

Umweltforschung in Baden-Württemberg

Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums  
Umweltforschung Baden-Württemberg 2018

19./20. April 2018  
Schwabenlandhalle Fellbach  
Guntram-Palm-Platz 1, 70734 Fellbach

**EWS-TECH II:  
ENTWICKLUNG ÜBERPRÜFBARER  
QUALITÄTSKRITERIEN FÜR  
ERDWÄRMESONDEN-VERFÜLLUNGEN  
UNTER REALITÄTSNAHEN  
RANDBEDINGUNGEN**

von

Mathieu Riegger  
Solites

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige  
thermische Energiesysteme

Hagen Steger, Ingrid Stober & Luisa Bienstein  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Michael Haist, Nico Herrmann, Petra Schlager, Moritz Zemann & Julian Link  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe)

Roman Zorn, Petra Huttenloch & Olaf Ukelis  
EIFER (European Institute for Energy Research)

Förderkennzeichen: L75 16008-16011

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

## INHALT

1. Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens.....	1
2. Englische Kurzfassung.....	1
3. Aktueller Stand der Forschung.....	2
3.1. Arbeitspaket A: Ermittlung geotechnischer Randbedingungen sowie Auswahl und Entwicklung der zu untersuchenden Verfüllbaustoffmischungen.....	2
3.1.1. A1: Erhebung von hydrogeologischen Eingangsparametern für das geplante theoretische Modell zu Druckluftbohrungen und für die Versuche bei Grundwasserströmung und bei Druckluftbeaufschlagung .....	2
3.1.2. A2: Eignungsversuche an Dotiermaterial .....	3
3.1.3. A3: Entwicklung von Referenzmischungen mit definierten Eigenschaften.....	4
3.2. Arbeitspaket B: Mechanismen der Fehlstellenbildung .....	5
3.2.1. B1: Visualisierung des Verfüll- und Aushärtvorgangs von Erdwärmesonden in Technikumsversuchen zur Bewertung der Verfüllqualität verschiedener Grundwasserströmungsszenarien.....	5
3.2.2. B2: Einfluss der Bohrlochtopographie und von Grundwasserbewegungen auf die Fehlstellenbildung und die Systemdichtigkeit.....	7
3.2.3. B3: Realmaßstabsversuche zur Bewertung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden unter dem Einfluss größenmaßstäblich realistischer Grundwasserstockwerksverbindungen	8
3.2.4. B4: Einfluss des Grundwasserflusses auf das Hinterfüllmaterial im Bohrloch .....	8
3.3. Arbeitspaket C: Messtechnische Bewertung des Verfüllerefolgs.....	8
3.3.1. C1: Überprüfung der Verfüllqualität anhand der magnetischen Suszeptibilität .....	9
3.3.2. C2: Technikumsversuche zur automatischen Füllstandskontrolle von Erdwärmesonden.....	12
3.4. Arbeitspaket D: Machbarkeitsstudie zur Bewertung der Langzeitintegrität.....	12
3.4.1. D1: Reaktivität und Reaktionskinetik von Verfüllbaustoffen im Kontakt mit Gipskeuper	12
3.4.2. D2: Weiterentwicklung und Bau einer Simulationszelle zur experimentellen Bestimmung der Quelldrücke .....	13
3.4.3. D3: Korrosionsversuche Magnetit im Milieu zementgebundener Verfüllbaustoffe .....	13
4. Literatur .....	14

## AUTOREN DES ZWISCHENBERICHTS ZU DEM VERBUNDFORSCHUNGSVORHABEN

### EWS-TECH II



Solites (Projektkoordinator)  
Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige  
thermische Energiesysteme  
Dipl.-Ing. Mathieu Riegger,  
M.Sc. Julian Rolker  
Meitnerstr. 8  
70563 Stuttgart



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)  
Dr. Hagen Steger,  
Prof. Dr. Ingrid Stober,  
M.Sc. Luisa Bienstein  
Adenauerring 20b, Geb. 50.40  
76131 Karlsruhe



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe)  
Dr.-Ing. Michael Haist,  
Dr.-Ing. Nico Herrmann,  
Dipl.-Geol. Petra Schlager,  
Dr. Moritz Zemann,  
M.Sc. Julian Link  
Gotthard-Franz-Str. 3  
76131 Karlsruhe



EIFER (European Institute for Energy Research)  
Dr. Roman Zorn,  
Dr. Petra Huttenloch,  
Dipl.-Geol. Olaf Ukelis  
Emmy-Noether-Str. 11  
76131 Karlsruhe

## 1. KURZBESCHREIBUNG DES FORSCHUNGSVORHABENS

Das Verbundvorhaben EWS-tech II zielt auf Qualitätsverbesserungen bei der Erstellung von Erdwärmesonden, die vor dem Hintergrund aktueller Forschungsergebnisse und der vorliegenden, im Zusammenhang mit der Erstellung von Erdwärmesonden insbesondere in Baden-Württemberg aufgetretenen Schadensfälle dringend erforderlich sind. Die Analyse der aufgetretenen Schadensfälle zeigt, dass stockwerksübergreifende Bohrungen, die Grundwasserleiter unterschiedlicher Druckpotentiale verbinden und nicht durch eine adäquate Verfüllung abgedichtet werden, als besonders kritisch einzustufen sind. Daher bilden Untersuchungen zum Einfluss von Grundwasserflüssen auf die Verfüllqualität von Erdwärmesonden einen der Schwerpunkte des Forschungsvorhabens EWS-tech II.

Hierzu werden drei sich ergänzende Versuchsaufbauten eingesetzt, so dass durch die Visualisierung und durch die quantifizierte Erfassung des Verfüll- und Aushärtvorgangs bei verschiedenen ausgeprägten Grundwasserströmungen sowie durch die Berücksichtigung der Bohrlochgeometrie/-rauigkeit und größenmaßstäblich realistischer Grundwasserstockwerksverbindungen eine umfassende Bewertung möglich wird. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, einen kausalen, quantifizierten Zusammenhang zwischen Fehlstellen (wassergefüllte Bereiche in der Verfüllung) und der Systemdichtigkeit von Erdwärmesonden abzuleiten.

Bei den geplanten Versuchen werden vorzugsweise vier im Rahmen dieses Vorhabens neu entwickelte, magnetisch dotierte Referenz-Verfüllbaustoffe mit möglichst unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften und der Verfüllqualität zu untersuchen und somit Kriterien für möglichst günstige Baustoffeigenschaften ableiten zu können. Die magnetische Dotierung der Verfüllbaustoffe ermöglicht es, die seit kurzem auf dem Markt verfügbaren miniaturisierten Suszeptibilitätsmesssonden auf Ihre Eignung für eine automatische Abdichtungsüberwachung des Verfüllvorgangs sowie eine Nachmessung zur Bestimmung der Verfüllqualität zu untersuchen. In Verbindung mit intensiven Untersuchungen an magnetisch dotierten Verfüllbaustoffen werden daraus Mindestanforderungen an die Dotierung und an die zugehörigen Überwachungstechniken des Verfüllvorgangs sowie an Langzeitüberwachungstechniken abgeleitet.

