie die entwickelten Ansätze zum Kurzzeitverhalten von Erdwärmesonden in die Auslegungsprogramme für Erdwärmesonden der Hochschule Biberach (GEOSYST+, GEO-HAND^{light}) implementiert und zur Distribution an alle Interessierten vorbereitet werden.
- Schließlich ist vorgesehen, die Projektergebnisse und die darauf aufbauenden Software-Werkzeuge in Planerseminaren und Sachverständigenschulungen zu vermitteln.

2.4.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Neben den beiden online veröffentlichten Zwischenberichten und den zugehörigen Vorträgen bei den BWPLUS-Statuskolloquien Umweltforschung Baden-Württemberg 2015 und 2016 erfolgte die Verbreitung und Veröffentlichung der Ergebnisse wie folgt:

- Vortrag (Köhler, 2.7.2014) und Veröffentlichung [Koenigsdorff, Köhler, Kopp, 2014] beim 13. Internationalen Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie vom 1. - 2. Juli 2014 in Neu- markt i. d. Opf. (Veranstalter: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg); Titel: *Ungestörte Bodentemperatur als Planungsparameter für Erdwärmesonden- anlagen*.
- Vortrag (Koenigsdorff, Ko-Autor: Feuerstein) auf der GeoTHERM expo & congress am 05.03.2015 in Offenburg; Titel: *Anwendung von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Pa- rametern in Auslegungsberechnungen und deren Schnittstelle an die Gebäudetechnik*. Prä- sentation als Download für die Teilnehmer verfügbar.
- Übersichtsvortrag über aktuelle FuE-Projekte inkl. des Vorhabens „Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden“ (Koenigsdorff, 26.11.2015) beim 12. Biberacher Geothermietag; Titel: *Ak- tuelle Arbeiten zur Geothermie am Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)*.
- Vorträge beim 15. Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie vom 18. - 19. April 2016 im Kloster Banz, Bad Staffelstein (Veranstalter: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg):
 - Koenigsdorff, 18.4.2016; Titel: *Übertragung von Ergebnissen von Thermal Response Tests auf die späteren Betriebsbedingungen*.

- Koenigsdorff, Ko-Autorin: Van de Ven, 19.4.2016; Titel: GEO-HAND^{light} V3: *Neue Programmversion und Modellerweiterung zur Auslegung von Erdwärmesonden*.
- Präsentationen und Manuskript als Download für die Teilnehmer verfügbar.

Darüber hinaus ist geplant, die Inhalte der Vorträge beim OTTI-Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 2016 in einer Fachzeitschrift zu veröffentlichen.

2.4.12 Literatur

- [Bauer, 2011] Bauer, D.: *Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern*. Dissertation, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, 2011
- [BBSR, 2011] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): *Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse*. Offenbach, 2011 (www.bbsr.bund.de)
- [Claesson, Hellström, 2001] Claesson, J.; Hellström, G.: *Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger*. HVAC&R Research, 17(6), 2001, S. 895-911
- [DIN 4710, 2003] DIN 4710:2003-01: *Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland*. Berlin: Beuth Verlag
- [DIN V 18599, 2011] DIN V 18599-10:2011-12: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag
- [Döbele, 2015] Döbele, M.: *Analyse und Umrechnung von Bohrlochwiderständen bei Erdwärmesonden*. Master-Thesis im Studiengang Gebäudeklimatik, Hochschule Biberach, 2015
- [Gerber, Bachseitz, 2014] Gerber, A.; Bachseitz, M.: *Wetterstation des Labors für Tageslichttechnik und Solare Systeme im Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE) der Hochschule Biberach*. Biberach, 2014
- [Gutstein, 2015] Gutstein, K.: *Aufbereitung, Analyse und Validierung von gemessenen Untergrundtemperaturen*. Projektarbeit im Master-Studiengang Energie- und Gebäudesysteme, Hochschule Biberach, 2015.
- [Hellström, Sanner, 2000] Hellström, G.; Sanner, B.: *EED Earth Energy Designer; User Manual; Version 2.0*. Lund & Lahnau, Oktober 2000
- [Huber, 2009] Huber, A.: *Benutzerhandbuch zum Programm EWS Version 4.0: Berechnung von Erdwärmesonden*. Zürich: Huber Energietechnik AG, April 2009 (www.hetag.ch, [Bed_EWS40.pdf](#))
- [Koenigsdorff et al., 2007] Koenigsdorff, R.; Köhler, A.; Kirschmann, Chr.: *GEO-HAND^{light} - Handrechenverfahren zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern*. 7. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 25./26. April 2007, Freising. Regensburg: OTTI, 2007, S.97-101

- [Koenigsdorff, Kirschmann, 2007] Koenigsdorff, R.; Kirschmann, Chr.: *Erweiterung des Handrechenverfahrens GEO-HAND^{light} zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern zur kombinierten Heizung und Kühlung*. Energie für alle Fälle: Der Geothermiekongress 2007, 29.-31. Oktober 2007, Bochum. Geeste: Geothermische Vereinigung, 2007, S.72-84
- [Koenigsdorff, 2011a] Koenigsdorff, R.: *Bohrlochwiderstand: Ist der TRT-Messwert auch der Planungswert?* Tagungsband 11. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 27.-28. September 2011, Regensburg, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, S. 83-90
- [Koenigsdorff, 2011b] Koenigsdorff, R.: *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude – Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2011
- [Koenigsdorff, Feuerstein, 2012] Koenigsdorff, R.; Feuerstein, Ph.: *Korrekturer Umgang mit Messwerten des Bohrlochwiderstands aus Thermal-Response-Tests*. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie 2012, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, S. 12-17
- [Koenigsdorff et al., 2012] Koenigsdorff, R.; Feuerstein, Ph., Köhler, A. - In: *Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren*. Abschlussbericht, Garching b. München, Mai 2012, Hrsg.: ZAE Bayern, DOI: 10.2314/GBV:741303434, www.tib.eu
- [Koenigsdorff, Köhler, Kopp, 2014] Koenigsdorff, R.; Köhler, A.; Kopp, D.: *Ungestörte Bodentemperatur als Planungsparameter für Erdwärmesondenanlagen*. Tagungsband 13. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 1.-2. Juli 2014, Neumarkt i. d. Opf., Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, S. 156-163
- [Koenigsdorff, Feuerstein, 2015] Koenigsdorff, R.; Feuerstein, Ph. - In: *Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden: Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulationsprogrammen*. Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums Umweltforschung Baden-Württemberg 2015, Haus der Wirtschaft, Karlsruhe, 25.-26.2.2015, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>
- [Kölbel, 2010] Kölbel, T.: *Grundwassereinfluss auf Erdwärmesonden: Geländeuntersuchungen und Modellrechnungen*. Dissertation, Fakultät für Bau-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie KIT, 2010
- [Kopp, 2014] Kopp, Daniel: *Ungestörte Bodentemperaturen als Planungsparameter für Erdwärmesonden-Anlagen*. Projektarbeit im Master-Studiengang, Hochschule Biberach, 2014
- [Kübert, 2013] Kübert, M.: *Volumen statt Tiefe – Funktion, Anwendungsgebiete und Potenzial von Speichersonden*. Tagungsband 12. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 19.-20. März 2013, Neumarkt i. d. Opf., Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, S. 84-91
- [Roth, 2014] Roth, R. et al.: *Wetterwarte Süd*. Bad Schussenried, 2014 (www.wetterwarte-sued.com)
- [Sanner et al., 1999] Sanner, B.; Reuß, M.; Mands, E.: *Thermal Response Test – eine Methode zur*

in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. Geothermische Energie, Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e. V. Nr. 24/25, 7. Jahrgang / Heft 1/2, S.29-33, Geeste, 1999

[VDI 4640, 2010] VDI 4640-1: *Thermische Nutzung des Untergrunds – Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.* Juni 2010, Berlin: Beuth Verlag

[Wagner, Blum et al., 2013] Wagner, V.; Blum, Ph., Kübert, M.; Bayer, P.: *Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers.* Geothermics 46 (2013), S. 22– 31

[Zhu et al., 2010/2011] Zhu, K.; Blum, Ph.; Ferguson, G.; Balke, K.-D.; Bayer, P.: *The geothermal potential of urban heat islands.* Environ. Res. Lett. 5 (2010) & 6 (2011) (doi:10.1088/1748-9326/5/4/044002 & doi:10.1088/1748-9326/6/1/019501)

2.5 Definition des Nahbereichs von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - VEGAS, Jürgen Braun, Ph.D., Dipl.-Ing. Simon Kleinknecht)

2.5.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein großskaliger Technikumsversuch aufgebaut, um die Temperatúrausbreitung im Nahfeld und in der Hinterfüllung einer Erdwärmesonde (EWS) bei realistischen und definierten Randbedingungen zu untersuchen. Um dies zu ermöglichen wurde eine spezielle EWS konfektioniert, die mit 32 Pt100-Temperaturfühlern und einem DTS-Kabel als Doppel-U-Schleife instrumentiert, im Versuchsstand des „EWS-tech“-Forschungsvorhabens verpresst und anschließend im Großbehälter von VEGAS installiert wurde. Zusätzlich wurde das bestehende Temperaturmessfeld des Großbehälters im Nahfeld der Sonde stark verdichtet um eine hochaufgelöste Temperaturmessung zu gewährleisten. Der Betrieb der EWS mit einem Thermostat, die einstellbare Grundströmung im Großbehälter, sowie die Möglichkeit der Kühlung des Grundwasserzulaufs (ca. 15 °C) ermöglichen eine vielseitige Anwendung.

Die Ergebnisse der Enhanced Geothermal Response Tests (ERGT), bei der Wärme über das DTS-Kabel in den Untergrund eingebracht wurde, zeigten bei einer Grundströmung von $v_a = 0,61$ m/Tag niedrigere Temperaturen, ein schnelleres Erreichen des stationären Zustands und eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 1,5 verglichen mit statischem Grundwasser. In weiteren Versuchen wurde die Temperatúrausbreitung bei zwei realistischen Lastfällen, kontinuierlicher und intermittierender (6-Stunden-Rhythmus) Wärmeentzug, untersucht. Dabei wurde die Temperatur des Fluids am Sondeneinlauf konstant auf 0°C gehalten und die Sonde bei turbulenten Bedingungen durchströmt. Für eine konservative Betrachtung wurden die Versuche ohne Grundströmung durchgeführt. Die Temperaturmessung zeigte, dass die minimale Temperatur in der Hinterfüllung der Sonde (zwischen den Sondenrohren) bei kontinuierlichem Wärmeentzug nur unbedeutend geringer als bei intermittierendem Betrieb (sechs Stunden Entzug gefolgt von sechs Stunden Regeneration) war. Bei stationärem Grundwasser war innerhalb der Hinterfüllung ein Temperaturgradient von bis zu 0,4 K/cm messbar, gleichzeitig war die Temperatúrausbreitung im Erdreich (Nahfeld der Sonde) signifikant größer als bei diskontinuierlichem Wärmeentzug. Diese Erkenntnisse sind besonders im Hinblick auf eine mögliche Durchfrostung der EWS, bedingt durch falschen Betrieb oder Unterdimensionierung des Systems, und damit eine Gefährdung der Standsicherheit von großer Bedeutung und müssen in weiteren Forschungsvorhaben vertieft untersucht werden.

2.5.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Eine wichtige Erkenntnis aus dem vorangegangenen Projekt geomatrix.bw [Bisch, Klaas, 2014] ist, dass bei bisherigen Abschätzungen und Modellrechnungen die Länge der resultierenden Temperaturfahne z. T. erheblich überschätzt wurde, da die konduktive Komponente des Wärmetransports in der Realität deutlich größer sein kann. Basierend auf diesen Erkenntnissen ergibt sich ein deutlicher Forschungsbedarf bezüglich einer detaillierten Charakterisierung der Temperatúrausbreitung (Wechselwirkung zwischen konduktivem und konvektivem Wärmetransport) im Nahbereich von EWS.

Die geplanten Untersuchungen sollten als fundierte Grundlage dazu dienen, den Nahbereich von EWS gezielt vom Aquifer abgrenzen zu können und eine entsprechende Entscheidungshilfe für den

effizienten Einsatz von EWS zur Kühlung unter Einhaltung der vorgegebenen Temperaturgrenzwerte innerhalb des Aquifers zu erarbeiten. Des Weiteren sollte das Verhalten der EWS und insbesondere der verwendeten Hinterfüllungsmaterialien bei den erhöhten Belastungen durch höhere Einspeisetemperaturen und größere Temperaturschwankungen untersucht werden

2.5.3 Aufgabenstellung

Ziel des Arbeitspakets von VEGAS (Universität Stuttgart) war die detaillierte Untersuchung des Nahbereichs von Erdwärmesonden (EWS), die zu Einspeisung/ Entzug von Wärme in/aus dem Untergrund verwendet werden. Insbesondere die Temperatureinflüsse der EWS auf diesen Bereich und die Wechselwirkung mit dem Aquifer sollten in einem großskaligen Experiment untersucht werden.

2.5.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt baute auf dem experimentellen Aufbau und den wissenschaftlichen Erkenntnissen des Projekts geomatrix.bw [Bisch, Klaas, 2014] auf. Im Rahmen des Projekts geomatrix.bw wurde ein numerisches Modell (KIT) zur Simulation des Wärmetransports während eines EWS-Betriebs mit Hilfe des Großbehälterversuchs kalibriert. Bisher war die Berechnung zum Wärmeausbreitungsprozess im Untergrund zu sehr durch advektiven Transport dominiert. Die Reichweiten der Wärmefahnen wurden deutlich überschätzt. Im Rahmen des Vorhabens geomatrix.bw wurden numerische Modelle bei den Partnern der Teilprojekte entwickelt, die auch den konvektiven Wärmetransport berücksichtigen. Durch im VEGAS-Behälter durchgeführte Experimente konnten diese neu entwickelten Modelle kalibriert und verifiziert werden. Die Ergebnisse aus dem Großversuch zeigten, dass die Temperaturentbreitung von den numerischen Modellen deutlich überschätzt wird und der konduktive Wärmetransport in der Realität deutlich größer ausfallen kann. Diese Erkenntnisse zeigten, dass für die Temperaturentbreitung im Nahbereich einer Erdwärmesonde noch erheblicher Forschungsbedarf besteht und daran wissenschaftlich angeknüpft werden muss.

2.5.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannte Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger (VEGAS) sind keine Forschungsvorhaben bei anderen Stellen für die Charakterisierung der Temperaturentbreitung innerhalb und im Nahfeld einer EWS unter kontrollierten und realistischen Randbedingungen bekannt. Dies ist vor allem bedingt durch die Einzigartigkeit der großskaligen Technikumsversuche die nur bei VEGAS möglich sind.

2.5.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

Ziel des Arbeitspakets war der Aufbau und die Durchführung eines Geothermiexperimentes zur Charakterisierung der Wärmeausbreitung innerhalb und im Nahbereich einer Erdwärmesonde (EWS). Um dies zu realisieren wurde eine instrumentierte EWS entworfen, konfektioniert und im VEGAS-Großbehälter in den bestehenden Aufbau aus dem Projekt geomatrix.bw eingebaut. Die neue, 4,5 m lange EWS ist als Doppel-U-Ausführung aus dem temperaturbeständigeren Material Pe-Xa aufgebaut. Die EWS wurde auf vier Ebenen mit jeweils 8 Pt100-Temperaturfühlern versehen, sodass in jeder Aquiferschicht mit unterschiedlicher Durchlässigkeit jeweils eine Messebene liegt (Abbildung 44). Dabei wurden 16 Fühler innerhalb des Hinterfüllmaterials und 16 Fühler am Rand (zwischen

Hinterfüllmaterial und Aquifer) installiert um die Temperaturobreitung innerhalb der Hinterfüllung zu beobachten. Abbildung 41, rechts, zeigt den Querschnitt einer Temperaturmessenebene der EWS. Als blaue Kreise dargestellt sind die Pt100-Temperaturfühler. Zusätzlich wurde ein DTS-Kabel (Distributed Temperature Sensing) als Doppel-Loop innerhalb der Sonde entlang eines U-Rohrs sowie direkt außerhalb der Hinterfüllung angebracht. Das DTS-Kabel erlaubt neben der vertikal hochaufgelösten Temperaturmessung durch Glasfasertechnik auch die Durchführung eines Enhanced Geothermal Response Test (ERGT) mittels dem im Kabel integrierten Heizdraht.

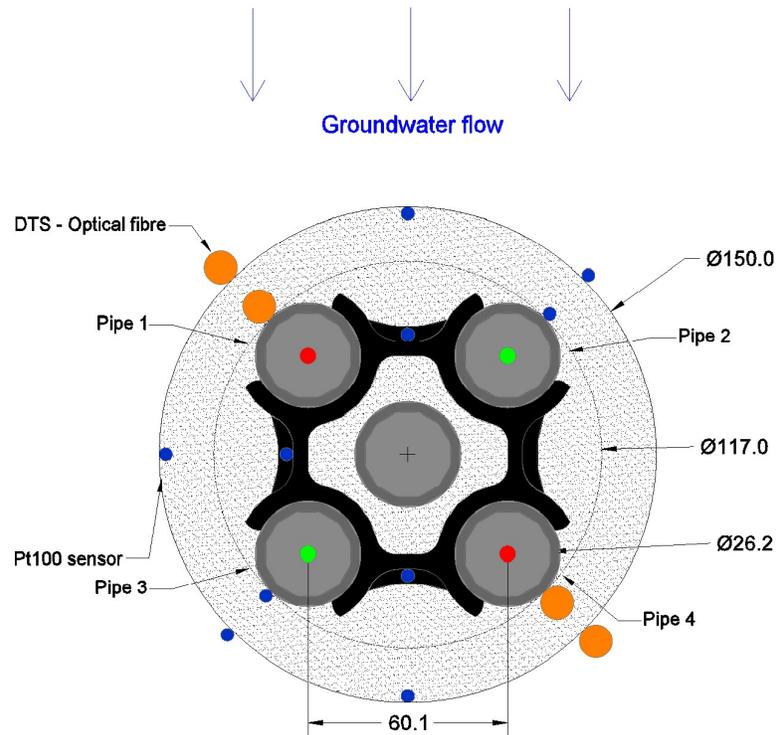


Abbildung 41: Konzeptioneller Querschnitt der EWS

Die instrumentierte, vorgefertigte EWS (Sondenrohre und innere Pt100-Temperaturfühler) wurde in ein PVC-Hüllrohr (ID = 15 cm) gestellt und am „EWS-tech“-Versuchsstand [Riegger et al, 2015] mit dem Füllbinder Schwenk EWM-Plus verpresst. Die Wärmeleitfähigkeit des Füllbinders während des Anmischvorgangs wurde im Labor des KIT-AGW auf $1,75 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ bestimmt. Nach Aushärtung wurde die Sonde zu VEGAS in Stuttgart transportiert, dort die Verschalung der Sonde entfernt (Abbildung 42) und die äußere Messtechnik angebracht. Die Sonde wurde an der in Abbildung 43 gezeigten Position in den VEGAS-Großbehälter in ein vorbereitetes Bohrloch eingebaut. Die Messtechnik (Pt100) der Sonde wurde an eine neu aufgesetzte CAN-Bus-Messdatenerfassung angeschlossen. Das DTS-Kabel wurde vom KIT-AGW und EIFER mittels eines Spezialgeräts mit einer zweiten Datenerfassung verbunden. Für die Durchführung des ERGT werden zwei Netzteile für die Spannungsversorgung des Heizdrahts bereitgestellt.



Abbildung 42: Verpresste und instrumentierte EWS vor Einbau in den Großbehälter

Die Charakterisierung der Temperaturentbreitung im Nahfeld der EWS wurde durch Temperaturfühler ermöglicht. Zusätzlich zu den bereits vorhandenen Temperaturmesslotrechten (blau dargestellt in Abbildung 41) wurde das Nahfeld der EWS im Abstand von 70 und 30 cm oberstrom und seitlich, sowie 30, 70, 100 und 130 cm unterstrom der Sonde mit weiteren Lotrechten (grün dargestellt) verdichtet. Die feine Auflösung der Messlotrechten wurde durch Zusatzfinanzierung über das parallel laufende Projekt „Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potentielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde“ (L7514011) ermöglicht. Die Messlotrechten wurden, wie die bereits bestehenden, mit jeweils zwei Pt100-Temperaturfühler pro Aquifer-Schicht versehen. Damit wurde eine detaillierte Charakterisierung der Temperaturentbreitung im Nahfeld der EWS ermöglicht. Die Positionen der Temperaturfühler im Großbehälter können Abbildung 43 und Abbildung 44 entnommen werden.

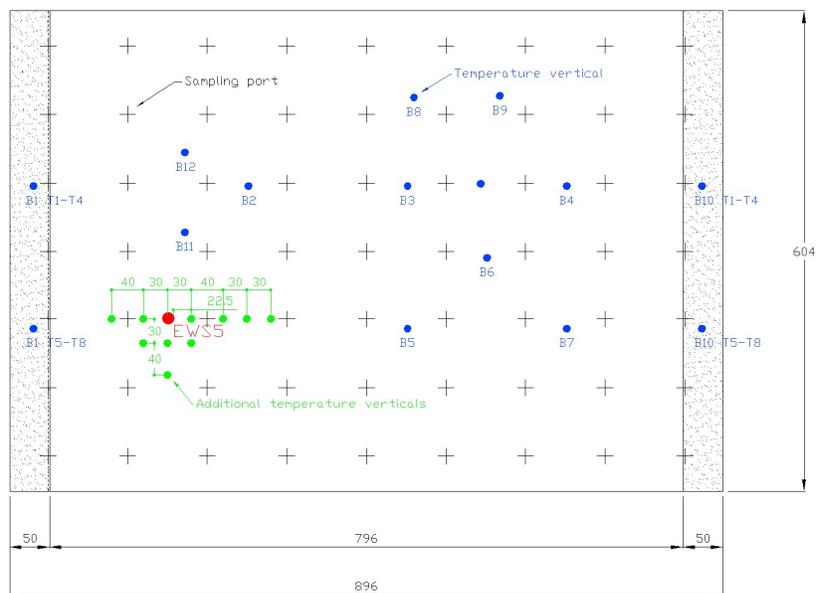


Abbildung 43: Draufsicht auf den Großbehälters mit Position der eingebauten EWS und Temperaturfühler

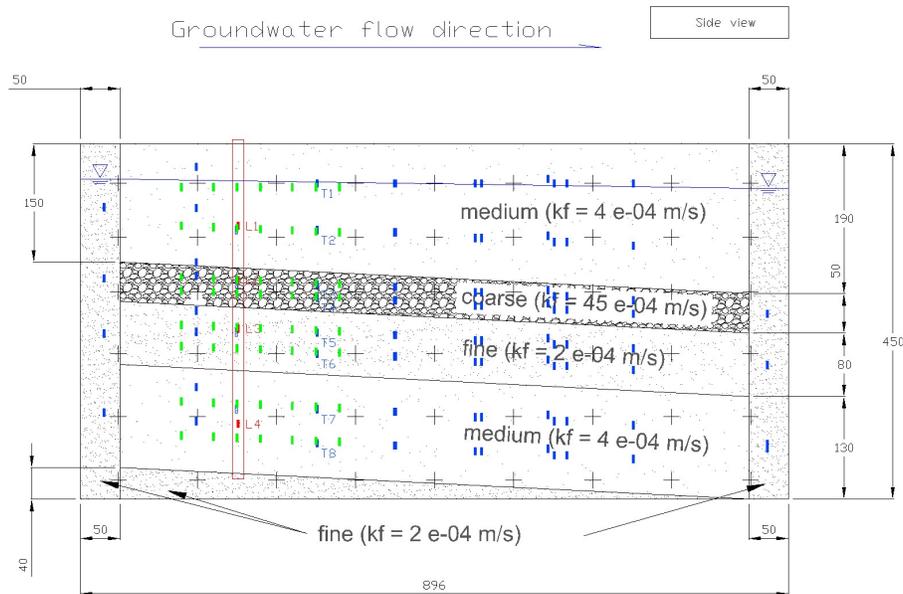


Abbildung 44: Seitenansicht des Großbehälters mit Position der eingebauten EWS und Temperaturfühler

2.5.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt war durch eine enge Zusammenarbeit mit dem KIT-AGW, EIFER und Solites ausgezeichnet. Neben planerischen Projektbesprechungen für fachlichen Austausch waren der experimentelle Aufbau und die Durchführung der Versuche nur durch diese Kooperation möglich.

Die instrumentierte, vorgefertigte EWS wurde am „EWS-tech“-Versuchsstand am KIT-AGW (H. Steger) zusammen mit Solites (J. Rolker, M. Riegger) verpresst. Zusätzlich wurde vom KIT-AGW/EIFER (H. Steger/R. Zorn) ein DTS-Kabel (Distributed Temperature Sensing) innerhalb der Sonde angebracht. Die dazugehörige Messtechnik wurde durch EIFER (R. Zorn) bereitgestellt. Die Sondenrohre „RAUGEO sonde PE-Xa“ wurden durch die Firma Rehau AG + Co bereitgestellt und vor Ort konfektioniert. Das Hinterfüllmaterial EWM-Plus, ein Material das dem neuesten Stand der Technik und Qualitätsansprüche entspricht, wurde von der Firma Schwenk Zement KG für das Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials wurde im Labor des KIT-AGW von H. Steger experimentell bestimmt.

2.5.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war es möglich, eine instrumentierte Erdwärmesonde in einem großskaligen Technikumsversuch zu installieren. Durch die angebrachten Temperaturfühler kann die Temperaturentbreitung, nicht nur im Nahfeld einer Erdwärmesonde, sondern zusätzlich innerhalb der Hinterfüllung einer EWS in einem realitätsnahen Umfeld beobachtet werden. Der Versuchsaufbau steht für weitere Forschungsvorhaben zur Verfügung und wird unter anderem für das Projekt L7514011 „Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potenzielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde“ verwendet. Die ermittelten Daten aus den ERGT/TRT und den Lastfällen stehen für die Entwicklung und Kalibrierung von Dimensionierungstools und numerischen Modellen zur Verfügung.

2.5.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

Zwei EGRT/TRT und zwei Versuche wurden basierend auf aussagekräftigen Lastfällen in Anlehnung an realistische Betriebsszenarien durchgeführt. TRT1 wurde ohne Grundströmung und TRT2 mit Grundströmung (mittlere Abstandsgeschwindigkeit $v_a = 0,61$ m/Tag) durchgeführt, um deren Einfluss auf die Temperaturentbreitung bzw. Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen. In Abbildung 45 ist die Temperaturentbreitung auf einer Messebene an zwei Punkten innerhalb der Sonde dargestellt. Die Heizphase des TRT1 ohne Grundströmung dauerte 13 Tage an. Für den TRT mit Grundströmung passt sich das Temperaturniveau deutlich schneller dem Ausgangsniveau an, was wohl dem durch die Grundströmung erhöhten Wärmeübergang geschuldet ist. Aufgrund einer räumlich gemittelten Temperaturentauflösung von 50 cm entlang des DTS-Kabels konnte lediglich eine gemittelte Wärmeleitfähigkeit für die unteren drei Schichten ermittelt werden. Aus den TRTs wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 3,4 W/mK ohne Grundströmung und 4,8 W/mK mit Grundströmung bestimmt. Die absoluten Werte können jedoch nur als Richtwerte betrachtet werden, da eine Auswertung mit der klassischen Linienquellentheorie durch den Eintrag der Energie mittels DTS-Kabel in der Doppel-U-Anordnung nur eingeschränkt gültig ist. Die Ergebnisse zeigen jedoch eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch die Grundströmung um den Faktor 1,5 gegenüber dem TRT ohne Grundströmung.

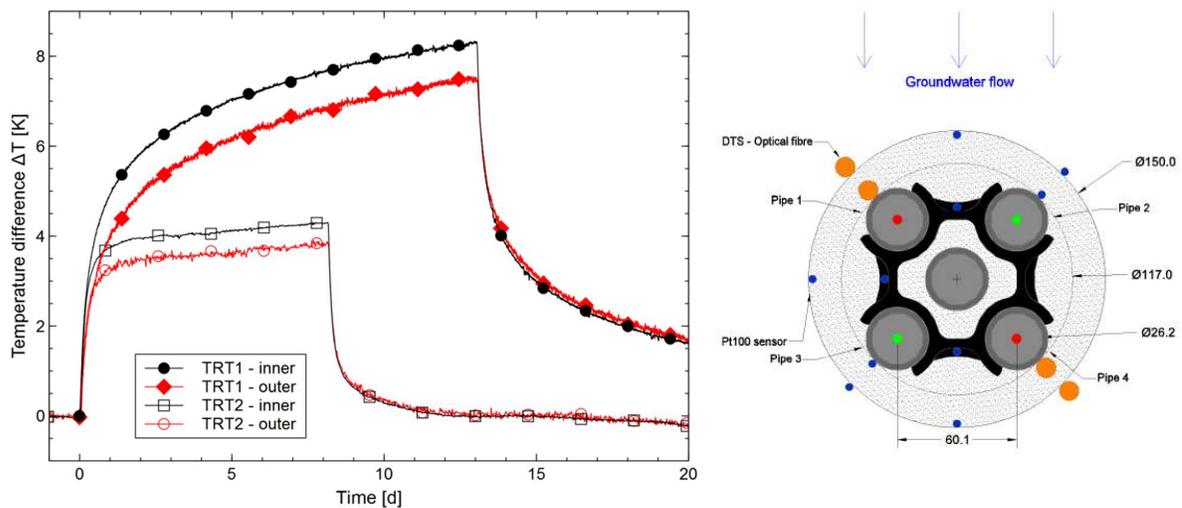


Abbildung 45 : Temperaturentbreitung innerhalb Sonde während ERGT

Im Anschluss an die TRTs wurden zwei Versuche zu den definierten Lastfällen durchgeführt. Dabei wurde der Großbehälter mittels Grundströmung auf ungefähr 14 bis 16°C gekühlt und diese 12 Stunden vor Versuchsbeginn abgeschaltet. Die Versuche wurden für eine konservative Betrachtung ohne Grundströmung durchgeführt. In Versuch 1 (V1) wurde die Sonde kontinuierlich mit 0°C Einlasstemperatur bis zum Erreichen eines stationären Zustands betrieben. Im Versuch 2 (V2) wurde die Sonde bei gleichen Randbedingungen im intermittierenden Betrieb (sechs Stunden Wärmeentzug gefolgt von sechs Stunden Regeneration) gefahren. Der Durchfluss in der Sonde wurde so gewählt, dass annähernd turbulente Verhältnisse herrschten. Abbildung 46 zeigt vergleichend den Temperaturverlauf ausgewählter Messstellen innerhalb der Hinterfüllung.