Darüber hinaus werden in dem Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech II Untersuchungen durchgeführt, welche die Reaktionskinetik von Verfüllbaustoffen mit sulfathaltigem Gestein beinhalten und außerdem die Auswirkung von Quellvorgängen auf die Systemdichtigkeit des Systems Anhydrit-Verfüllbaustoff untersuchen.

Aus den genannten Untersuchungsaspekten werden Anforderungskriterien an EWS-Verfüllbaustoffe abgeleitet, die in einem Empfehlungskatalog zusammengeführt werden.

## 2. ENGLISCHE KURZFASSUNG

The joint research project EWS-tech II aims at quality improvements of borehole heat exchanger groutings. In the light of the damages which occurred in Baden-Württemberg in the last years caused by borehole heat exchangers the project focuses on the influence of groundwater flow on the grouting quality. For an extensive evaluation of this influence small-scale experiments (6 m) are performed to visualize the grouting and hydration process of borehole heat exchangers. Fur-

thermore real-scale grouting experiments (30 m) with real-size short-circuits of groundwater aquifers are done. Additional experiments are performed in a borehole simulator (5 m) with different borehole wall topographies, in order to quantify the effect of groundwater flow on system tightness of borehole heat exchangers.

Another focuses lie on extensive studies on the magnetic doping and the magnetic susceptibility of borehole heat exchanger grouting materials. Requirements for the magnetic doping and for susceptibility measuring probes are derived from these studies.

In addition, basic knowledge is gained in the project on the long-term integrity of borehole heat exchangers in areas with swelling rock and on the impact of drilling methods using compressed air (e.g. down the hole hammer) on the grouting quality of borehole heat exchangers.

Based on the aspects of the analyses described above requirement criteria for borehole heat exchanger grouting materials are derived, which can e.g. be used in technical or official regulations.

### 3. AKTUELLER STAND DER FORSCHUNG

Nachfolgend werden für die einzelnen Arbeitspakete die wesentlichen im Berichtszeitraum erreichten Fortschritte dargelegt.

#### 3.1. Arbeitspaket A: Ermittlung geotechnischer Randbedingungen sowie Auswahl und Entwicklung der zu untersuchenden Verfüllbaustoffmischungen

##### 3.1.1. A1: Erhebung von hydrogeologischen Eingangsparametern für das geplante theoretische Modell zu Druckluftbohrungen und für die Versuche bei Grundwasserströmung und bei Druckluftbeaufschlagung

Das Arbeitspaket A1 ist ein zentrales Arbeitspaket, das einen wesentlichen Input für die umfangreichen praktischen und theoretischen Untersuchungen liefert. Das Arbeitspaket befasste sich daher zunächst mit den hydrogeologischen Randbedingungen von Schadensfällen in Baden-Württemberg, wobei die „Schäden“ gemäß LQS EWS (2011) definiert wurden. Zu den tatsächlich im Zusammenhang mit Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg entstandenen Schadensfällen gehören demnach (Grimm et al. 2014):

- 2 Schadensfälle infolge Anbohrens von artesisch gespannten Grundwassers (Tettngang, Ravensburg),
- 3 Schadensfälle durch im Bohrloch aufsteigende Wässer in Anhydrit führende, tonige Schichten mit Quellvorgängen in Folge (Staufen, Rudersberg, Böblingen) und
- 4 Schadensfälle infolge Verbindens zweier Grundwasserleiter mit unterschiedlichem hydraulischen Potential, wobei bei einem Schadensfall vermutlich aufsteigende Wässer zu einer verstärkten Hohlräumbildung führten (Wurmlingen) und bei 3 Schadensfällen mit absteigenden Wässern im Bohrloch zu Setzungen im oberen Grundwasserleiter (Schorn-dorf, Leonberg, Renningen)

Soweit die Datenlage verfügbar war, wurden die hydraulischen Eckdaten dieser Schadensfälle zusammengetragen und durch allgemeine Informationen von Bohrfirmen, die Arteser in der Vorbergzone des Schwarzwaldes erbohrten, ergänzt. Zu den zusammengetragenen hydraulischen Eckdaten gehören: Tiefenlage des Anbohrens des Artesers, anfängliche Schüttungsraten sowie

Abnahme der Schüttung in der Zeit, anfänglicher artesischer Druck sowie Abnahme des Druckes in der Zeit, Durchlässigkeiten des ku/mo-Aquifers (Angabe von Pumpraten und Druckabsenkungen) sowie Zusammenstellung von Potentialdifferenzen zwischen kurzgeschlossenen Aquiferen.

### 3.1.2. A2: Eignungsversuche an Dotiermaterial

Das Arbeitspaket A2 umfasst die Analyse kommerzieller Magnetite und die Quantifizierung deren magnetischer Suszeptibilität beim Einsatz als Dotiermaterial in Verfüllbaustoffen. Diese wurde in Zusammenarbeit zwischen KIT und EIFER durchgeführt. Die Partikelgrößenverteilung der aufbauend auf einer Marktrecherche beschafften Magnetite sowie die magnetische Suszeptibilität der reinen Magnetite sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

Anhand der Partikelgrößenverteilung wurden die Magnetite in drei Klassen mit feiner (Mg4), mittlerer (Mg 1, Mg2, Mg5, Mg6, Mg8 & Mg9) und grober (Mg3 & Mg7) Partikelgröße eingeteilt. Für eine detailliertere Untersuchung wurden die Magnetite Mg3, Mg4 und Mg8 ausgewählt, da diese eine hohe magnetische Suszeptibilität besitzen und jeweils einen Partikelgrößenbereich repräsentieren. Die drei ausgewählten Magnetitproben stammen aus demselben Abbaugelände, sodass der Chemismus des Ausgangsgesteins keinen Einfluss auf weitere Untersuchungen besitzt. Die ausgewählten Magnetite wurden in verschiedenen Dosierungen mit dem für die Referenz-Verfüllbaustoffe ausgewählten Zement trocken homogenisiert und mit Wasser zu einer Magnetit-Zement-Suspension angemischt. Die Aushärtung erfolgte in zylindrischen Schalungen, um eine Analyse der magnetischen Suszeptibilität mittels des Bartington MS2C Core Logging Sensors zu ermöglichen. Die Messwerte sind in Abbildung 3-2 aufgetragen und zeigen die höchste magnetische Suszeptibilität bei einer mittleren Korngröße auf. Die Partikelgrößenverteilung der mittleren Korngröße ist der des verwendeten Zements sehr ähnlich, sodass einer Sedimentation des Magnetits in der Referenz-Verfüllbaustoffesuspension entgegengewirkt wird. Die mittlere Korngröße (Mg9) wurde aus diesen Gründen für die Herstellung der Referenz-Verfüllbaustoffe ausgewählt.