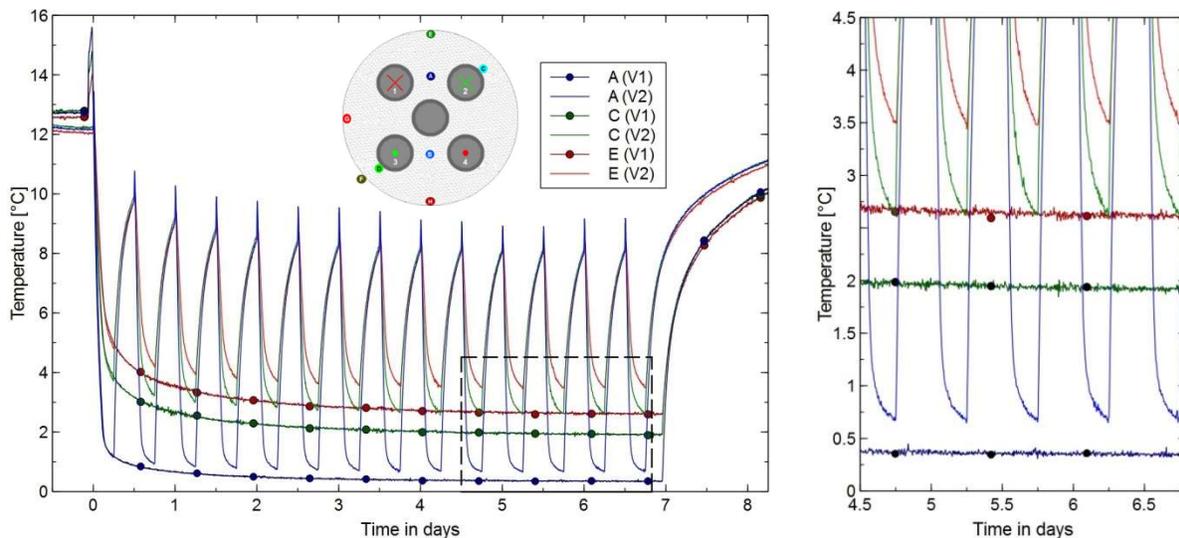


Abbildung 46: V1 und V2 in Schicht 3 der Hinterfüllung (8 Tage und Zoom)

Der erste Versuch, mit kontinuierlichem Wärmeentzug, zeigte eine relativ große Spreizung der Temperaturen. In Bereichen der Hinterfüllung zwischen den Sondenrohren lag die Temperatur nur leicht über der des Arbeitsmittels. Damit könnte, bei entsprechend niedrigen Betriebstemperaturen, die Gefahr einer Durchfrostung gegeben sein. Die Temperaturen am Rand der Hinterfüllung sind dagegen deutlich höher und bestätigen einen Temperaturgradienten innerhalb der Hinterfüllung. In Folge dessen ist dort die Wahrscheinlichkeit einer Durchfrostung, auch bei niedrigen Betriebstemperaturen, weit geringer.

Im zweiten Versuch wurde die Sonde im intermittierenden Betrieb betrieben. Dabei wurden nur geringfügig höhere Minimaltemperaturen an den kritischen Positionen im Vergleich zum ersten Versuch beobachtet. An den weniger kritischen Stellen war der Temperaturunterschied zwischen den beiden Versuchen deutlich größer. Die potentielle Gefahr der Durchfrostung ist also an den Stellen, die schon in V1 gefährdet waren, im intermittierenden Betrieb nur geringfügig kleiner. Inwieweit dieser Effekt durch die bei Durchfrostung notwendige Latentenergie zusätzlich verringert wird, sollte in einem weiterführenden Forschungsvorhaben adressiert werden. An den Stellen, bei denen bereits im ersten Versuch eine geringe potentielle Gefahr bestand, verringerte sich diese im zweiten Versuch weiter. Der Vergleich der Temperaturentwicklung im Nahfeld der Sonde für beide Lastfälle zeigt, dass der Einflussbereich der EWS für den intermittierenden Betrieb deutlich kleiner ausfiel.

Der Vergleich der beiden Versuche (Abbildung 46) zeigt einen Zusammenhang zwischen der Spreizung der minimalen Temperaturen in V1 und V2 und ihrer Position. An Positionen, an denen die Abkühlung während V1 weniger stark war, tritt die größte Spreizung auf. Die Temperaturen nahmen dort während V2 noch weniger stark ab. Weiterhin nahmen die Temperaturen während dem zweiten Versuch dort besonders stark ab, wo schon in V1 die stärkste Abkühlung messbar war. An diesen Messstellen in der Hinterfüllung tendieren die Temperaturen stärker in Richtung des Temperaturniveaus von V1. In den Versuchen senkt sich die Temperatur im Kern der Sonde, auch bei Betrieb mit zwischenzeitigen Regenerationsphasen, fast bis auf die Temperatur des zirkulierenden Fluids ab. Wird eine EWS mit Temperaturen deutlich unter 0°C betrieben, so ist für den Bereich zwischen den

Sondenrohren (kritische Zone) zu zeigen, ob, und wenn ja bis zu welchen Temperaturen, die Sonde bei Betrieb mit zwischenzeitiger Regeneration auf Grund der Latentenergie frostfrei betrieben werden kann. Dieser Fragestellung konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht nachgegangen werden.

Abbildung 47 zeigt die radiale Temperaturentwicklung in dem durch die EWS beeinflussten Gebiet. Das Volumen des abgekühlten Erdreichs steigt quadratisch mit zunehmendem Radius. Die Temperaturverläufe von B24 in V2 und B25 in V1 waren vergleichbar. B25 liegt 30 cm weiter von der EWS entfernt als B24. Das zeigt, dass die Temperaturentwicklung durch die Abkühlung in V1 deutlich größer ist als in V2. Es wurden damit deutliche Unterschiede im Ausmaß des durch die Sonde beeinflussten Erdreichs für kontinuierlichen und intermittierenden Betrieb beobachtet.

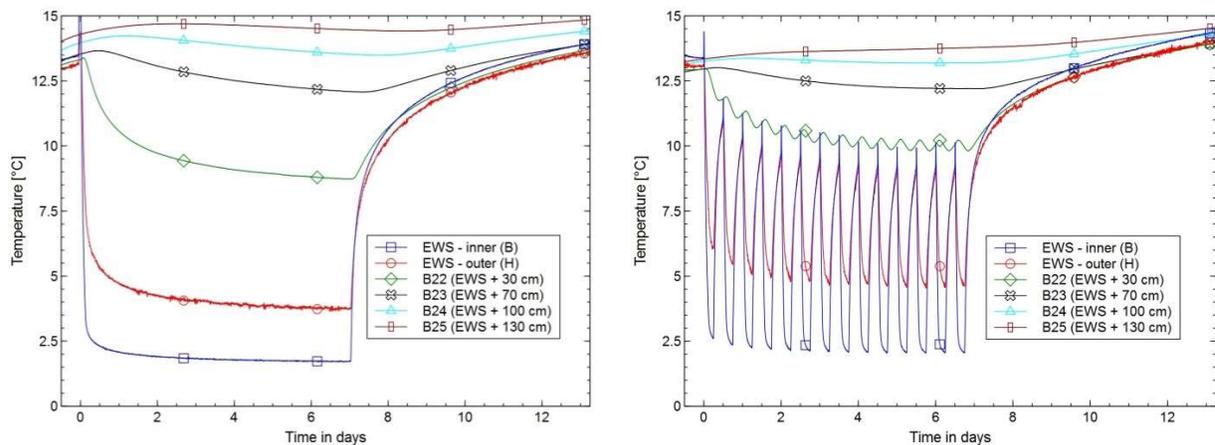


Abbildung 47: Temperaturentwicklung über V1 (links) und V2 (rechts) in verschiedenen Abständen zu Sonde

2.5.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Durch die enge Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern wird gewährleistet, dass sich sowohl die Untersuchungen während des Projektverlaufs am aktuellen Bedarf in der Praxis orientieren, als auch die gewonnenen Erkenntnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Letzteres wird insbesondere auch durch regen Austausch mit Vertretern aus Ingenieurbüros und Behörden im Rahmen der regelmäßig bei VEGAS und dem Fortbildungsverband Boden und Altlasten durchgeführten Fortbildungsveranstaltungen gewährleistet.

2.5.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

- 2.12.2014: Vorstellung des Forschungsvorhabens und Ergebnisse im Rahmen der Veranstaltung „Aktuelles zum Thema "Oberflächennahe Geothermie"-Planung, Ausführung, Qualitätssicherung“ des Fortbildungsverbands Baden-Württemberg als Vortrag (Dipl.-Ing. Simon Kleinknecht)
- 5.03.2015: Vorstellung des Forschungsvorhabens und Ergebnisse als Fachposter am Stand des Landesforschungszentrums Geothermie auf der Messe GeoTHERM 2015 in Offenburg
- 20.06.2015: Vorstellung des Forschungsvorhabens als Fachposter am Tag der Wissenschaft

der Universität Stuttgart.

2.5.12 Literatur

[Bisch, Klaas, 2014] Bisch, G.; Klaas, N.: *Validierung von Erdwärmesondensimulationen zum Kühlen und Heizen im Nah- und Fernfeld mit Hilfe geothermischer Testfelder*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben geomatrix.bw, 2014.

[Riegger et al, 2015] Riegger, M.; Rolker, J.; Stober, I.; Steger, H.; Haist, M.; Eckhardt, J.-D.; Schlager, P.; Zorn, R.; Huttenloch, P.; Köhler, A.: *Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie*. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben EWS-TECH, 2015.

2.6 Geothermisches Wärme- und Kälte-Speicherpotential im urbanen Untergrund (Universität Tübingen, Prof. Dr. Peter Grathwohl & KIT, Prof. Dr. Philipp Blum)

2.6.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

In allen untersuchten Städten wurden ausgedehnte positive Temperaturanomalien im oberflächennahen Grundwasser gefunden. Eine detaillierte regionale Betrachtung hat gezeigt, dass die Verteilung der Grundwassertemperaturen unter urbanen Gebieten sehr heterogen ist. Die Überlagerung vieler verschiedener Wärmequellen führt langfristig zu einer Erhöhung der Grundwassertemperaturen um mehrere Grad im Vergleich zu unbeeinflussten Gebieten. Somit stellen urbane Grundwasserleiter auch in Baden-Württemberg ausgenommen Stuttgart attraktive Speicher für thermische Energie dar. Die Abschätzung der Kapazität des Heizbedarfs ergab, dass das theoretische geothermische Potential den Heizbedarf der jeweiligen betrachteten Städte für einige Jahre decken könnte. Aufgrund des jährlichen anthropogenen Wärmeeintrags in das Grundwasser, könnte somit der Heizbedarf in Karlsruhe zu mehr als 30% nachhaltig mit Wärme aus diesem unterirdischen Energiereservoir gedeckt werden. Durch Nutzung des urbanen Untergrunds zur Deckung des Kältebedarfs kann dieser Wert auf 65% verdoppelt werden. Der urbane Grundwasserleiter kann hierbei auch zur Speicherung von Energie (z. B. Aquiferspeicher) verwendet werden. Hierfür müssen jedoch die bestehenden rechtsverbindlichen und hydro-geologischen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

2.6.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Das Klima in Großstädten unterscheidet sich meist deutlich von dem im ländlichen Umland. Das Zusammenspiel vieler Faktoren, wie z. B. fehlende Vegetation, Wärmeabstrahlung von Gebäuden und Versiegelung führt zu einem urbanen Mikroklima mit erhöhten Temperaturen in der Atmosphäre [Oke, 1973]. Auch im Untergrund entstehen weit ausgedehnte Temperaturanomalien, die sich dynamisch über Jahrzehnte entwickeln und sich ausgehend vom Stadtzentrum sowohl lateral als auch vertikal in die Tiefe ausbreiten. So wurden um bis zu 6 K erhöhte Grundwassertemperaturen unter mehreren deutschen Städten gefunden [Zhu et al., 2010], [Menberg et al., 2013a]. Diese Temperaturanomalien können somit erhebliche Volumen an urbanem Grundwasser beeinflussen. Diese anthropogen verursachten, ausgedehnten Temperaturanomalien im oberflächennahen Grundwasser stellen eine enorme Menge an thermischer Energie dar. Folglich repräsentieren erwärmte urbane Aquifere attraktive Reservoirs thermischer Energie für oberflächennahe geothermische Nutzung, wie z. B. für Raumheizung [Zhu et al., 2010]. Zusätzlich zu den generellen Vorteilen geothermischer Systeme, wie z. B. Verringerung der Emissionen an Treibhausgasen [Bayer et al., 2012], können die erhöhten Grundwassertemperaturen in urbanen Aquiferen die Nachhaltigkeit geothermischer Systeme verbessern. Außerdem verbessern die höheren Temperaturen die Effizienz der zur Raumheizung benutzten Wärmepumpen. Auf der anderen Seite kann der urbane Untergrund jedoch auch zur Kühlung oder auch als geothermischer Speicher fungieren.

2.6.3 Aufgabenstellung

Ziel dieses Vorhabens ist es daher das geothermische Wärme- und Kälte-Speicherpotential im Stuttgarter Untergrund sowie in weiteren ausgewählter urbaner Räume in Baden-Württemberg zu ermitteln.

2.6.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In Stuttgart, Karlsruhe und Köln wurde daher eine detaillierte räumliche Analyse der Grundwassertemperaturen durchgeführt. Der flache Untergrund von Karlsruhe und Köln besteht zum großen Teil aus sedimentären Ablagerungen, die oberflächennahe, ungespannte Grundwasserleiter enthalten. Diese sind anfällig für eine Beeinflussung durch vermehrten anthropogenen Wärmeeintrag von der Oberfläche. Im Gegensatz dazu gliedert sich die Grundwasserführung in Stuttgart in sechs komplexe hydrogeologische Einheiten und wird thermal von den Mineralbädern im Stadtteil Berg und in der Bad Cannstatter Neckartalaue dominiert.

Aus diesem Grund eignet sich die von [Zhu et al., 2010] vorgestellte Methode, mit der das theoretische geothermische Wärme- und Kältepotential der urbanen Wärmeinseln im Untergrund abgeschätzt werden kann, nicht für den Stuttgarter Untergrund. Basierend auf den standortspezifischen thermo-physikalischen und hydrogeologischen Eigenschaften der Grundwasserleiter kann der potentielle Wärmeinhalt im Untergrund von Karlsruhe und Köln für eine potentielle Abkühlung von 2 K berechnet werden. Für die Abschätzung der Kapazität zur Raumheizung werden der potentielle Wärmeinhalt im Untergrund und der häusliche Heizbedarf der einzelnen Städte gegenüber gestellt. Des Weiteren wurde der industrielle Kältebedarf der Stadt Karlsruhe analog der Kältemarktanalyse der Stadt Hamburg [Netzwerk Kälteeffizient Hamburg, 2010] ermittelt.

Der jährliche anthropogene Wärmeeintrag in den städtischen Untergrund kann mit Hilfe eines analytischen Wärmetransportmodells berechnet werden, in dem verschiedene Wärmequellen, wie z. B. erhöhte Oberflächentemperaturen und beheizte Gebäudekeller berücksichtigt werden [Menberg et al., 2013b], [Benz et al., 2015].

2.6.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Keine.

2.6.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

Siehe Wissenschaftlicher und technischer Stand.

2.6.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Mit folgenden Stellen erfolgte ein direkter fachlicher Austausch, dessen Ergebnisse in die vorliegende Studie einfließen:

- Amt für Umweltschutz (AfU) der Stadt Stuttgart
- Umweltamt der Stadt Karlsruhe

2.6.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Siehe Ergebnisse.

2.6.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

Die regionalen Verteilungen der Grundwassertemperaturen unter Karlsruhe und Köln zeigen, dass

die Temperaturen im ländlichen Umland der Städte zwischen 8-11°C liegen, was dem jeweiligen Jahresmittel der Lufttemperatur entspricht. Die anthropogene Beeinflussung in diesen Bereich ist folglich nur gering. In Übereinstimmung mit den zunehmenden Veränderungen der Flächennutzung und der Bebauungsdichte nimmt auch die Grundwassertemperatur zur Innenstadt hinzu. Dieses Verhalten ist in den gemessenen Grundwassertemperaturen in Stuttgart nur schwer zu erkennen (Abbildung 48). Die geringen Brunnendichte in der Innenstadt und die auf Grund verschiedener hydrogeologischer Einheiten stark variierende Temperaturmesstiefe erschweren hier den Vergleich ländlicher und urbaner Temperaturen. Außerdem wird der Untergrund thermal von Mineralquellen entlang der Neckartalaue dominiert. Daher muss die Stadt Stuttgart von der weiteren Betrachtung des Wärme- und Kältepotential leider ausgenommen werden.