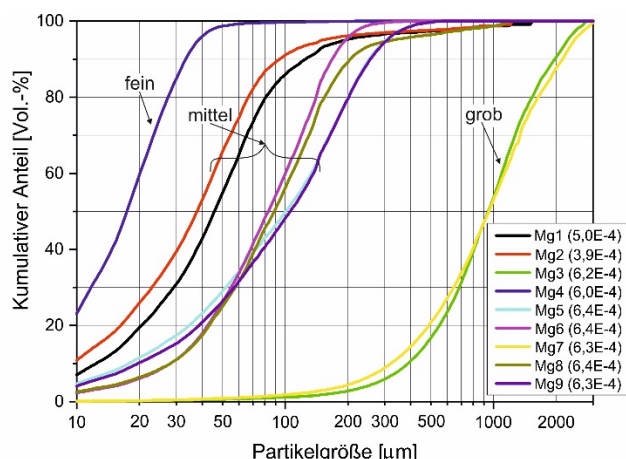


Abbildung 3-1: Partikelgrößenanalyse der Magnetite mittels CamSizer. Die geklammerten Werte in der Legende zeigen die magnetische Suszeptibilität der reinen Magnetite [-]. Die Suszeptibilität wurde mittels Bartington MS2B Sensor gemessen.

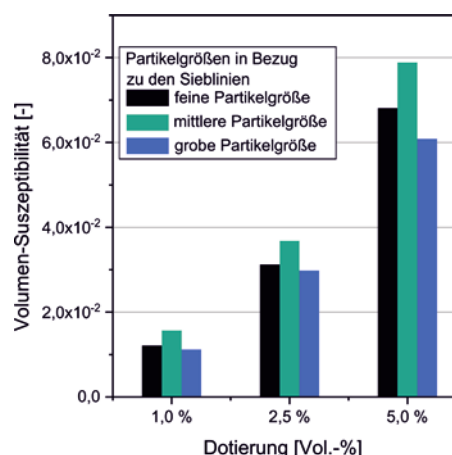


Abbildung 3-2: Analyse der magnetischen Suszeptibilität bei zylindrischen dotierten Zementsteinproben mittels Bartington MS2C CoreLogger.

### 3.1.3. A3: Entwicklung von Referenzmischungen mit definierten Eigenschaften

Zielsetzung von AP A3 war die Entwicklung von Suspensionen mit definierten rheologischen Eigenschaften am KIT. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die relevanten Eigenschaften sowie die Zusammensetzung der entwickelten Mischungen.

Tabelle 1: Eigenschaften der entwickelten 4 Mischungen sowie Rezeptur der einzelnen Mischungen.

Mischungen	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
Rheologische Eigenschaften der Mischungen	Hohe Fließgrenze	Hohe Thixotropie	Niedrige Fließgrenze Hohe Entmischung	Niedrige Fließgrenze Niedrige Entmischung Geringe Thixotropie
Rezeptur (1l Suspension)				
Zement [g]	215	215	215	215
Quarzmehl [g]	178	178	178	178
Quarzsand [g]	1100	1100	1100	1100
Magnetit [g]	58	58	58	58
Wasser [g]	439	439	439	439
Fließmittel [g]	0	0,64	0,59	0,43
Stabilisator [g]	0,21	2,14	0	0,75

Die rheologischen Eigenschaften der Suspension werden durch die Betonzusatzmittel Fließmittel und Stabilisierer eingestellt. Die Ausgangsstoffe für die Referenz-Verfüllbaustoffe sind Zement, Quarzmehl und Quarzsand. Die Dosierung der Ausgangsstoffe wurde in einer ersten Versuchsreihe optimiert, um eine hohe Packungsdichte und somit eine hohe Dichtheit zu erreichen. Durch die Variation des Phasengehaltes wurde ein Optimum zwischen Verarbeitbarkeit und Entmischungsresistenz des Baustoffs erzielt. Der Einfluss der Dosierung beider Zusatzmittel auf die rheologischen Eigenschaften wurde in einer dritten Versuchsreihe quantifiziert. Nach einer Feinabstimmung der Additive wurden vier Mischungsrezepturen bereitgestellt. Die detaillierten

Rezepturen sind in Tabelle 1 aufgelistet und wurden Anfang September 2017 den Projektpartnern vorgestellt. Alle Mischungen wurden auf Absetzmaß, Dichte, Ausbreitmaß, Marsh-Zeit, Fließgrenze (Kugelharte), Fließgrenze (Rheometer), Viskosität sowie Thixotropie hin untersucht. Exemplarisch ist das Absetzmaß, die Fließgrenze (Rheometer) sowie die Thixotropie der Mischungen in Abbildung 3 dargestellt. Diese spiegeln die gewünschten Anforderungen an die Mischungen gut wider (vergleiche Tabelle 1).

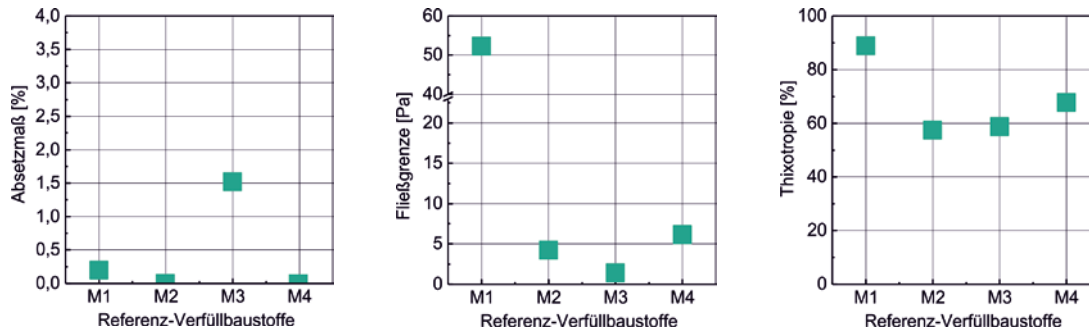


Abbildung 3-3: Absetzmaß, Fließgrenze (Rheometer) und Thixotropie der Referenz-Verfüllbaustoffe.

### 3.2. Arbeitspaket B: Mechanismen der Fehlstellenbildung

#### 3.2.1. B1: Visualisierung des Verüll- und Aushärtevorgangs von Erdwärmesonden in Technikumsversuchen zur Bewertung der Verfüllqualität verschiedener Grundwasserströmungsszenarien

Das Arbeitspaket B1 befasst sich schwerpunktmäßig mit Untersuchungen der Verfüllung von Erdwärmesonden bei stockwerksübergreifenden Bohrungen in einem transparenten, 6 m hohen Technikumsversuchsaufbau.