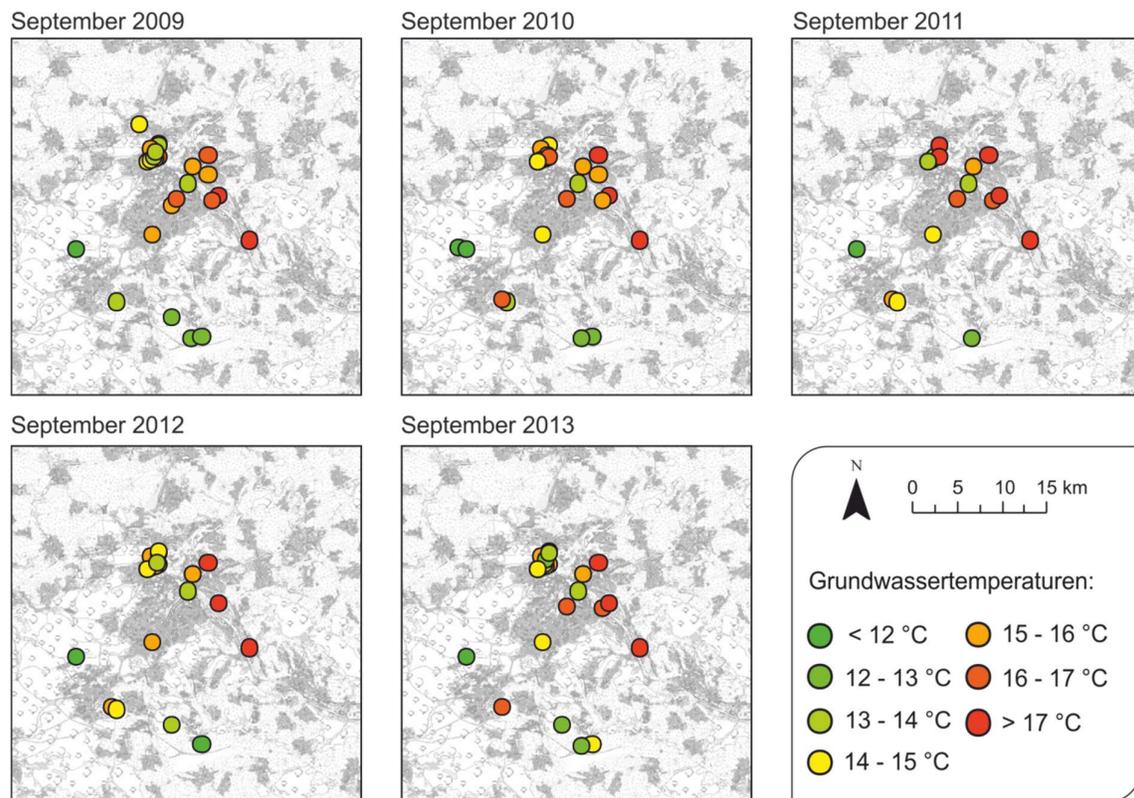


Abbildung 48: Grundwassertemperaturen in Stuttgart in den Jahren 2009 bis 2013. Die höchsten Temperaturen von knapp 20°C wurden in den thermalen Mineralquellen in Bad Cannstatt und Berg gemessen.

Die Mittelwerte des theoretischen Energieinhalts der untersuchten städtischen Grundwasserleiter sind in Abbildung 49a dargestellt. Der Vergleich mit dem potentiellen häuslichen Wärmebedarf zeigt, dass dieser für ein bis drei Jahre gedeckt werden könnte, ehe das Grundwasser um 2 K abkühlt. Um die Grundwassertemperatur konstant zu halten muss die Wärmebilanz im Grundwasserleiter gleich Null sein. D.h. es darf nicht mehr Wärmeenergie entzogen werden als der anthropogene Wärmeeintrag dem Grundwasserspeicher zuführt (Abbildung 49b). In Karlsruhe und Köln ergibt sich hieraus ein nachhaltiges geothermisches Potential von 32% bzw. 9% des jährlichen Wärmebedarfs. Die Nutzung von Grundwasser zur Kühlung würde die Grundwassertemperaturen und somit den Wärmeeintrag jedoch grundsätzlich erhöhen und sollte daher immer gemeinsam mit dem Heizbedarf lokal betrachtet werden. Würde in Karlsruhe der gesamte industrielle Kältebedarf (~2 PJ) aus dem Grundwasser gedeckt werden, ergibt sich ein nachhaltiges geothermisches Potential von 65% des

jährlichen Wärmebedarfs.

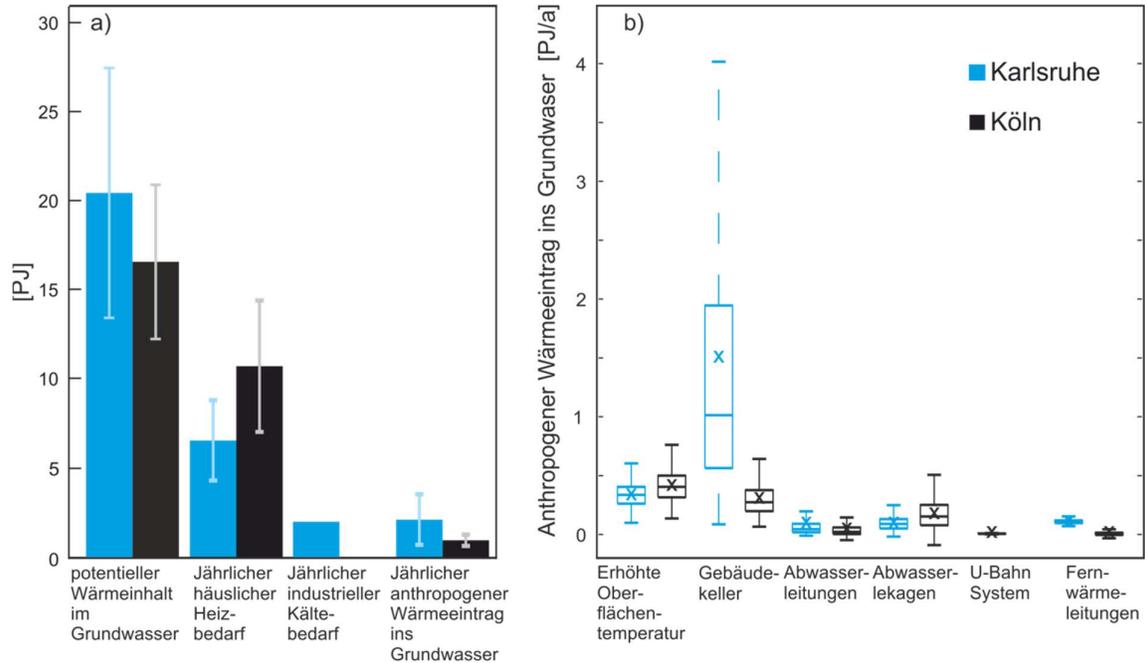


Abbildung 49: a) Vergleich des mittleren Wärmeeintrags mit dem mittleren potentiellen Wärmeinhalt im oberen Grundwasserleiter und dem häuslichen Heizbedarf sowie dem industriellen Kältebedarf. b) Anthropogener Wärmeeintrag in das oberflächennahe Grundwasser in Karlsruhe und Köln durch die dominanten Wärmequellen.

2.6.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die Ergebnisse bilden die Grundlagen für einen holistischen Ansatz über den Energieverbrauch und –speicherung in den Städten und schließen somit die Lücke zwischen der urbanen Wärmeinsel in der Atmosphäre mit dieser im Untergrund.

2.6.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Teilergebnisse wurden in der Publikation [Benz et al., 2015] veröffentlicht.

2.6.12 Literatur

[Bayer et al., 2012] Bayer, P.; Saner, D.; Bolay, S.; Rybach, L.; Blum, P.: *Greenhouse Gas Emission Savings of Ground Source Heat Pump Systems in Europe: A Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2012, 1256-1267.

[Benz et al., 2015] Benz, S.A.; Bayer, P.; Menberg, K.; Jung, S.; Blum, P.: *Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers*. Science of the Total Environment 524-525, 2015, 427-439.

[Hähnlein et al., 2011] Hähnlein, S.; Blum, P.; Bayer, P.: *Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland*. Grundwasser 16, 2011, 69-75.

- [Hähnlein et al., 2013] Hähnlein, S.; Blum, P.; Ferguson, G.; Bayer, P.: *Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy*. Energy Policy, 59, 2013, 914-925.
- [Menberg et al., 2013a] Menberg, K.; Bayer, P.; Zosseder, K.; Rumohr, S.; Blum, P.: *Subsurface urban heat islands in German cities*. Science of the Total Environment 442, 2013, 123-133.
- [Menberg et al., 2013b] Menberg, K.; Blum, P.; Schaffitel, A.; Bayer, P.: *Long-term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island*. Environmental Science & Technology 47, 2013, 9747-9755.
- [Netzwerk Kälteeffizient Hamburg, 2010] Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt; Unternehmen für Ressourcenschutz: *Kältemarktanalyse der Stadt Hamburg*. Juni 2010.
- [Oke, 1973] Oke, T. R.: *City size and the urban heat island*. Atmospheric Environment 7, 1973, 769-779.
- [Zhu et al., 2010] Zhu, K.; Blum, P.; Ferguson, G.; Balke, K.-D.; Bayer, P.: *The geothermal potential of urban heat islands*. Environmental Research Letters 5, 2010, 044002.

2.7 Gekoppelte thermisch-mechanische Simulation von Erdwärmesonden (Universität Stuttgart - IGS, Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann, Dipl.-Ing. Patrik Buhmann)

2.7.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Rahmen Arbeitspakets 7 des Forschungsprojektes „Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden“ wurden durch das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart Untersuchungen zum Vorgang der Verfüllung von Erdwärmesonden sowie zur thermisch-hydraulisch-mechanischen Interaktion einer in Betrieb befindlichen Erdwärmesonde mit dem umgebenden porösen Medium Boden durchgeführt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden im Rahmen des Arbeitspaketes 7A die erforderlichen Randbedingungen zur Simulation des Verfüllvorgangs identifiziert. Hierbei zeigte sich, dass zur vollständigen Beschreibung des Verfüllvorgangs vor allem die Interaktion zwischen der Verfüllsuspension und der Bohrlochwandung bis dato noch nicht hinreichend erforscht ist. Aus diesem Grund wurden Modellversuche durchgeführt, die die Fließeigenschaften der Frischsuspension und die Festigkeitsentwicklung des Verfüllbaustoffes in Abhängigkeit vom Wasserangebot des umgebenden Untergrundes aufzeigen.

Auf der Basis des Versuchsstandes der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) der Universität Stuttgart wurden im Rahmen des Arbeitspaketes 7B numerische Simulationen zur hydraulisch-thermischen Interaktion einer Erdwärmesonde mit dem anstehenden Untergrund durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse für vorwiegend durch Wärmeleitung geprägte Wärmetransportvorgänge im porösen Medium Boden zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen der durchgeführten Experimente. Unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung kann die Temperaturentwicklung im direkten Nahbereich zur Erdwärmesonde nicht mit vergleichbarer Genauigkeit nachgefahren werden. Dies zeigt weiteren Forschungsbedarf auf. Die mechanisch-hydraulisch-thermischen Wechselwirkungen von Erdwärmesonden im Betrieb wurden auf der Basis einer Literaturrecherche betrachtet und erforderliche weitere Untersuchungen spezifiziert.

2.7.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Der Ausbau von Erdwärmesonden als Wärmeenergielieferant aus dem Bereich der oberflächennahen Geothermie nimmt seit dem Jahr 2009 stetig ab. Gründe hierfür liegen in den Wärmegeheimungskosten hervorgerufen durch die, im Verhältnis zu anderen Umweltenergiesystemen wie Luftwärmepumpen, hohen Installationskosten sowie die in der Öffentlichkeit intensiv diskutierten Schadensfälle.

Die Schäden, die durch die Installation und den Betrieb einer Erdwärmesonde auftreten können, lassen sich in die Bereiche der Energieextraktion (wirtschaftlicher Schaden) und der Geologie gliedern. Während bei ersterer der prognostizierte Energieertrag nicht erreicht werden kann, können Herstellungsdefizite unter besonderen geologischen Randbedingungen weitreichende Folgen für natürliche Grundwasserhorizonte und z.B. wasserempfindliche Gesteinsschichten haben [Ruch, Wirsing 2013], [Sass, Burbaum, 2012]. Ursächlich für alle Schäden ist eine nicht intakte Bohrlochverfüllung oder ein nicht intaktes Rohrleitungssystem, in dem das Wärmeträgerfluid zirkuliert

[DGGT, DGG, 2013]. Im Rahmen dieses Beitrages werden lediglich Störungen der Bohrlochverfüllung behandelt. Eine nicht intakte Bohrlochverfüllung kann zum einen aus dem Verfüllvorgang, zum anderen aus dem Betrieb der Erdwärmesonde herrühren.

Zur Minimierung möglicher Schädigungen der Hinterfüllung einer Erdwärmesonde sind Verfahren und Methoden zu entwickeln die es ermöglichen, den Vorgang der Bohrlochverfüllung wie auch die thermisch-hydraulisch-mechanische Interaktion der Erdwärmesonde mit dem Verfüllbaustoff und dem anstehenden Boden zu untersuchen. Hierzu können neben in-situ Messungen und Laborversuchen auch numerische Methoden zum Einsatz kommen.

2.7.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen des AP 7A war aufbauend auf einer Literaturrecherche ein Konzept zur numerischen Simulation des Verfüllvorganges von Erdwärmesonden zu entwickeln. Hierbei sind die entsprechenden Konstruktionsgeometrien, der Verfüllvorgang sowie das Verfüllmaterial zutreffend zu beschreiben. Wesentlich in diesem Zusammenhang ist die Formulierung eines entsprechenden Stoffgesetzes zur Abbildung der Verfüllsuspension. In eigens konzipierten Versuchsständen zur Bohrlochverfüllung wurde die Interaktion zwischen dem Verfüllbaustoff und dem umgebenden Boden untersucht.

Die Grundlage des AP 7B bildet der Versuchstand des Projektpartners VEGAS der Universität Stuttgart. Hier wurde eine Erdwärmesonde mit ca. 4,5 m Länge in einen Versuchstand eingebaut, an den verschiedene Testszenarien gefahren wurden. Innerhalb des Versuchstandes werden die Baugrund- wie auch die Sondentemperaturen an zahlreichen Messstellen aufgezeichnet und bilden hierdurch die Grundlage zur Validierung eines numerischen Berechnungsmodells. Auf der Basis der Berechnungsergebnisse sollen Erkenntnisse zur thermisch-mechanisch-hydraulischen Interaktion zwischen dem Verfüllbaustoff und dem Mehrphasenmedium Boden während der Betriebsphase von Erdwärmesonden gewonnen werden.

2.7.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Den wissenschaftlichen Kenntnisstand zur Verfüllung von Erdwärmesonden (AP 7A) bilden u.a. die Untersuchungen der Universität Karlsruhe [Herrmann, 2008], des Steinbeis Forschungsinstituts für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme [Rolker, Riegger, 2014], [Riegger et al., 2013a], [Riegger et al., 2013b] sowie des Landes Oberösterreich [Niederbrucker, Steinbacher, 2007]. In diesen Untersuchungen wurden für verschiedene am Markt erhältliche Erdwärmesondenverfüllbaustoffe als Fertigprodukt sowie als Baustellenmischung Untersuchungen hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften sowohl im Zuge des Verfüllvorgangs, als auch im ausgehärteten Zustand unter Labor- und Feldbedingungen durchgeführt.

Im Hinblick auf die Abbildung des Verfüllvorganges geben [Roussel, Gram, 2014], [Shyshko, 2013] Hinweise zur numerischen Simulation von Betoniervorgängen in feste Schalungen. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden entsprechende Stoffgesetze gewählt und für den Anwendungsfall Bohrlochverfüllung angepasst.

Die hydraulisch-thermische Interaktion zwischen einem Erdwärmeabsorberbauteil und dem Mehrphasenmedium Boden wird grundlegend z.B. in [Arslan, Huber, 2013] und [Hähnlein et al., 2010] beschrieben.

Eine mechanische Beanspruchung von Erdwärmesondenverfüllmaterialien erfolgt im Wesentlichen durch die nach der Herstellung durchzuführende Druckprüfung des Systems [VDI 4640, 2015], durch die zyklischen Temperaturwechsel in der Betriebsphase sowie durch das Durchlaufen von zyklischen Frost-Tauwechseln. In [Borinaga et al., 2014] und [Herrmann, 2008] werden grundlegende Untersuchungen zur Frost-Tauwechsel-Beständigkeit von Erdwärmesondenverfüllmaterial vorgenommen. Die in diesem Zusammenhang in zementösen Baustoffen ablaufenden physikalischen Prozesse werden z.B. in [Setzer, 2002] beschrieben. Zur numerischen Abbildung dieser Phänomene werden in [Yang et al., 2015] und [Lin et al., 2014] Ansätze auf der Ebene der Mikroskala gezeigt.