Als Grundlage dieser Untersuchungen wurde im Zeitraum des vorhergehenden Zwischenberichts im Zuge einer Masterarbeit (Ring 2016) eine Recherche zu Druckpotentialen und Volumenströmen zweier verbundener Grundwasserleiter durchgeführt. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde zudem eine Methode entwickelt, mit der die reell auftretenden Druckverhältnisse versuchstechnisch mit Hilfe einer Skalierung im Technikumsmaßstab nachgebildet werden können. Der im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelte und für erste Vorversuche eingesetzte Versuchsaufbau wurde im Zeitraum des vorliegenden Berichts finalisiert, so dass ab März 2018 die geplanten Untersuchungen mit den vier in Arbeitspaket A3 entwickelten Referenz-Verfüllbaustoffen durchgeführt werden können. Die Skalierung und der finalisierte Versuchsaufbau werden nachfolgend erläutert. Als Grundlage der Skalierung dient die Vorgabe der vom Land Baden-Württemberg veröffentlichten Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS) (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2015), die in Bezug auf das Abdichten mehrerer Grundwasserstockwerke eine stockwerksbezogene Abdichtung vorschreibt. Für die versuchstechnische Nachbildung eines aufsteigenden Grundwasserleiters wird nur der untere Grundwasserleiter betrachtet und es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass das Grundwasser im Bohrloch von unten nach oben strömt und drucklos in einen oberen ungesättigten Aquifer eindringt. Diese Herangehensweise beschreibt ein Worst-Case Szenario, da mögliches Grundwasser im oberen Aquifer einen zusätzlichen hydraulischen Druck auf den unteren Grundwasserleiter aufbringen und den Verfüllvorgang somit begünstigen würde. Der Versuchsaufbau



kommt somit einem artesischen Auslauf gleich. Die Skalierung zwischen reeller Bohrungen und dem Technikumsmaßstab erfolgte unter Beibehaltung der Größen- und Druckverhältnisse (siehe Abbildung 3-4), während die Grundwasservolumenströme ohne Umrechnung von der realen Bohrung auf den Versuchsaufbau übertragen werden können.

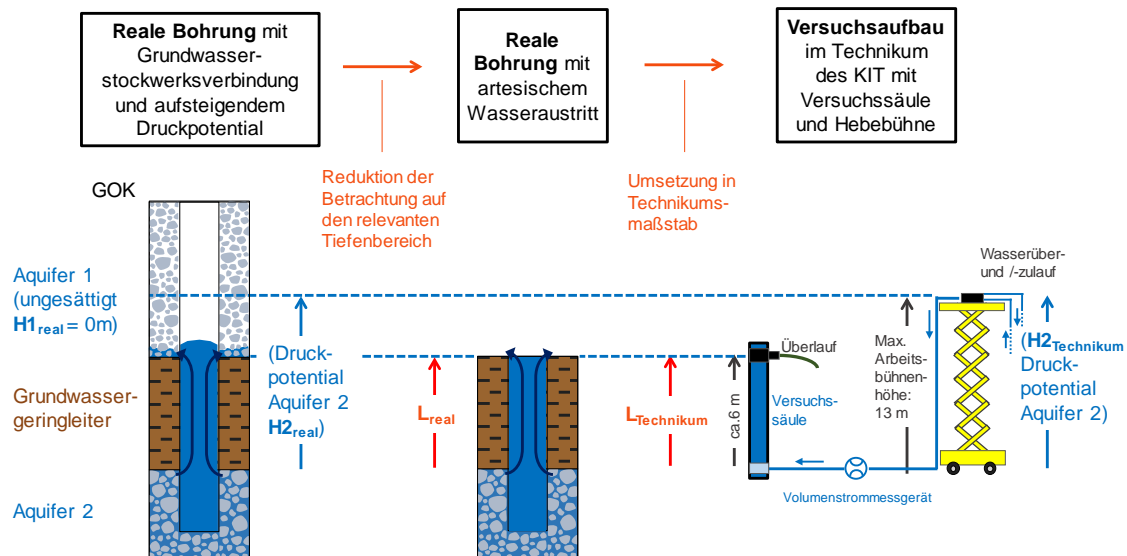


Abbildung 3-4: Skalierung realer Druckbedingungen in den Technikumsmaßstab

In Abbildung 3-5 sind Fotos des finalisierten Versuchsaufbaus dargestellt, mit dem das Zuströmen eines Grundwasserleiters versuchstechnisch nachgebildet werden kann. Der finalisierte Versuchsaufbau weist den Vorteil auf, dass die Druck- und Volumenstromrandbedingungen des simulierten Grundwasserleiters losgelöst voneinander eingestellt werden können. Bei der Versuchsdurchführung wird hierfür ein Wasserbehälter, der auf einer in der Höhe verstellbaren Scherarbeitenbühne befestigt ist, auf eine definierte Höhe gefahren, von dem eine groß dimensionierte Wasserleitung (mit geringem Druckverlust) über ein einstellbares Drosselventil zur Versuchssäule führt. Der Versuchsaufbau wurde so konzipiert, dass die Anlage auch für die anstehenden Realmaßstabsversuche (siehe Arbeitspaket B3) eingesetzt werden kann.

Um die Scherarbeitenbühne in der beschriebenen Form einsetzen zu können, war unter anderem aufgrund der herabführenden Wasserleitungen eine außerordentliche Prüfung an der Scherarbeitenbühne erforderlich. Zudem erfolgte eine Mitarbeiter-Schulung, um einen sicheren Umgang mit der Scherarbeitenbühne zu gewährleisten.

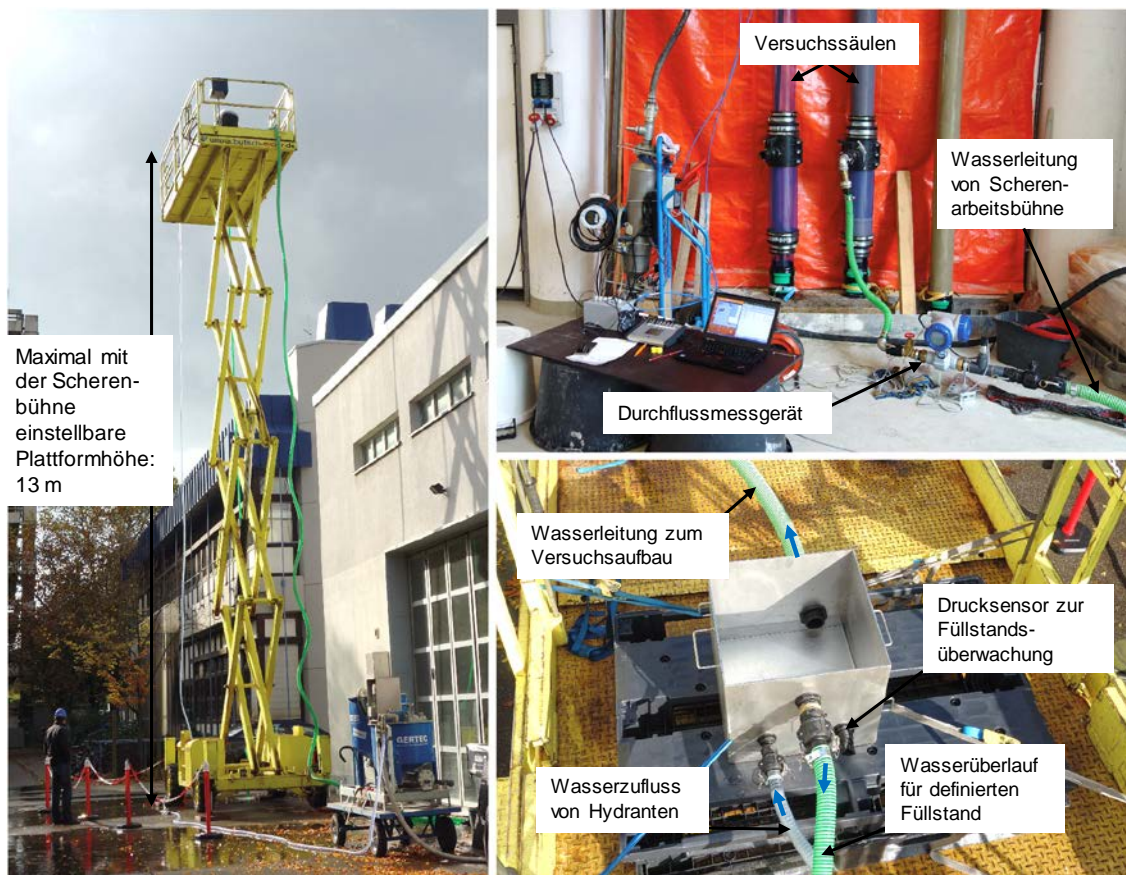


Abbildung 3-5: Versuchsaufbau zur versuchstechnischen Nachbildung eines Grundwasserleiters