2.7.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Anwendungsempfänger bekannte Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Die Untersuchungen zur Frost-Tauwechsel-Beständigkeit von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen ist ein aktuelles Thema [Borinaga et al., 2014], sodass angepasste Prüfverfahren [Anbergem et al., 2013] bereits Einzug in einschlägige Fachliteratur erhalten haben [DGGT, DGG, 2013]. Aktuelle Forschungen zeigen eindrucksvoll, dass die Frost-Tauwechsel Beständigkeit von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen deutlich unter der von klassischen Betonen liegt.

2.7.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn der Projektphase wurden die gemäß Antrag formulierten Forschungsinhalte in den Arbeitspaketen 7A und 7B konkretisiert. Für die Bearbeitung des Paketes 7A waren keine detaillierten Abstimmungen mit den Projektpartnern des Verbundvorhabens erforderlich. Der notwendige Austausch über den Projektfortschritt und die Untersuchungsergebnisse erfolgte während der Beiratsitzungen des LFZG sowie auf bilateraler Ebene mit einzelnen Kollegen des Verbundvorhabens. Die Literaturrecherche zum Verfüllvorgang einer Erdwärmesonde warf frühzeitig die Frage nach geeigneten Stoffgesetzen zur Abbildung des Verfüllvorganges auf. Aus diesem Grund wurde der ursprüngliche Arbeitsumfang um experimentelle Untersuchungen erweitert, die während der Projektlaufzeit konzipiert, durchgeführt und ausgewertet wurden.

Für die Bearbeitung des Arbeitspaketes 7B erfolgte eine intensive Abstimmung mit der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS). Das Aufsetzen des numerischen Berechnungsmodells konnte nach der erfolgten Installation der Erdwärmesonde in den Versuchsstand der VEGAS erfolgen. Mit den eigentlichen Simulationsberechnungen konnte erst im März 2015 begonnen werden, nachdem erste Versuchsergebnisse zur Validierung des numerischen Modells vorlagen. Bei dem Versuchsbehälter der VEGAS handelt es um einen Versuchsstand, der bereits für zahlreiche vorherige Projekte genutzt wurde.

Im Rahmen der Berechnungen zeigte sich, dass bei nicht strömendem Grundwasser, also einer lediglich durch freie Konvektion bestimmten Wärmeübertragung, die Berechnungsergebnisse die Messdaten gut abbilden. Wurden hingegen Versuche mit strömendem Grundwasser simuliert, wichen Messdaten und Berechnungsergebnisse ohne eindeutig identifizierbare Systematik voneinander ab. Weitere Versuche und Simulationsberechnungen wurden durchgeführt, um den hieraus resultierenden Forschungsbedarf genauer eingrenzen zu können.

2.7.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Bearbeitung des Arbeitspaketes AP 7B war eine intensive Abstimmung und Koordination mit dem Arbeitspaket 5: „Definition des Nahbereichs von Erdwärmesonden“ der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) erforderlich. Das numerische Modell zur Simulation der Erdwärmesonden-Baugrundinteraktion des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart erforderte die Festlegung der Modellrandbedingungen gemäß den Versuchsrandbedingungen am VEGAS Versuchstand. Es wurden drei reale Testszenarien durch das numerische Modell nachgefahren, deren Eingangsparameter entsprechend abzustimmen waren.

Nachlaufend zu den durchgeführten Simulationsberechnungen wurden die Berechnungsergebnisse mit dem Forschungspartner Vegas intensiv besprochen und diskutiert. Nur so konnten Fragestellungen bei der Modellbildung sowie bei der Interpretation der Messergebnisse zielgerichtet beantwortet werden.

2.7.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Das Verbundvorhaben „Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden“ legt den Fokus auf den dauerhaften ungestörten Betrieb von Erdwärmesonden und hier im Speziellen auf die Anforderungen und die Qualität des Erdwärmesondenverfüllbaustoffes.

Das AP 7A fasst die Randbedingungen zur Herstellung einer Erdwärmesondenverfüllung zusammen, entwickelt eine Methode zur numerischen Abbildung dieses Vorganges und zeigt offene Fragestellungen und entsprechenden Forschungsbedarf auf. Die Ergebnisse des AP 7A geben somit zum einen eine konzentrierte Übersicht der Randbedingungen und Einflüsse bei der Herstellung einer Erdwärmesonde und bilden die Grundlage für weitere notwendige Untersuchungen. Des Weiteren können mit der entwickelten Methode zur numerischen Abbildung des Verfüllvorgangs entsprechende Berechnungsmodelle entwickelt und/oder fortgeschrieben werden. Hierbei kann die numerische Simulation des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden schon vor der Herstellung einer Erdwärmesonde ein mögliches Schadenspotential eingrenzen und ggf. minimieren.

Das AP 7B trägt mit seinen Ergebnissen zum Verständnis der thermisch-hydraulischen Interaktion zwischen der Erdwärmesonde und dem Mehrphasenmedium Boden bei. Hierbei wurde ergänzend zu vielen aus der Literatur bekannten Untersuchungen der Fokus auf den Erdwärmesondennahbereich gelegt. Die durchgeführten numerischen Simulationen des Versuchsstandes der VEGAS zeigen einerseits den noch vorhandenen Forschungsbedarfs im Hinblick auf den Wärmeübergang zwischen der Erdwärmesonde und dem anstehenden Untergrund bei Grundwasserströmungen auf und dienen gleichzeitig der Analyse und Interpretation der Messergebnisse. Die durchgeführten Untersuchungen bieten die Grundlage für weitergehende Untersuchungen zur lokalen Temperaturverteilung innerhalb des Verfüllbaustoffes sowie den daraus rührenden Schädigungsmechanismen bei der Beaufschlagung des Systems mit Frost-Tauwechsel-Szenarien.

2.7.9 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

2.7.9.1 AP 7A – Abbildung des Herstellprozesses Ringraumverfüllung

Grundsätzlich sind zur Beschreibung des Verfüllvorgangs einer Erdwärmesonde zunächst die geometrischen, physikalischen und baubetrieblichen Randbedingungen zu beschreiben. Im Anschluss hieran sind zum einen die Suspensionseigenschaften des Verfüllbaustoffes als auch der Prozess des Ansteifens und Aushärtens des Verfüllmaterials zu formulieren und die Interaktion des Verfüllbaustoffes mit dem anstehenden Untergrund darzustellen. Zur Simulation des Verfüllvorgangs sind geeignete Berechnungsmethoden zu wählen und anzuwenden. Nachfolgend werden die wesentlichen Randbedingungen und Modelle zur Abbildung des Verfüllvorgangs einer Erdwärmesonde beschrieben.

2.7.9.2 Bohrlochwand

Für die Einschätzung der Baugrundsituation ist eine Baugrunderkundung im Vorfeld unerlässlich. Wird eine Erdwärmesondenbohrung in einem Festgestein abgeteuft, ist die Aufnahme der Bohrlochwandung und des Kluftgefüges über einen sogenannten Bohrlochscan möglich. Im Lockergestein hingegen existieren keine bildgebenden oder vermessungstechnischen Verfahren, um die Oberflächenstruktur der Bohrlochwandung abzutasten.

2.7.9.3 Einbauteile und Rohrleitungen

Die in der Praxis am häufigsten angewendete Sonde ist die Doppel U-Rohrsonde. Daneben kommen untergeordnet die U-Rohrsonde und die Koaxialrohrsonde zum Einsatz.

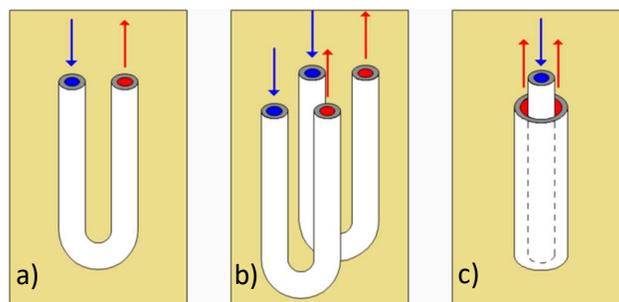


Abbildung 50: Sondentypen: a) U-Sonde, b) Doppel U-Sonde, c) Koaxial-Sonde

Der Verlauf der Sonde in der Hinterfüllung spielt eine wichtige Rolle für die Systemeffizienz der Erdwärmanlage. Berührt das Rohr, in dem die Wärmeträgerflüssigkeit hinabfließt, das Rohr, in dem diese nach oben fließt, kommt es zu einer ungewollten thermischen Beeinflussung des Vor- und Rücklaufs des Primärkreislaufes. Das hat zur Folge, dass die Temperaturdifferenz zwischen dem abfließenden und dem ankommenden Wärmeträgermedium sinkt. Um diesen Effizienzverlust zu vermeiden, werden Abstandshalter aus Kunststoff zwischen den Sondenrohren angebracht. Verläuft die Sonde nicht mittig, sondern am Rand der Bohrlochwand, kommt es unter Umständen zur Störung der abdichtenden Funktion des Verfüllbaustoffes. Außerdem kann der Wärmeaustausch zwischen Untergrund und Sonde nicht optimal funktionieren, wenn die Sonde nicht zentrisch im Bohrloch verläuft. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu den Abstandshaltern Zentrierhilfen eingebaut, welche den Abstand zur Bohrlochwand gewährleisten.

2.7.9.4 Technische Aspekte des Verfüllvorgangs

In der Praxis erfolgt die Verfüllung einer Erdwärmesonde im sogenannten Kontraktorverfahren von unten nach oben. Dazu wird das Verfüllrohr bereits mit der Sonde eingebaut, sodass sich die Öffnung, aus der die Suspension später austritt, am Bohrlochtieftsten befindet. Aus dem Verfüllrohr wird unter Druck die Verfüllsuspension gepresst, diese steigt im Bohrloch nach oben, bis die Suspension an der Geländeoberkante austritt.

Bei geringen Bohrtiefen kann das Verfüllrohr während des Verfüllvorgangs langsam gezogen werden. Um die Entstehung von Hohlräumen in der Verfüllung zu vermeiden, muss sich beim Ziehen der Auslass des Verfüllrohres unterhalb des aufsteigenden Suspensionspiegels befinden.

Bei größeren Tiefen (>60m) gestaltet sich das Ziehen des Rohres, ohne eine mögliche Beschädigung der Sonde zu riskieren, problematischer. Daher kommen hier zwei Verfüllrohre zum Einsatz. Ein längeres, welches von Endteufe bis oberhalb der Geländekante reicht und das Bohrloch bis ca. zur Hälfte der Bohrlochtiefe verfüllt. Ab dieser Höhe übernimmt das zweite, kürzere Rohr den Verfüllvorgang. Bei diesem Vorgehen verbleibt das längere Rohr mit Suspension gefüllt im Bohrloch, während das zweite, kürzere, wie zuvor beschrieben, gezogen wird.

2.7.9.5 Verfüllmaterial

Die am Häufigsten eingesetzten Suspensionen bestehen aus einer Zement- und Bentonitmischung, wie sie auch beispielsweise bei Dichtwänden oder im Brunnenbau verwendet werden. Die Eigenschaften der Frischsuspension sind von denen des ausgehärteten Verfüllbaustoffes zu unterscheiden:

- | | |
|----------------------|---|
| W/F-Wert: | Der W/F-Wert gibt das Verhältnis in Gew.-% zwischen dem verwendeten Wasser zu dem eingesetzten Feststoff an. |
| Trichterauslaufzeit: | Die Trichterauslaufzeit (=TAZ) beschreibt die Viskosität der Verfüllsuspension. |
| Wasserabsetzmaß: | Durch das Wasserabsetzmaß sind Aussagen hinsichtlich des Sedimentationsvermögens der Verfüllsuspension möglich. Hierbei gilt ein größeres Wasserabsetzmaß als ein Indiz für eine geringere Suspensionsstabilität. |
| Druckfestigkeit: | Zur Aufnahme von Spannungen infolge Erd- und Wasserdrücken sowie von thermischen Zwangsspannungen hat der ausgehärtete Verfüllbaustoff eine ausreichende Festigkeit aufzuweisen, die standardmäßig durch die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgt. |
| Wärmeleitfähigkeit: | Da die Verfüllung das Bindeglied zwischen Boden und Sonde darstellt, muss sie in der Lage sein, diese thermisch zu verbinden. Das bedeutet, die Wärmeleitfähigkeit sollte mindestens so hoch wie die des angrenzenden Bodens sein, um eine optimale Wärmeleitung zwischen den Sondenrohren und dem umgebenden Boden zu gewährleisten. |
| Permeabilität: | Der Hinterfüllbaustoff hat im ausgehärteten Zustand grundsätzlich eine geringe Durchlässigkeit als das umgebende Gestein aufzuweisen. |

2.7.9.6 Rheologiemodelle

Rheologie beschreibt den Zusammenhang zwischen den auf ein Material wirkenden Kräften und den daraus resultierenden Verformungen in einem zeitlichen Zusammenhang. Die wesentliche Eigenschaft der Rheologie wird durch die Viskosität, also den Widerstand gegen das Fließen, beschrieben. Dieser Widerstand wirkt auf jeden Körper, der durch ein Fluid bewegt wird, wie auch zwischen Bereichen unterschiedlicher Fluidgeschwindigkeiten. Grundsätzlich gilt, dass wenn eine hohe Viskosität vorliegt, auch der Widerstand gegen entsprechende Bewegungen entsprechend hoch ist.

Fluide können gemäß ihrer Fließeigenschaften in drei Gruppen gegliedert werden:

- Newton'sche Fluide
 - Einphasenfluide oder Lösungen, z.B. Wasser, Benzin, Öl
- Nicht-Newton'sche Fluide gemäß Tabelle 6

Tabelle 6: Nicht-Newton'sche Fluide

	Dickenabnahme durch Scherung	Dickenzunahme durch Scherung
zeitabhängig	Thixotroph (Frishmörtel, Beton, Honig)	Rheopectic (Druckerfarbe)
zeitunabhängig	Pseudoplastisch (Wandfarbe)	Dilatanz
mit Fließgrenze	Bingham -Fluid(Zahnpasta, Frischbeton)	

- Viskoelastische Fluide
 - Beispiel Bitumen

Grundsätzlich kann ein frischer Verfüllbaustoff zur Verfüllung einer Erdwärmesonde direkt nach dem Anmachen als Fluid beschrieben werden, vorausgesetzt während des Verfüllvorgangs wird eine ausreichende hohe Schergeschwindigkeit erzielt und der Baustoff ist homogen. In der Literatur wird das Verhalten von Frischbeton meist als Bingham-Fluid (Nicht-Newton'sche Fluide mit Fließgrenze und Scherung durch Dickenabnahme) beschrieben. Das Fließverhalten wird hierbei durch die Fließscherspannung τ_0 und die plastische Viskosität ν beschrieben (Abbildung 51).

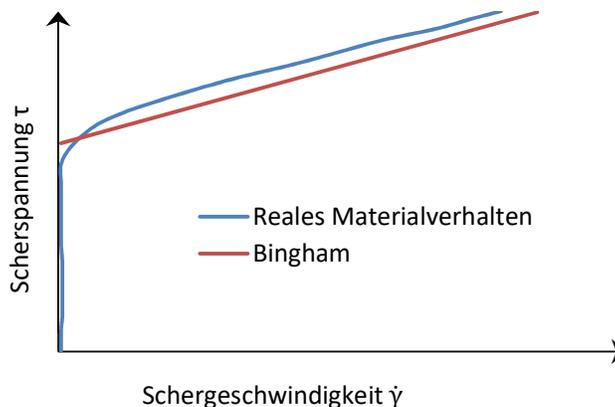


Abbildung 51: Vergleich des BINGHAM-Modells mit dem realen Materialverhalten

Es gibt eine Reihe von Parametern, die das rheologische Verhalten eines Verfüllbaustoffes maßgeblich beeinflussen. Wasser zählt hierbei zu einem wesentlichen Parameter, der nicht nur die Viskosität sondern auch die Fließscherspannung beeinträchtigt. Der Eintrag von Luft beeinträchtigt vor allem die plastische Viskosität.