In abschließenden Vorversuchen konnte der finalisierte Versuchsaufbau sowie die neu installierte Messtechnik erfolgreich getestet werden. Im Vergleich zu der Datenaufnahme des Verfüllvorgangs im EWS-tech I Projekt wurde die Messtechnik um ein magnetisch induktives Durchflussmessgerät zur Messung des simulierten Grundwasservolumenstroms und mehrere Drucksensoren erweitert, die neben dem Druckpotential des simulierten Grundwasserleiters auch den Anstieg der Verfüllsuspension hochaufgelöst messen und Auskunft über die Suspensionsdichte im Bohrloch geben.

Bei der Entwicklung der finalisierten Versuchsanlage traten in Verbindung mit einzelnen Verfüllbaustoffen Risse an den als „Bohrloch“ vorgesehenen und bereits angeschafften transparenten Polycarbonatrohren auf. Zusätzliche materialspezifische Untersuchungen ergaben letztlich, dass die ursprünglich für die Versuche vorgesehenen Polycarbonatrohre (PC-Rohre) nicht für alle Baustoffe geeignet sind und sämtliche Versuche aufgrund der Vergleichbarkeit daher mit transparenten PVC-Rohren durchgeführt werden müssen. Neben einer zeitlichen Verzögerung hatte dies auch eine Neuanschaffung der Versuchsrohre zur Folge.

### 3.2.2. B2: Einfluss der Bohrlochtopographie und von Grundwasserbewegungen auf die Fehlstellenbildung und die Systemdichtigkeit

Zielsetzung von AP B2 ist es, die Mechanismen der Fehlstellenbildung von Verfüllprozessen zu untersuchen. Hierzu muss der am KIT vorliegende Bohrlochsimulator umgebaut und erweitert

werden. In den vergangenen 5 Monaten wurden Segmente aus Beton konstruiert, die einen Grundwasseraquifer simulieren und einen vertikalen Grundwasserstrom im Bohrloch ermöglichen. In folgenden Schritten werden die in Arbeitspaket A3 entwickelten Referenz-Verfüllbaustoffe in jeweils drei 4 m-Säulen im Bohrlochsimulator verfüllt, sodass die Verfüllqualität in Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften sowie der Bohrlochrauheit ermittelt werden kann.

### 3.2.3. B3: Realmaßstabsversuche zur Bewertung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden unter dem Einfluss größenmaßstäblich realistischer Grundwasserstockwerksverbindungen

Da zuerst im Technikumsmaßstab Erfahrungen mit der neuen Versuchsanlage gesammelt werden sollte und es aufgrund der in Arbeitspunkt B1 erläuterten Umstände zu einem zeitlichen Verzug kam, sind die Versuchsplanungen für die Realmaßstabsversuche noch nicht abgeschlossen. Sobald die ersten Technikumsversuche erfolgreich abgeschlossen sind, wird intensiv an der Umsetzung im Realmaßstab gearbeitet, um eine zusätzliche Verzögerung möglichst zu vermeiden.

### 3.2.4. B4: Einfluss des Grundwasserflusses auf das Hinterfüllmaterial im Bohrloch

Ein Schwerpunkt des Vorhabens ist die Entwicklung verschiedener Versuchsaufbauten zur Untersuchung des Einflusses von Grundwasserflüssen auf das Bohrloch einschließlich der Verfüllung während und nach Abschluss des Verfüllvorgangs. Erste Vorversuche haben in einem mit Sediment gefüllten, kleinmaßstäblichen Versuchsaufbau stattgefunden. In diesen wird eine Säule mit Verfüllsuspension eingefüllt und ein möglichst realitätsnaher, horizontaler Grundwasserfluss angelegt. Sobald die Suspension ausreichend erhärtet ist, wird der entstandene Hinterfüllkörper ausgebaut und der Einfluss des Wasserflusses untersucht. Die ersten Versuche sind mit einem Sediment mit einer Durchlässigkeit von etwa  $5,0E-5$  m/s durchgeführt worden. Nach dem Ausbau sind zunächst keine optischen Veränderungen festzustellen, die auf Auswaschungen oder Fehlstellenbildung schließen lassen. Der Technikumsversuchsaufbau für die Untersuchungen mit Grundwasserfluss ist mittlerweile fertiggestellt und kann in nächster Zukunft genutzt werden. Es handelt sich um einen deutlich größeren Aufbau, doch die Erkenntnisse aus den Vorversuchen können berücksichtigt werden.

Auswahl geplanter Untersuchungsparameter sind: Volumenänderung Hinterfüllmaterial, Durchlässigkeit Sediment, Siebkurve Sediment, Dünnschliff Grenzbereich Boden/Hinterfüllung.

### 3.3. Arbeitspaket C: Messtechnische Bewertung des Verfüllerfolgs

Die bisherigen Arbeiten im Rahmen des AP C umfassten den Aufbau unterschiedlicher Teststände sowie Untersuchungen zweier kommerzieller Verfüllbaustoffe 07d & 13d (d = dotiert) mit unterschiedlichen Methoden.

Die relevantesten Untersuchungen können wie folgt kurz zusammengefasst werden:

Magnetische Untersuchungen durch EIFER

- Langzeitstabilität des magnetischen Signals dotierter Baustoffe (AP C1.1 & 1.2)
- Qualitätsunterschiede bei unterschiedlichen Chargen und Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min) (AP C1.1 & 1.2)
- Qualitätsveränderungen bei variablen W/F Verhältnissen und Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min) (AP C1.1 & 1.2)

- Bewertung des CemTrakker Messsystems im Hinblick auf Fehlstellendetektion (Eindringtiefe des magnetischen Signals) (AP C1.1 & 1.2)

Hydraulische und chemische Untersuchungen durch KIT-AGW

- (System-) Durchlässigkeitsversuche (AP C1.2)
- Umströmungsversuche (AP C1.2)
- Automatische Füllstandskontrolle (AP C2)

### 3.3.1. C1: Überprüfung der Verfüllqualität anhand der magnetischen Suszeptibilität

#### Langzeitstabilität des magnetischen Signals dotierter Baustoffe (AP C1.1 & C1.2)

Abbildung 3-6 zeigt Langzeitwiederholungsmessungen (bisher knapp 300 Tage) an zylindrischen Zementkernen des Baustoffs 07d mit dem Bartington MS2C Suszeptibilitätssensor. Das magnetische Signal bleibt über den gesamten Messzeitraum stabil für beide Parallelproben. Das gleiche Bild konnte auch für den Baustoff 13d ermittelt werden. Somit sind praktisch Langzeitmessungen der ausgehärteten dotierten Baustoffe im Bohrloch möglich, um z.B. die Langzeitintegrität der Hinterfüllung prüfen zu können. Die undotierten Baustoffe zeigen ein verhältnismäßig geringes Signal was auf eisenhaltige Minerale im Baustoffe zurückgeführt werden kann.

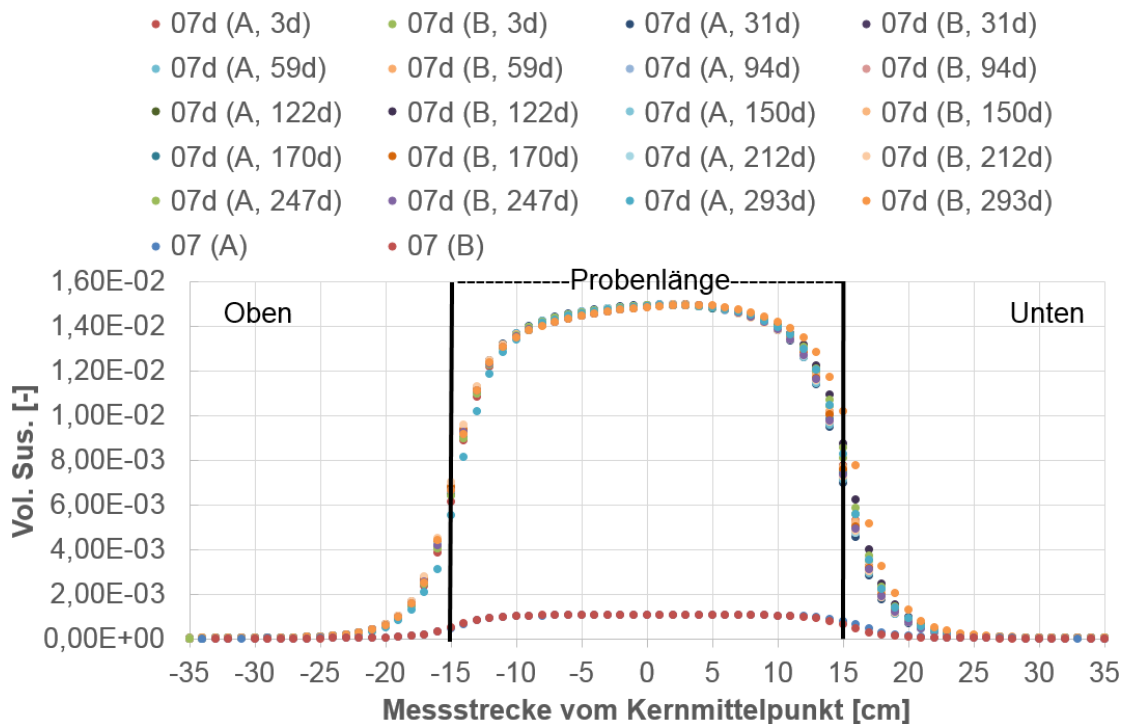


Abbildung 3-6: Langzeitstabilität 07d (30 cm Proben).

#### Qualitätsunterschiede bei unterschiedlichen Chargen und Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min) (AP C1.1 & C1.2)

Abbildung 3-7 zeigt die magnetische Suszeptibilität des Baustoffs 013d, der bei 650 U/min ange-mischt wurde. Hierbei zeigt sich, dass zwei der Chargen bei diesen Anmischbedingungen gut miteinander vergleichbare Werte liefern und das magnetische Signal über die Probenlänge stabil

ist, was das Plateau von ca. -10 bis 10 cm andeutet. Die Charge (11.09.17) ist jedoch instabil und die Signalkurve enger als bei den anderen beiden Chargen, was sich auch in einem höheren Absetzmaß gezeigt hat. Gründe hierfür können natürliche Varianzen innerhalb der Einzelkomponenten des Baustoffs sein.

Bei höheren Anmischgeschwindigkeiten (2000 U/min) wird der Baustoff besser aufgeschlossen und es verbessern sich die Eigenschaften. Dies äußert sich in stabileren magnetische Suszeptibilitätsmesswerten in den untersuchten Chargen.

Der Baustoff 07d zeigt hingegen bei allen untersuchten Anmischbedingungen stabile Messwerte. Dieser Baustoff ist damit im Hinblick auf die variierende Anmischbedingungen im Labormaßstab robuster.

- 013d (A, 14.12.16) • 013d (B, 14.12.16) • 013d (A, 21.03.17)
- 013d (B, 21.03.17) • 013d (A, 11.09.17) • 013d (B, 11.09.17)

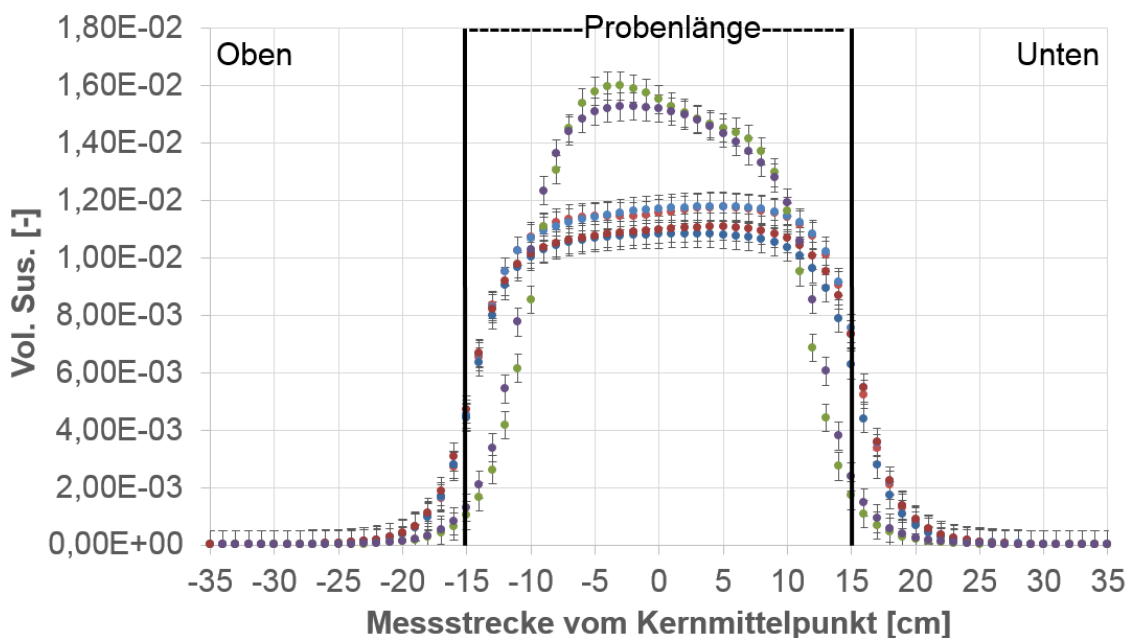


Abbildung 3-7: Vergleich dreier Chargen 013d bei 650 U/min (30 cm Probe).