In der Literatur werden zementöse Baustoffe oftmals als komplexe Nicht-Newton Fluide beschrieben, die eine Fließgrenze besitzen und eine schergeschwindigkeitsabhängige Viskosität besitzen. Beide Eigenschaften ändern sich mit der Zeit und den äußeren Einwirkungen.

Um das rheologische Verhalten von zementösen Baustoffen zu untersuchen, wurden zahlreiche Versuche entwickelt (Setzmaßversuch, L-Kasten Versuch u.a.). Diese Verfahren geben Auskunft über das ungestörte Materialverhalten bei gleichbleibenden Randbedingungen. Anders ausgedrückt, die im Versuch ermittelten Gesetzmäßigkeiten sind solange gültig, wie sich die wesentlichen Eigenschaften, wie z.B. der Wassergehalt der Suspension nicht ändert.

In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, den Verfüllvorgang einer Erdwärmesonde in drei getrennte Verfüllbereiche zu unterscheiden (Abbildung 52):

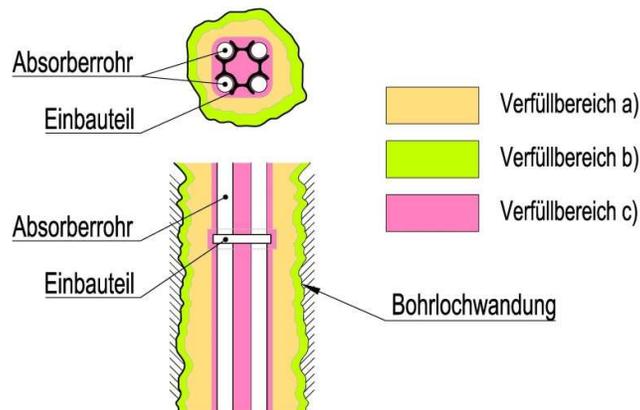


Abbildung 52: Verfüllbereiche

Bereich a) In diesem Bereich werden ausreichend hohe Schergeschwindigkeiten erreicht, das Material verändert seine viskosen Eigenschaften nicht und äußere Einflüsse können im Wesentlichen unberücksichtigt bleiben.

Bereich b) In diesem Bereich findet eine Reduzierung der Schergeschwindigkeit statt. Die strukturierte Oberfläche der Bohrlochwandung verändert die Fließrichtung der Suspension und es kommt zu einer Veränderung der viskosen Eigenschaften der Suspension durch den Austausch z.B. von Bodenfeuchtigkeit mit der Suspension und damit zu einer Veränderung der Viskosität.

Bereich c) In diesem Bereich ändert sich wie für b) beschrieben die Schergeschwindigkeit und damit der Fließzeitpunkt der Suspension. Allerdings wird dies im Wesentlichen durch die vorhandenen Strömungshindernisse (Einbauteile) hervorgerufen.

Abbildung 53 gibt beispielhaft den Zusammenhang zwischen der Viskosität einer Suspension und dem Wassergehalt wieder.

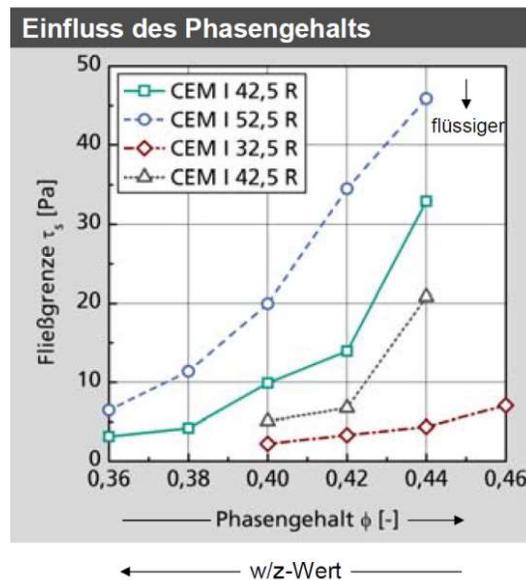


Abbildung 53: Einfluss des Phasengehalts Zement/Wasser auf die Fließgrenze nach [Haist, 2010]

Die Literaturrecherche zu durchgeführten Versuchen der Bohrlochverfüllung von Erdwärmesonden hat ergeben, dass die Berücksichtigung der Baugrundbedingungen und hier vor allem einem variierenden Wassergehalt des Untergrundes bisher nicht hinreichend untersucht wurde. Vor dem Hintergrund, dass die Viskosität des Verfüllmaterials und damit die Verfüllqualität von Wasserangebot abhängig sind, wurde im Rahmen des gegenständlichen Forschungsvorhabens ein Versuchstand zur Visualisierung des Verfüllvorganges entwickelt.

2.7.9.7 Versuch Bohrlochverfüllung visuell

Der Versuch „Bohrlochverfüllung visuell“ soll die Vorgänge bei der Verfüllung einer Erdwärmesonde im Verfüllbereich b) gemäß Abbildung 52 verdeutlichen, um hieraus Rückschlüsse auf die Anpassung vorhandener Stoffgesetze und die erforderlichen Ansätze zur numerischen Abbildung des Verfüllvorgangs ziehen zu können.

Der Versuch „Bohrlochverfüllung“ besteht im Wesentlichen aus einem Behälter, bei dem die Front durch eine Glasscheibe geschlossen ist. Die Verrohrung zur Herstellung der Erdwärmesonde wird durch ein PVC-Rohr abgebildet, das in den Versuchsbehälter eingebaut wird. Der Versuchsbehälter wird mit verschiedenen Böden gefüllt. Diese werden, je nach Bodenart (hier: enggestufter Mittelsand und Sand-Schluff-Gemisch), entweder eingerieselt oder lagenweise eingebaut und verdichtet. Nun folgt der eigentliche Verfüllvorgang. Hierzu wird die Verfüllsuspension im Kontraktorverfahren beginnend von der Sohle des Bohrloches aufsteigen eingefüllt. Je nach Bodenart wird das PVC-Rohr vor oder während des Verfüllvorgangs gezogen. Die nachfolgende Abbildung 54 zeigt den Aufbau des Versuchsstandes und den Prozess der Verfüllung sowie den ausgebauten Verfüllkörper.

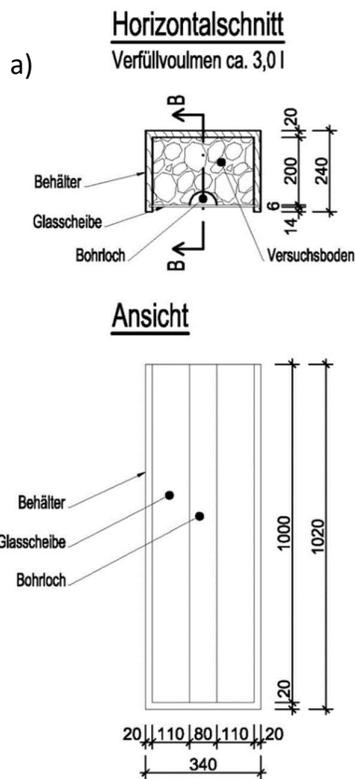


Abbildung 54: a) Versuch Bohrlochverfüllung, b) Ziehen der Verrohrung, c) Ausgebauter Verfüllkörper

Deutlich zu erkennen ist die trichterförmige Ausbildung der Suspensionsoberfläche, die sich durch die Abfiltration des Anmachwassers in den anstehenden Untergrund und den damit einhergehenden sinkenden Suspensionsspiegel ausgebildet hat. Dies ist ein Indiz dafür, dass sich die Viskosität des Verfüllbaustoffes durch den sinkenden Wasser/Feststoffwert verringert. Sämtliche Versuchsergebnisse geben letztendlich Hinweise auf die physikalischen Vorgänge des Verfüllbereichs b), liefern jedoch keine direkten Aussagen zu z.B. veränderten Wassergehalten oder veränderten Scherwiderständen innerhalb der Suspension oder zwischen der Suspension und dem Versuchsboden.

Aus diesem Grund wurde ein weiterer Versuch zur Quantifizierung des Einflusses des Wassergehalts auf die Veränderung der Struktureigenschaften des Hinterfüllbaustoffes entwickelt.

2.7.9.8 Versuch Bohrlochverfüllung Druckfestigkeit

Es wurde vermutet, dass nicht nur die Fließeigenschaften der Frischsuspension, sondern auch die Festigkeitsentwicklung der ausgehärteten Verfüllung durch ein unterschiedliches Wasserangebot des umgebenden Untergrundes beeinflusst wird. Zur Untersuchung dieser These wurde ein weiterer Versuchsaufbau entwickelt, bei dem Probekörper in einen enggestuften Mittelsand mit unterschiedlichen Wassergehalten eingebaut und unter diesen Randbedingungen gelagert wurden. Der Einbau des Probekörpers erfolgte durch Gießen des Verfüllbaustoffes in ein PVC-Rohr, dass nach vollständiger Füllung gezogen wurde.



Abbildung 55a) Versuchsaufbau vor dem Verfüllvorgang, b) ausgeschalter Versuchskörper (umgebenden Boden vor Einbau Verfüllmaterial wassergesättigt, ca. 22 M-% Wassergehalt), c) ausgeschalter Versuchskörper (umgebenden Boden vor Einbau Verfüllmaterial ca. 3,0 M-% Wassergehalt), d) Blick in die verfüllte „Bohrung“ mit Trichterbildung

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche:

Tabelle 7: Versuchsmatrix Bohrlochverfüllung Druckfestigkeit

Wassergehalt Versuchsboden [M%]	7 Tage Druckfestigkeit	28 Tage Druckfestigkeit
0,11	3 Probekörper	3 Probekörper
3,7	-	3 Probekörper
14,4	3 Probekörper	-
22,5	3 Probekörper	3 Probekörper

Nach dem Ausbau der Versuchskörper nach 7 bzw. 28 Tagen wurden diese abgelängt, so dass eine Probekörpergeometrie von $d/h = 1/2$ erreicht wurde. Nach der Nachbearbeitung der Schnittflächen erfolgte die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeiten unter einer Prüfgeschwindigkeit von $0,2 \text{ N/mm}^2\text{-s}$ für Probekörper mit 7-Tage-Druckfestigkeiten und von $0,6 \text{ N/mm}^2\text{-s}$ für Probekörper mit 28-Tage-Druckfestigkeiten.



Abbildung 56: Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit

Die nachfolgende Grafik zeigt die ermittelten Druckfestigkeiten im Bruchzustand aufgetragen über den Wassergehalt des umgebenden Versuchsbodens:

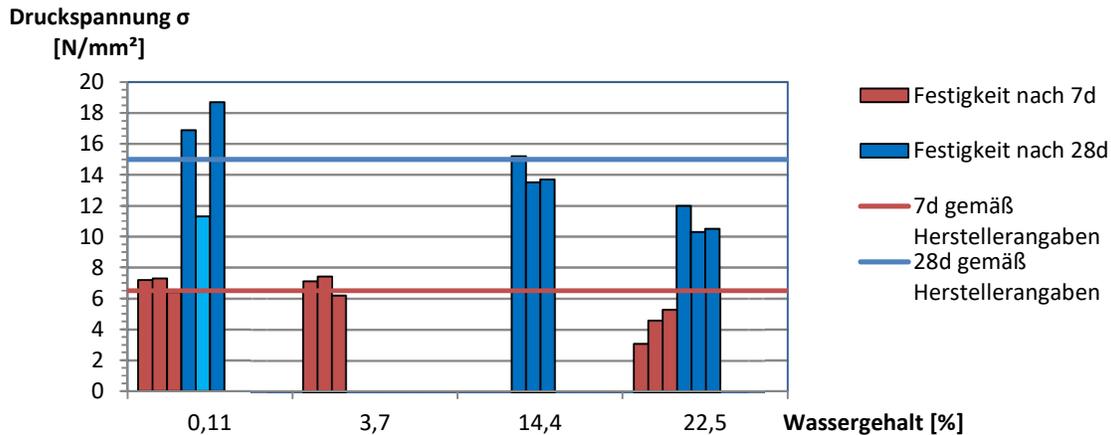


Abbildung 57: Druckfestigkeit Verfüllmaterial über Wassergehalt Versuchsboden

Die Versuchsergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des umgebenden Baugrundes und den ermittelten Druckfestigkeiten der Versuchskörper. Während unter ungesättigten Baugrundverhältnissen (0,11 M-% bzw. 3,7 M-%) die Druckfestigkeiten die Größenordnung der Herstellerangaben erreichen, liegen die ermittelten Festigkeiten für gesättigte Verhältnisse (22,5 M-%) unter den zu erwarteten Werten.

Neben der direkten messtechnischen Ermittlung der Druckfestigkeit wurden sämtlich Probekörper auch visuell angesprochen. Hierbei zeigte sich, dass die im Rahmen des Versuches „Bohrlochverfüllung visuell“ bereits beschriebene Trichterbildung nur für Versuche unter ungesättigten Verhältnissen vollständig ausgeprägt ist. Für Versuche unter gesättigten Baugrundverhältnissen ist ein nahezu horizontales Absinken des Suspensionsspiegels ohne Trichterbildung zu beobachten. Des Weiteren bilden sich bei vollständig gesättigten Baugrundverhältnissen deutlich sichtbare Ausbrüche ($d=5\text{mm}$) aus der Bohrlochwandung aus, die sich in einer pustelartigen Oberfläche des Verfüllkörpers widerspiegelt.

Zusammenfassend lässt sich aus den durchgeführten Versuchen festhalten, dass eine Abhängigkeit zwischen dem Wasserdargebot des Baugrundes und der Viskosität der Verfüllsuspension besteht. Die bis dato durchgeführten Versuche zeigen diese Abhängigkeit nur indikativ und können nicht zur Quantifizierung herangezogen werden. Des Weiteren ist die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des Verfüllbaustoffes vom Wassergehalt des Untergrundes abhängig. Bei den durchgeführten Versuchen werden die vom Hersteller angegebenen Druckfestigkeiten bei ungesättigten Baugrundverhältnissen erreicht, bei gesättigten Verhältnissen aber unterschritten.

Mit Blick auf die Abbildung des Verfüllvorganges sowie im Vorgriff auf die thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Untersuchungen (AP 7B) wird zur Abbildung der Fließ- sowie Festigkeitseigenschaften des Verfüllmaterials somit weiterer Forschungsbedarf identifiziert.

2.7.9.9 Numerische Abbildung des Verfüllvorganges

Grundsätzlich lassen sich aus der Literatur folgende maßgebliche Ansätze für eine numerische Simulation des Verfüllvorgangs unterscheiden:

- Numerische Modellierung von Partikeln in einem Fluid
 - Viscoplastic Element Method (VSEM)
 - Finite Element Method with Lagrangian Intergration Point (FEMLIP)
- Numerische Modellierung eines Fluids durch diskrete Partikel
 - Discrete Element method (DEM)
 - Dissipative Particle Dynamics (DPD)
- Ein-Phasen-Fluidanalyse (Kontium-Ansatz)
 - Computational Fluid Dynamics (CFD)
 - Visoplastic Finite Element Method (VFEM)
 - Viscoplastic Divided Element Method (VDEM).

Die Wahl des Modells richtet sich vor allem nach der konkreten Fragestellung, die durch die Simulation beantwortet werden soll [Roussel, Gram, 2014].

Beispielhaft wurde für einen Erdwärmesondenabschnitt von 30 cm Höhe eine Berechnung nach der Methode Computational Fluid Dynamics (CFD) für laminare Strömungen unter Verwendung des Bingham-Modells durchgeführt (Abbildung 58). Hierbei wurde die Interaktion zwischen dem Verfüllmaterial und der Bohrlochwandung im Hinblick auf die Abfiltration des Anmachwassers außer Acht gelassen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die abgebildete Modellgeometrie.