#### Qualitätsveränderungen bei variablem W/F-Verhältnis und Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min) (AP C1.1 & C1.2)

In weiteren Untersuchungsschritten wurde die Empfindlichkeit der Baustoffe im Hinblick auf W/F Veränderung bei unterschiedlichen Anmischbedingungen überprüft. Dazu wurden das W/F ausgehend von den Herstellerangaben des entsprechenden Baustoffs, sukzessive bis zum Stabilitätsverlust der Suspension erhöht (siehe Beispiel Abbildung 3-8 bei 650 U/min für 07d).

Es zeigte sich, dass der Baustoff 07d bei 650 U/min früher instabil wird (W/F=0,42, Erhöhung um 40 %) als bei 2000 U/min (W/F=0,45, Erhöhung um 50 %). Darunter sind die Suspensionen, über die gesamte Probenlänge stabil. Lediglich durch die sinkende Dichte bei steigendem W/F kommt es zu sehr geringen Signalabnahmen. Diese Entwicklung der magnetischen Suszeptibilität korreliert mit dem Absetzmaß der gemessenen Proben.

Die Ergebnisse für den Baustoff 013d sind sehr ähnlich. Er unterscheidet sich lediglich in einer empfindlicheren Reaktion auf Änderungen des W/F-Verhältnisses. Ausgehend von einem W/F-Verhältnis von 0,8 und einer Anmischgeschwindigkeit von 650 U/min wird dieser bereits bei W/F=0,88 (Erhöhung um 10 %) instabil. Bei einer Anmischgeschwindigkeit von 2000 U/min wird er erst bei W/F=0,96 (Erhöhung um 20 %) instabil.

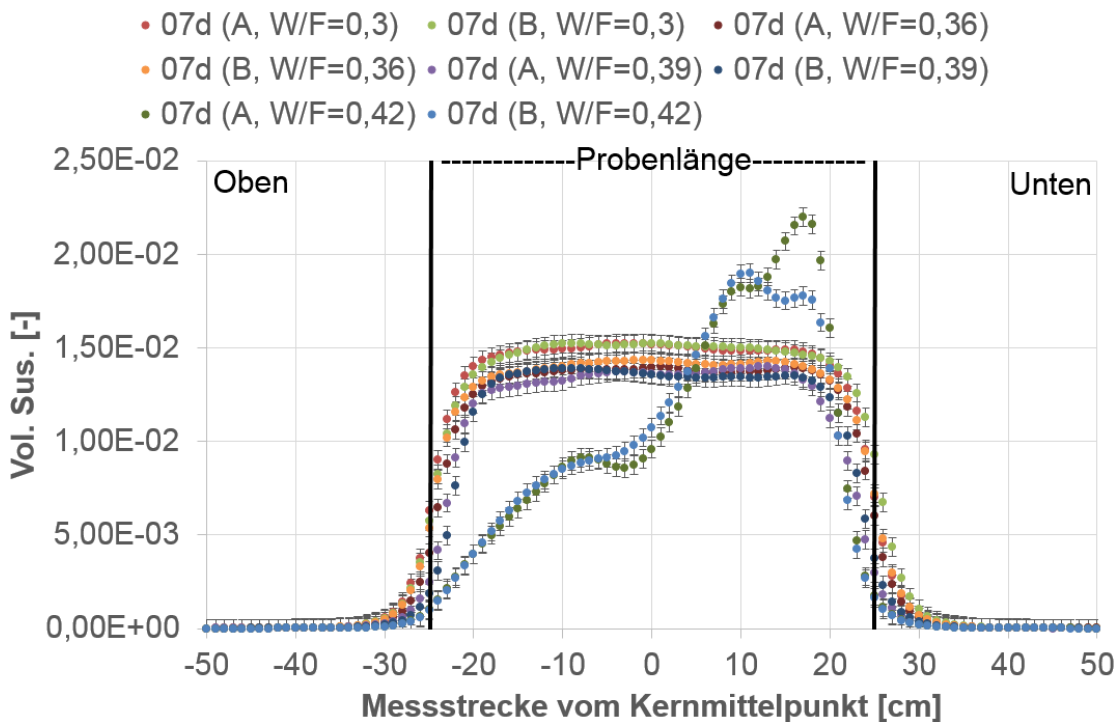


Abbildung 3-8: Einfluss unterschiedlicher W/Z auf das Messsignal bei 07d und einer Rührgeschwindigkeit von 650 U/min (50 cm Proben).

#### Bewertung des CemTrakker Messsystems im Hinblick auf Fehlstellendetektion (Eindringtiefe des magnetischen Signals) (AP C1.1 & C1.2)

Die Eindringtiefe des CemTrakker-Sensors konnte mittels der Untersuchung zylindrischer Zementproben (Baustoff 07d) unterschiedlicher Durchmesser mit einzementiertem 32er Sondenrohr abgeschätzt werden. Es ergibt sich ein Eindringradius  $r$  von 35,6 - 51,8 mm. Aus den bisher getätigten Untersuchungen wird damit ersichtlich, dass nicht zwangsläufig der gesamte Bohrl Lochdurchmesser einer EWS-Bohrung detektiert werden kann. Bei der Interpretation der Messwert gilt es ferner zu beachten, dass der Verlauf der Sondenrohre innerhalb der Bohrung unbekannt ist, was potentielle Fehlerquellen mit sich bringt. Somit ist die CemTrakker Sonde für die Detektion von Fehlstellen im ausgehärteten Baustoff nach jetzigem Stand nur bedingt geeignet. Bauliche Veränderung des CemTrakker Sensors zur Erhöhung der Eindringtiefe wäre hier ein denkbarer Lösungsansatz.

Weitere Untersuchungen werden auf Störeinflüsse auf die magnetischen Messungen wie z.B. Hilfsverrohrungen, Abstandshalter und die Geologie eingehen. Auch die Sensitivität im Hinblick auf die Detektion von Fehlstellen wird aktuell untersucht.

#### (System-) Durchlässigkeitsversuche (AP C1.2)

Analog zum Vorgängerprojekt EWS-tech I werden Durchströmungsversuche zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit in Anlehnung an die DIN 18130 Teil 1 durchgeführt. Geprüft werden zum einen nur die Hinterfüllmaterialien und zum anderen Systeme aus Erdwärmesonde mit umgebendem Hinterfüllmaterial. Aus den Baustoffen 07d und 13d wurden zylindrische Probekörper mit und ohne Erdwärmesondenrohre hergestellt und in die Triaxialmesszellen eingebaut. Die Versuche laufen über mehrere Monate und dauern noch an. Vorläufig ist festzustellen, dass die Mehrzahl der Materialien und Systeme eine geringe Durchlässigkeit aufzeigen und den Anforderungen der LQS EWS genügen. Das System aus Baustoff 13d (650 U/min) und der Erdwärmesonde zeigt die mit Abstand höchste Durchlässigkeit ( $k_f=1,0E-11$  m/s), weshalb der Probekörper erneut erstellt wurde, um einen Fehler bei der Herstellung ausschließen zu können. Noch sind keine Rückschlüsse zu ziehen.

#### Umströmungsversuche (Sulfatangriff) (AP C1.2)

Ergänzend zu den Versuchsergebnissen des Vorgängerprojektes werden in diesem Projekt Umströmungsversuche der Baustoffe 07d und 13d bei Raumtemperatur und 8 °C durchgeführt. Umströmt wird jeweils mit den Wässern S2, S3, E und LW. Zu diesem Zeitpunkt sind die Versuche unter Raumtemperatur bereits abgeschlossen und alle Untersuchungsergebnisse liegen vor. Der Versuch bei 8 °C wurde kürzlich gestartet und dauert noch an, da die Umströmung auf 16 Wochen ausgelegt ist. Sobald auch hier die Ergebnisse des Ausbaus vorliegen, werden diese mit denen bei Raumtemperatur verglichen.

#### 3.3.2. C2: Technikumsversuche zur automatischen Füllstandskontrolle von Erdwärmesonden

Technologien zur automatischen Abdichtungskontrolle sind für die nachhaltige Entwicklung von Erdwärmesonden unabdingbar. Daher wurde innerhalb des Projekts ein spezieller Füllstand entwickelt und in der Werkstatt des AGW gefertigt und in der Versuchshalle aufgebaut. In der KW 12 2018 sollen mit den ersten Versuchen begonnen werden. Es sollen verschiedene magnetisch dotierte Baustoffe mit unterschiedlichen Anmischbedingungen und mit verschiedenen Messsonden getestet werden. Außerdem sollen Versuche mit wassergefüllten und luftgefüllten Polycarbonat-rohren durchgeführt werden.

#### 3.4. Arbeitspaket D: Machbarkeitsstudie zur Bewertung der Langzeitintegrität

##### 3.4.1. D1: Reaktivität und Reaktionskinetik von Verfüllbaustoffen im Kontakt mit Gipskeuper

Zur Untersuchung der im Antrag beschriebenen Fragestellung wurden ein ausgehärteter Verfüllbaustoff aus einem bestehenden Schadensfall sowie ein weiterer kommerzieller Verfüllbaustoff, welcher frisch angerührt wurde und eine kurze Hydratationszeit hatte, zusammen mit Gips und Anhydrit als Kontaktversuche über einen längeren Zeitraum unter naturnahen Bedingungen (Wasserzusammensetzung und Temperatur) gelagert. Für die Batchversuche wurden bestehende Proben aus dem Vorgängerprojekt und dem Schadensfall aufgemahlen. Insgesamt wurden 16 Batchversuche und 14 Kontaktversuche angesetzt. Die Materialien wurden zu den unten aufgeführten Zeitpunkten beprobt und mittels Röntgendiffraktometrie auf das Vorhandensein von

Ettringit und Thaumasit untersucht. Diese beiden Minerale können durch Umwandlung aus Zementbestandteilen in Anwesenheit einer Sulfatquelle (z.B. Gips oder Anhydrit) entstehen und geben Hinweise auf eine mögliche Reduzierung der Bohrlochanbindung an das umgebende Gestein. Beide Mineralumwandlungen führen dabei zu einer Volumenzunahme, die Umwandlung zu Thaumasit kann außerdem zu einer Vergelung des Verfüllbaustoffs und somit zu einer starken Abnahme der Festigkeit führen.

Die Versuche wurden im Mai 2016 gestartet und werden bis zum Projektende weitergeführt. Eine Beprobung erfolgte bisher nach 1, 11 und 16 Monaten. Hierbei zeigten sich für Thaumasit steigende Wiederfindungsraten und Konzentrationen mit zunehmender Versuchsdauer. Ettringit konnte ebenfalls bei allen Beprobungen in mehreren Batch- und Kontaktversuchen nachgewiesen werden. Aufgrund von Adaptionen am Versuchsaufbau nach der ersten Beprobung zeigt sich hier jedoch kein eindeutiger Trend.

#### 3.4.2. D2: Weiterentwicklung und Bau einer Simulationszelle zur experimentellen Bestimmung der Quelldrücke

Im Rahmen dieses Arbeitspakets soll eine Messzelle entwickelt werden, mit welcher die separaten Quelldrücke von Anhydrit und einem Verfüllbaustoff in einem EWS-System, bei gleichzeitiger Beobachtung der Durchflussänderung des Systems, bestimmt werden können. Ziel ist eine Überprüfung der Machbarkeit und der Funktionalität dieser Messapparatur vor dem Hintergrund der Beurteilung von bestehenden EWS-Anlagen in kritischen geologischen Gebieten (Anhydrit/artesischer Aquifer). Die messtechnische Erfassung der Quelldrücke sowie der Durchflussänderungen soll eine Beurteilung der Quellvorgänge als potentielle Schadensursache ermöglichen. Aufgrund der komplexen technischen Umsetzung der Fragestellung soll eine in zwei Einzelversuche getrennte Herangehensweise erfolgen:

- Erfassung der separaten Quelldrücke von Anhydrit und Verfüllbaustoff sowie Erfassung des Quelldrucks der kombinierten Materialien. Diese Versuche können in bestehenden Messzellen am KIT (IFB Felsmechanik) durchgeführt werden.
- Erfassung von Durchflussänderungen im kombinierten System Anhydrit-Verfüllbaustoff bei gegebener Vorspannung. Beide Materialien sollen dabei räumlich getrennt in vertikaler Richtung quellen können. Hierzu wird die neu konstruierte Messzelle verwendet.

Die technischen Planungen für die Messzelle sind weitestgehend abgeschlossen, so dass zu Beginn des zweiten Quartals mit der Konstruktion begonnen werden kann. Die abschließenden Funktionstests sollen dann im zweiten Halbjahr 2018 durchgeführt werden.

#### 3.4.3. D3: Korrosionsversuche Magnetit im Milieu zementgebundener Verfüllbaustoffe

Um das Korrosionsverhalten von Magnetit zu untersuchen, wurden Langzeit- und Batchversuchen durchgeführt. Hierfür wurde ein kommerzieller Verfüllbaustoff mit Magnetit dotiert. Die Versuche zeigten im Verlauf der zweimonatigen Versuchsdauer keinen Abfall der magnetischen Suszeptibilität.

Im Rahmen weiterführender Arbeiten soll nun die Korrosionsbeständigkeit der im Projekt entwickelten, magnetitdotierten Verfüllsuspension bei möglichst langer Versuchsdauer untersucht werden.



#### 4. LITERATUR

Grimm, M.; Stober, I.; Kohl, T.; Blum, P. (2014): Schadensanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg, In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, DOI 10.1007/s00767-014-0269-1

Ring, M. (2016): Development of a test facility for the examination of borehole heat exchanger grouting processes in boreholes with vertical ground water movements, Masterarbeit, Universität Freiburg