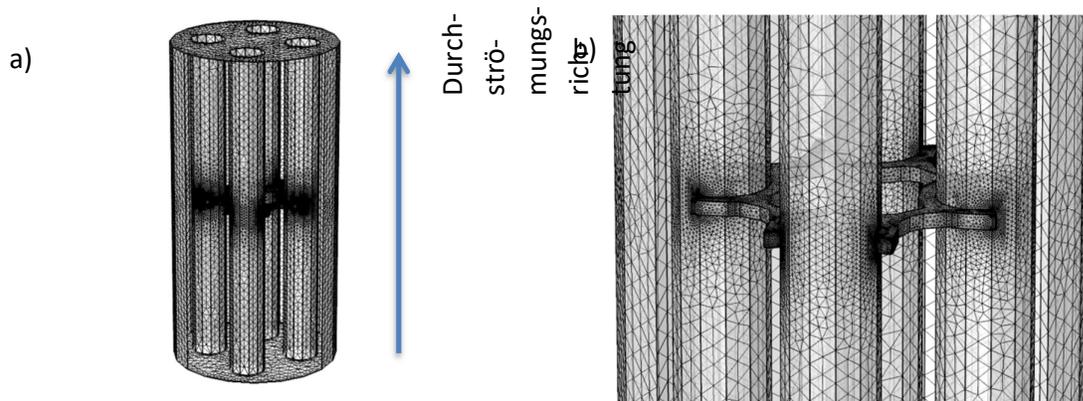


Abbildung 58: a) Übersicht Berechnungsmodell b) Detaildarstellung Abstandhalter und Rohrleitungen

Das abgebildete Modell berücksichtigt eine Doppel-U-Sonde inkl. eines gängigen Abstandhalters zur Gewährleistung der Lagegenauigkeit der Sondenrohre zueinander. Sämtliche Oberflächen werden von dem Verfüllbaustoff umflossen und bieten eine sogenannte Haftbedingung (non slip) für das vorbeiströmende Fluid. Abbildung 59 zeigt die berechnete dynamische Viskosität (Abbildung 59a), die, wenn diese unterhalb der initialen Viskosität (hier: 165 Pa·s) liegt, ein Indiz für sogenannte „dead zones“ also Bereiche sein kann, in die sich die Suspension infolge einer zu geringen Viskosität nicht ausbreiten kann. Des Weiteren zeigt die Abbildung 59b die errechnete Fließgeschwindigkeit bei einer simulierten Einströmgeschwindigkeit 0,1 m/s. Eine Fließgeschwindigkeit unterhalb der Einströmgeschwindigkeit zeigt Bereiche, in denen erforderliche Schergeschwindigkeiten ggf. nicht erreicht werden.

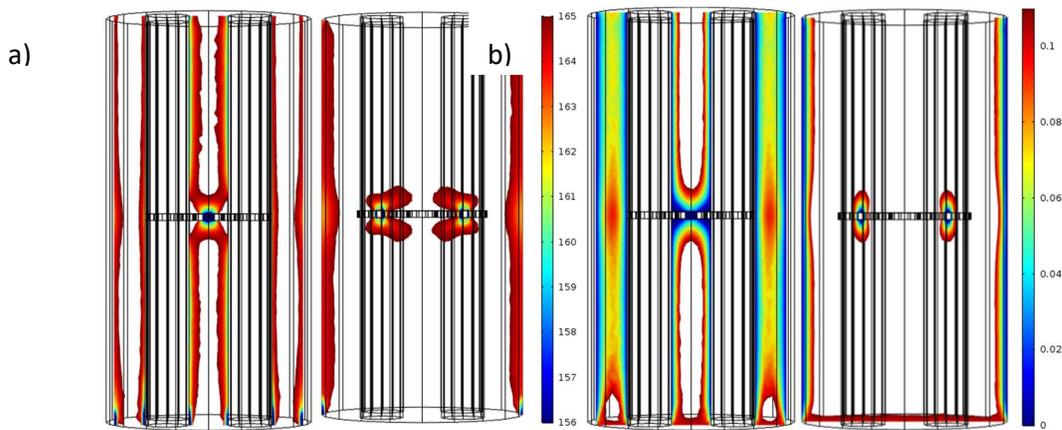


Abbildung 59: a) dynamische Viskosität in [Pa s] (Schnitt durch Rohre und Schnitt durch Bohrerachse), b) Fließgeschwindigkeit [m/s] (Schnitt durch Rohre und Schnitt durch Bohrerachse)

Die hier gezeigten Berechnungsergebnisse dienen der Veranschaulichung der Möglichkeiten einer CFD-Analyse unter Verwendung eines nicht-newton'schen Stoffgesetzes unter sich nicht verändernden Fließeigenschaften durch geänderte Wassergehalte der Suspension. Einflüsse aus sich verändernden Suspensionseigenschaften durch z.B. abfiltriertes Anmachwasser wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Abbildung 60 zeigt wesentlichen Elemente einer Modellbildung zur Simulation des Verfüllvorgangs einer Erdwärmesonde und zeigt, welche Randbedingungen bekannt und modelltechnisch erfassbar sind und für welche weiterer Forschungsbedarf besteht.

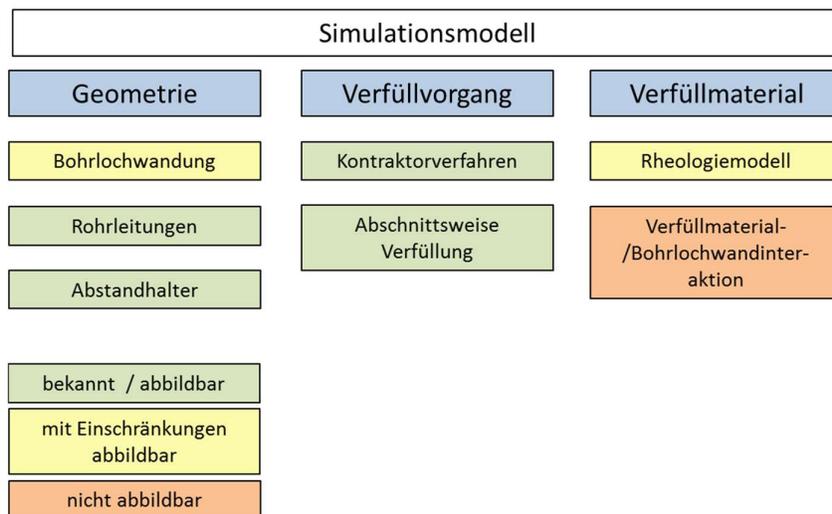


Abbildung 60: Schematische Darstellung der Modellbildung der Verfüllung einer Erdwärmesonde

2.7.9.10 AP 7B – Thermische-mechanische-hydraulische Interaktion von Erdwärmesonden

Als wesentliche Schadensursache während des Betriebs einer Erdwärmesonde kann der sogenannte Frost-Tauwechsel gesehen werden. Um die Temperaturspreizung der Vor- und Rücklaufemperatur des Primärkreislaufes zu vergrößern und damit die Energieextraktion einer Erdwärmesonde zu steigern, werden frostschutzmittelversetzte Wärmeträgerfluide eingesetzt, die eine Beaufschlagung des Primärkreislaufes mit Vorlauftemperaturen unterhalb von 0 °C ermöglichen. Hierdurch kann es

entlang der Erdwärmesonde zum Auffrieren des Verfüllbaustoffes kommen. Hiervon betroffen ist vor allem der obere Bereich einer Sonde, bis der zum Inneren der Erdwärmesonde gerichtete Wärmestrom aus dem umgebenden Boden eine ausreichende Temperaturerhöhung gebracht hat. Auch der Betrieb einer Erdwärmesonde zur Bereitstellung sommerlicher Kühlleistung kann unter Umständen zu Temperaturdehnungen führen, die das Gefüge des Hinterfüllbaustoffes schädigen können.

Grundsätzlich führen Temperaturschwankungen innerhalb von Materialien zu Volumenänderungen und rufen somit innere Spannungen hervor, die durch das Material aufzunehmen sind. Die Größe dieser Spannungen wird durch die Größe der Temperaturänderung, den Ausdehnungskoeffizienten des Materials und die anstehenden Überlagerungsspannungen bestimmt. Werden die aufnehmbaren Spannungen überschritten, kommt es je nach Material zu Plastifizierungen oder zum Bruch des Baustoffes bzw. der Konstruktion.

Im Rahmen des AP 7B wird der Versuchstand des Verbundprojektpartner VEGAS numerisch modelliert und an den vorhandenen Messdaten validiert. Ein wesentlicher Fokus wird hierbei auf die Entwicklung der Temperaturen im Nahbereich der Sonde sowie im Inneren des Verfüllbaustoffes gelegt.

2.7.9.11 Modellbildung

Die Modellbildung des VEGAS-Versuchstandes erfolgt in der Finite-Elemente-Softwarelösung „FeFlow“ in der Version 6.1 als dreidimensionales Modell, bei der eine hydraulisch-thermisch gekoppelte Berechnung der Fließbewegungen und des Wärmetransportes innerhalb eines porösen Mediums möglich ist. Abbildung 61 zeigt das entwickelte Berechnungsmodell in einer perspektivischen Ansicht.

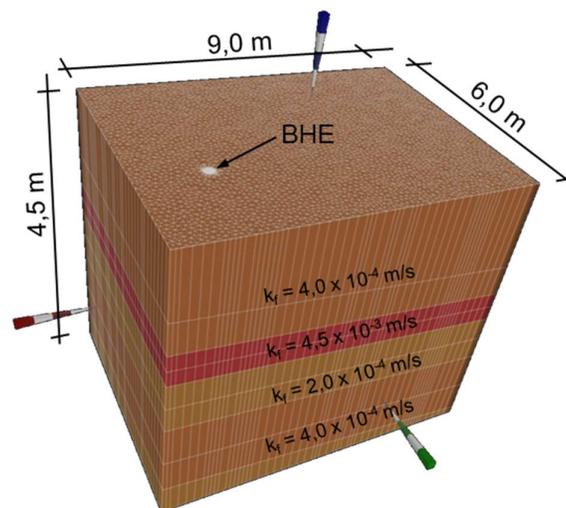


Abbildung 61: 3D-Berechnungsmodell des VEGAS Versuchstands, perspektivisch

Abgebildet wurden zum einen die geschichtete Baugrundsituation, die durch in Richtung des Grundwasserstromes geneigte Sandhorizonte unterschiedlicher Durchlässigkeit gekennzeichnet ist, sowie, je nach Versuchsrandbedingungen, der Grundwasserstrom durch das Modell. Des Weiteren erfolgte eine vollständig dreidimensional durchdiskretisierte Abbildung der Erdwärmesonde, bestehend aus dem Verfüllbaustoff, den Rohrleitungen sowie dem Absorberfluid. Das Computerprogramm FeFlow

6.1 beinhaltet keine CFD-Analyse, so dass die Rohrströmung über einen eindimensionalen Ansatz einer Kanalströmung berücksichtigt wurde.

Die Randbedingungen des numerischen Modells werden an den Seiten sowie an der Oberfläche über die Dauer der gefahrenen Versuche (jeweils 7 Tage) durch konstante Temperaturen sowie an der Modellunterseite durch einen konstanten Wärmestrom gebildet. Die Temperaturrandbedingungen wurden zoniert entsprechend der Versuchsrandbedingungen angesetzt. Die Berücksichtigung der Grundwasserströmung erfolgte über das Anlegen von hydraulischen Druckhöhen an zwei gegenüberliegenden Rändern des Modells. Die Materialeigenschaften des Mehrphasen-Mediums Boden wurden entsprechend der Angaben, die durch die Kollegen der VEGAS gemacht wurden, berücksichtigt (Abbildung 62).

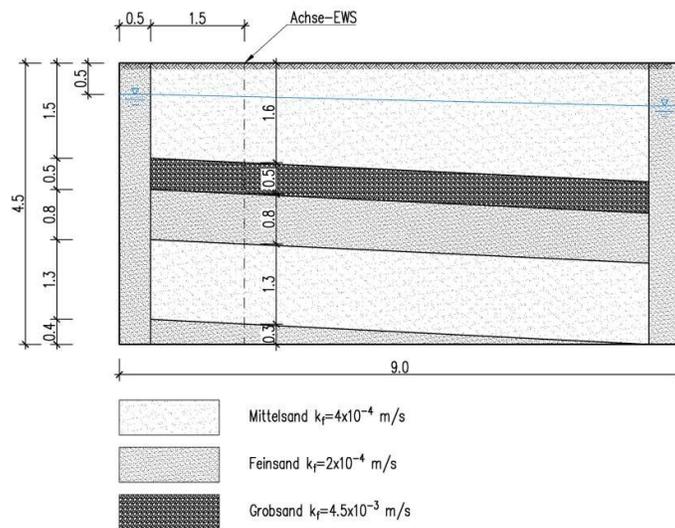


Abbildung 62: Schnitt VEGAS Versuchsstand

Die Auswertung der numerischen Simulationen erfolgt über die Ausgabe der berechneten Temperaturen exakt an den Stellen, an denen im Versuchsstand Temperaturegeber angeordnet sind. Hierzu wurden die Temperaturen innerhalb des numerischen Modells am Ende der Versuchsdauer von 7 Tagen ausgewertet. Eventuell vorhandene aber nicht modellierte Wärmekapazitätsunterschiede zwischen Messgeber und anstehendem Untergrund können, da sich das Experiment am Ende der Versuchsdauer in einem quasi stationären Zustand befindet, vernachlässigt werden.

2.7.9.12 Thermisch-mechanisch-hydraulische Interaktion

Die Simulationsberechnungen der Experimente der VEGAS haben gezeigt, dass eine gekoppelte thermisch-hydraulische Betrachtung der Interaktion zwischen der Erdwärmesonde und dem porösen Medium Boden für den Einfluss der Grundwasserströmung noch nicht zufriedenstellend abgebildet werden konnte. Eine mechanische Beanspruchung des Verfüllmaterials erfolgt wie bereits geschildert vor allem durch den Einfluss von thermisch induzierten Spannungen im Zuge hoher Temperaturdehnungen oder durch ein Auffrieren des Baustoffes. Um diese Beanspruchungen quantifizieren zu können, ist folglich eine genaue Kenntnis der entsprechenden Temperaturverteilung innerhalb des Verfüllbaustoffes erforderlich.

Zur Modellbildung der thermisch-mechanisch-hydraulischen Interaktion einer Erdwärmesonde und

Frost-Tauwechsel Beanspruchung ist zunächst der Schädigungsprozess zu beschreiben. Wasser dehnt sich beim Gefrieren um ca. 9 % aus. Diese Volumenzunahme führt bei einer behinderten Dehnung zu einer Spannungszunahme. „Nach einem Frost-Tauwechsel nimmt der Sättigungsgrad des Betons zu – selbst dann, wenn er zuvor durch kapillares Saugen gesättigt worden ist.“ [Setzer, 2002]. Dieser Vorgang wird als Frostpumpe oder Mikroeislinsepumpe bezeichnet. Für klassische Hochbaubetone wurde festgestellt, dass eine Frostschädigung erst nach mehreren Frost-Tauwechseln stattfindet. Dies ist bei den in [Anbergem et al., 2013] und [Herrmann, 2008] geführten Untersuchungen an Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden nicht zu beobachten. Hier tritt eine wesentliche Gefügestörung bereits nach dem ersten Frost-Tauwechsel ein. Vor diesem Hintergrund besteht hinsichtlich der Schädigungsmechanismen bei Erdwärmesondenverfüllbaustoffen unter Frost-Tauwechselbeanspruchung ein entsprechender Forschungsbedarf.

Hinsichtlich der numerischen Modellierung des Schädigungsprozesses beschreibt [Lin et al, 2014] Untersuchungen auf der Mikroskalenebene. Hierbei werden zur Simulation des Schädigungsprozesses der zementösen Phase 4 Aspekte berücksichtigt: 1. der Phasenübergang innerhalb der Poren, 2. die Porenstruktur der zementösen Phase, 3. Wassermassenbilanz und 4. das mechanische Gleichgewicht der gefrorenen Zementphase. Abbildung 63 illustriert den Ablauf der Simulation der Zementschädigung durch Frostbeanspruchung:

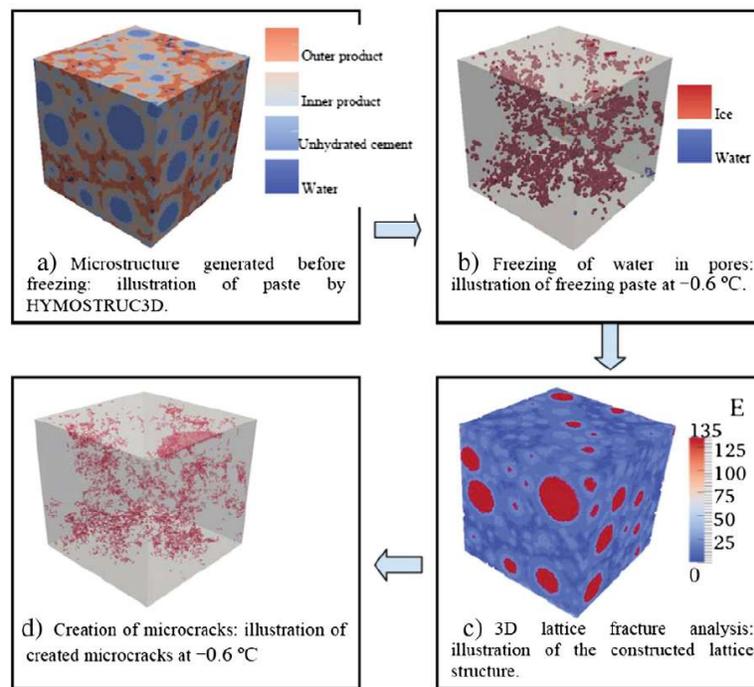


Abbildung 63: Ablauf der Simulation der Zementschädigung durch Frostbeanspruchung nach [Lin et al, 2014]

Sollen die mechanischen Auswirkungen eines Frost-Tauwechsels auf den Verfüllbaustoff einer Erdwärmesonde im Zusammenhang mit den thermischen und hydraulischen Einwirkungen aus dem Betrieb der Erdwärmesonde sowie den Wärmetransportmechanismen des umgebenden Mehr-Phasensystems Boden abgebildet werden, ist die Beschreibung des thermisch induzierten Schädigungsprozesses auf der für die anderen physikalischen Prozesse relevante Skala zu bringen.

2.7.9.13 Simulationsrechnungen

Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurden zwei ausgewählte Versuchsdurchführungen numerisch simuliert:

Tabelle 8: Simulierte Versuchsdurchführungen

Experiment	Dauer	Vorlauftemperatur Sonde	Volumenstrom Sonde	Grundwasserstrom
	[d]	[°C]	[l/h]	[m/d]
1	7 Tage	0 (konstant)	1850 (konstant)	0
5	7 Tage	-5 (konstant)	1420 (konstant)	2,5

Zur Validierung des Berechnungsmodells wurden zum einen die errechneten mit den gemessenen Bodentemperaturen, zum anderen die Temperaturen im Bereich der Erdwärmesonde miteinander verglichen. Abbildung 64 zeigt die im Versuchsboden angeordneten Messgeber in einer perspektivischen Darstellung, in der Draufsicht sowie den Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen zum Ende des Experiments 1.

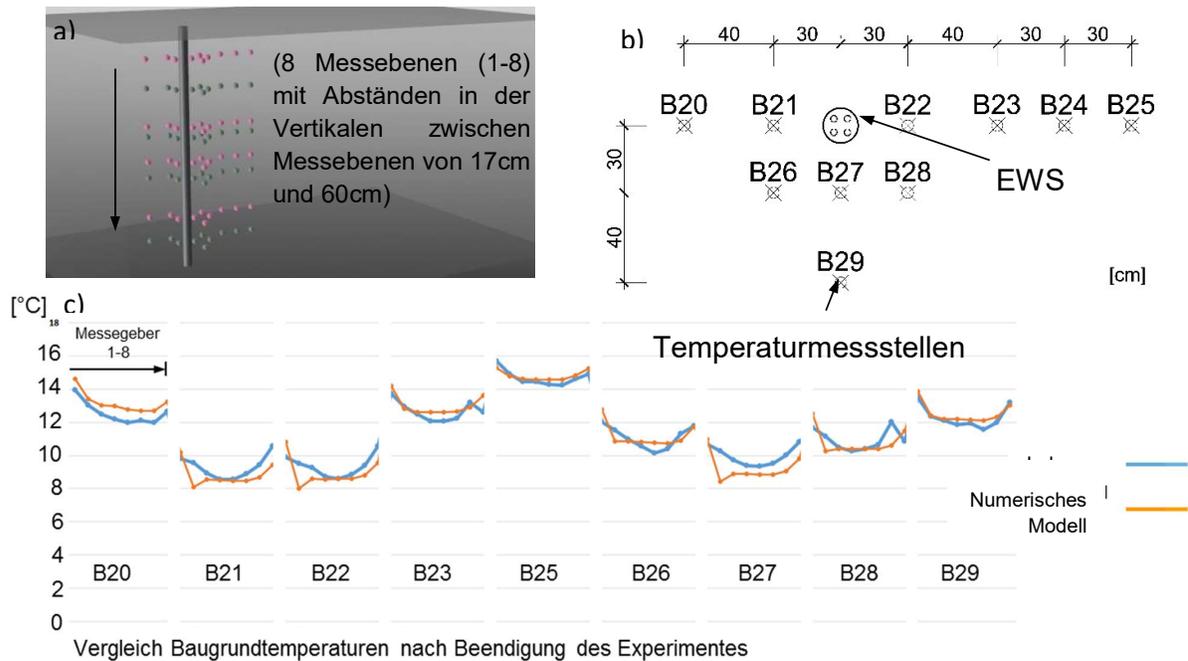


Abbildung 64: Anordnung Messgeber in Versuchsboden Experiment VEGAS, c) Vergleich Messergebnisse Bodentemperaturen mit Berechnungsergebnissen am Ende des Experiments 1

Das numerische Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Bodentemperaturen des Experimentes 1. Deutlich zu erkennen ist der an der Grundfläche des Versuchstandes wirkende aufwärtsgerichtete Wärmestrom, der vor allem die Temperaturen der Messgeber der Messebenen 7 und 8 anhebt.

Die folgende Abbildung 65 zeigt die gemessenen und berechneten Temperaturen für das Experiment 1 innerhalb des Verfüllbaustoffes.

Messergebnis
Numerische Berechnung

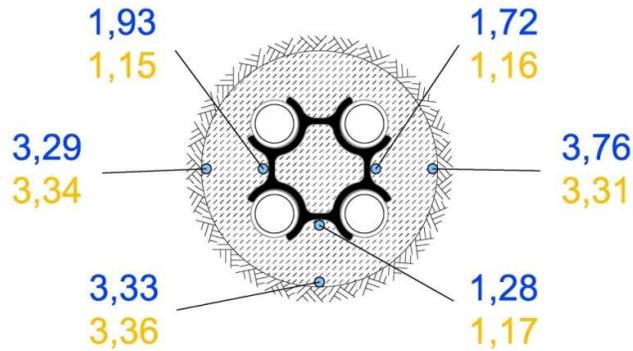


Abbildung 65: Vergleich Messergebnisse Verfüllung mit Berechnungsergebnissen am Ende des Experiments 1 in °C

Die berechneten Temperaturen innerhalb des Verfüllbaustoffes decken sich gut mit den am Ende des Experiments 1 gemessenen Temperaturen an den entsprechenden Stellen. Das Experiment 1 wurde ohne gerichtete Grundwasserströmung gefahren. Die Wärmetransportmechanismen im porösen Medium Boden sind also im Wesentlichen, mit Ausnahme eventueller freier Konvektion entlang des Verfüllkörpers, durch Wärmeleitung geprägt.

Im Gegensatz hierzu zeigt Abbildung 66 den Vergleich der berechneten mit den gemessenen Temperaturen im Bereich des Verfüllbaustoffes für das Experiment 5, bei dem eine Filtergeschwindigkeit des Aquifers von 2,5 m/d eingestellt wurde.

Messergebnis
Numerische Berechnung

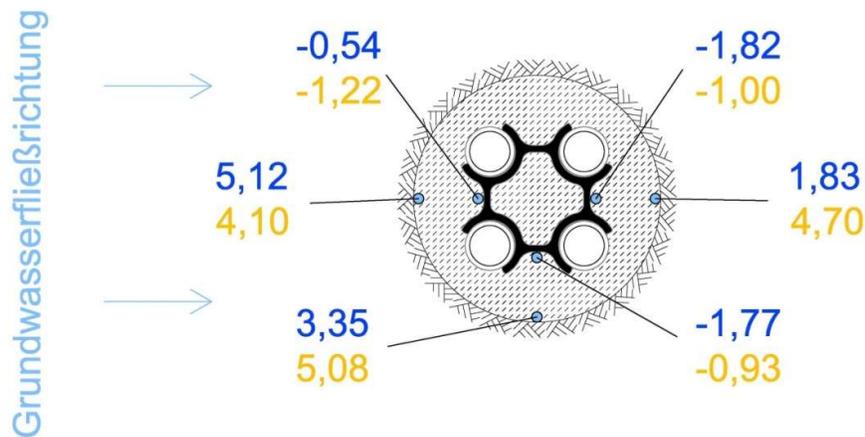


Abbildung 66: Vergleich Messergebnisse Verfüllung mit Berechnungsergebnissen am Ende des Experiments 5 in °C

Über den gesamten Bereich des Verfüllbaustoffes liegen die berechneten und gemessenen Temperaturen im Vergleich zu den Ergebnissen des Experiments 1 weiter voneinander entfernt. Konvektive Wärmeübergangsmechanismen lassen sich auf Basis der bisherigen Simulationsergebnisse augenscheinlich nicht hinreichend genau abbilden. Hier wird ein entsprechender Forschungsbedarf gesehen.

2.7.10 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Der Ergebnis- und Forschungstransfer erfolgt über die nachfolgend beschriebenen Wege:

- Wissenstransfer an Studierende der Universität Stuttgart im Rahmen der Vorlesung „Geothermie I+II“ im Modul Umweltgeotechnik.
- Wissenstransfer im Rahmen von bereits durchgeführten Präsentationen (siehe nachfolgender Punkt) und weiteren geplanten Veröffentlichungen.
- Die Untersuchungen zur Druckfestigkeit und zum Fließverhalten von Hinterfüllbaustoffen im Kontakt mit dem umgebenden Boden können als Grundlage für weiterführende Untersuchungen im Hinblick auf die Qualitätssicherung bei der Herstellung von Erdwärmesondenverfüllungen dienen. In diesem Zusammenhang ist auch eine realistische Beschreibung der Interaktion von Verfüllmaterial und Bohrlochwandung zu entwickeln. Ggf. sind hier entsprechende Kooperationen mit Forschungsinstituten zum Materialverhalten von Frischbeton/-suspensionen und den Herstellern von Verfüllbaustoffen anzustreben.
- Es wird angestrebt, weitere Untersuchungen zur hydraulisch-thermischen Interaktion von Erdwärmesonden mit dem anstehenden Untergrund unter dem Einfluss von Grundwasserströmungen im Rahmen der aktuellen Forschung am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart durchzuführen.

2.7.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Im Rahmen der Bearbeitung des AP 7A erfolgte die Erstellung einer Bachelorarbeit am Institut für Geotechnik, welche die Randbedingungen zur Herstellung einer Erdwärmesonde und mögliche Berechnungsmethoden zusammenfasst.

Derzeit wird im Rahmen einer Masterarbeit am Institut für Geotechnik die mechanisch-thermisch-hydraulische Interaktion der Erdwärmesonde mit dem umgebenden Untergrund weiter untersucht. Hierbei wird auf die bisherigen Simulationsberechnungen mit dem Computerprogramm „FeFlow“ aufgebaut. Ergänzend wird für die mechanisch gekoppelten Berechnungen das Computerprogramm „Comsol Multiphysics“ zum Einsatz kommen.

Jeweilige Zwischenstände des Bearbeitungsstandes der Arbeitspakete 7A und 7B wurden im Rahmen der Statuskolloquien vom 25./26. Februar 2015 sowie vom 03./04. Februar 2016 in Karlsruhe vorgestellt.

Die Veröffentlichung der Ergebnisse zum Vorgang der Bohrlochverfüllung ist in Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Institut für das Jahr 2016 geplant.

Detailaspekte zur hydraulisch-thermischen Interaktion zwischen der Erdwärmesonde und umgebenden Untergrund werden voraussichtlich auf der Energy Geotechnics ICEGT 2016 präsentiert.

2.7.12 Literatur

- [Anbergem et al., 2013] Anbergem, H. ; Frank, J. ; Müller, L. ; Sass, Ingo: *Frost-Tau-Wechselwiderstandsfähigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden*. Geothermische Energie, Heft 75, 2013, S. 18–19.
- [Arslan, Huber, 2013] Arslan, Ulvi ; Huber, Heiko: *Untersuchungen zum Wärmetransport-verhalten oberflächennaher durchströmter Böden*. Bautechnik 90, Nr. 9, 2013, S. 580–584.
- [Borinaga et al., 2014] Borinaga-Treviño, R. ; Pascual-Muñoz, P. ; Ángel Calzada-Pérez, M. ; Castro-Fresno, D.: *Freeze–thaw durability of cement-based geothermal grouting materials*. Construction and Building Materials 55, 2014, S. 390–397.
- [DGGT, DGG, 2013] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. (DGG): *Empfehlung Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung* - EA Geothermie. 1st. Berlin : Ernst & Sohn, 2013.
- [Hähnlein et al., 2010] Hähnlein, Stefanie ; Molina-Giraldo, Nelson ; Blum, Philipp ; Bayer, Peter ; Grathwohl, Peter: *Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden*. Grundwasser 15, Nr. 2, 2010, S. 123–133.
- [Haist, 2010] Haist, M.: *Berechenbare Frischbetoneigenschaften* (BetonForum 2010). Rüderdorfs, 16.11.2010.
- [Herrmann, 2008] Herrmann, Verena Johanna: *Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden*. Karlsruhe, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Angewandte Geologie. Dissertation. 11/2008.
- [Lin et al, 2014] Lin, L.; Wu, S.; Chen, H. ; Haitao, H. : *Numerical investigation of the effects of freezing on micro-internal damage and macro-mechanical properties of cement pastes*. Cold Regions Science and Technology 106–107, 2014, S. 141–152.
- [Niederbrucker, Steinbacher, 2007] Niederbrucker, R. ; Steinbacher, N.: *Eignungsprüfung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden*. Linz, Oktober 2007.
- [Riegger et al., 2013a] Riegger, M.; Hochmuth, S. (Mitarb.); Werner, M. (Mitarb.) : *EWSplus Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden : Weiterentwicklung der Erdwärmesondentechnik*. Stuttgart, 10.09.2013.
- [Riegger et al., 2013b] Riegger, M.; Hochmuth, S.; Werner, M.: *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben EWSplus - Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technik*. 2013.
- [Rolker, Riegger, 2014] Rolker, J.; Riegger, M.: *EWS-tech: Projektübersicht und erste Ergebnisse zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden*. Der Geothermiekongress DGK, Essen, 2014.
- [Roussel, Gram; 2014] Roussel, Nicolas; Gram, Annika: *Simulation of fresh concrete flow* : State-of-

the art report of the RILEM technical committee 222-SCF. Dordrecht, New York : Springer, 2014 (RILEM state-of-the-art reports volume 15).

[Ruch, Wirsing, 2013] Ruch, Clemens ; Wirsing, Gunther: *Erkundung und Sanierungsstrategien im Erdwärmesonden-Schadensfall Staufen i. Br.* Geotechnik 36, Nr. 3, 2013, S. 147–159.

[Sass, Burbaum, 2012] Sass, Ingo ; Burbaum, Ulrich: *Geothermische Bohrungen in Staufen im Breisgau: Schadensursachen und Perspektiven.* Geotechnik 35, Nr. 3, 2012, S. 198–205.

[Setzer, 2002] Setzer, M. J.: *Frostschaden Grundlagen und Prüfung.* Beton- und Stahlbetonbau 97, Nr. 7, 2002, S. 350–359.

[Shyshko, 2013] Shyshko, Sergiy: *Numerische Simulation des rheologischen Verhaltens von Frischbeton.* Dresden, Technischen Universität Dresden. Dissertation. Juni 2013.

[VDI 4640, 2015] VDI 4640-2: *Thermische Nutzung des Untergrundes -Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.* Düsseldorf, 2015

[Yang et al., 2015] Yang, R. ; Lemarchand, E. ; Fen-Chong, T. ; Aza Azouni: *A micromechanics model for partial freezing in porous media.* In: International Journal of Solids and Structures 75–76, 2015, S. 109–121.