

Abschlussbericht

EWS-tech **Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie**

von

Matthieu Riegger, Julian Rolker
Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige
thermische Energiesysteme, Stuttgart

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

Michael Haist, Jörg-Detlef Eckhardt,
Petra Schlager, Moritz Zemann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe)

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

Förderkennzeichen: L75 13004 - 13007

Laufzeit: 1.8.2013- 31.3.2016

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

Oktober 2016



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

PROJEKTLAUFZEIT

August 2013 bis März 2016

PROJEKTNUMMERN

L75 13004 - 13007

GEFÖRDERT DURCH



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Stuttgart, den 28.04.2017 (enthält geringfügige formale Korrekturen gegenüber der Erstfassung vom 28.10.2016)

Titelbild: Ein im Technikumsmaßstab analysierter Erdwärmesondenabschnitt

AUTOREN DES ABSCHLUSSBERICHTS ZU DEM VERBUNDFORSCHUNGSVORHABEN

EWS-TECH



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,
Adenauerring 20b, Geb. 50.40
76131 Karlsruhe



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe)
Dr.-Ing. Michael Haist,
Prof. Dr. Jörg-Detlef Eckhardt,
Dipl.-Geol. Petra Schlager
Dipl.-Geoökol. Moritz Zemann
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe



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

Neben den aufgeführten Autoren haben die folgenden Personen bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens mitgewirkt: Max Ring, Niels Hoppe, Aline Kornmann, Michael Keller, Joschka Meier (alle Solites), Viktoria Meyer (AGW), Justine Mouchot (EIFER)

1. Kurzfassung	7
1.1. Deutsche Kurzfassung.....	7
1.2. Englische Kurzfassung – Abstract.....	8
2. Einleitung.....	9
2.1. Motivation und Aufgabenstellung	9
2.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	10
2.3. Planung und Ablauf des Projektes	12
2.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
3. Laborversuche.....	15
3.1. Entwicklung eines Prüfkonzepts für zementäre Verfüllbaustoffe (MPA Karlsruhe (KIT))	15
3.1.1. Untersuchungsziele	15
3.1.2. Untersuchungskonzept und Arbeitsprogramm	15
3.1.3. Untersuchte Verfüllbaustoffe.....	18
3.1.4. Untersuchungsmethoden.....	18
3.1.4.1. Versuchsszenarien	18
3.1.4.2. Untersuchungsprogramm	20
3.1.5. Untersuchungsergebnisse	29
3.1.5.1. Eigenschaften der Hinterfüllmaterialien	29
3.1.5.2. Robustheit der Hinterfüllmaterialien	38
3.1.6. Diskussion.....	50
3.1.6.1. Festlegung von Eigenschaftsgruppen und deren Bedeutung für die sichere Verfüllung von EWS-Bohrungen.....	50
3.1.6.2. Bewertung der Prüfverfahren nach Eigenschaftsgruppen.....	51
3.1.6.3. Bewertung der Materialeigenschaften auf Basis LQS EWS.....	57
3.1.7. Empfehlungen.....	58
3.2. Evaluierung der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden und Bewertung relevanter Hinterfüllbaustoffe (KIT-AGW, EIFER)	59
3.2.1. Untersuchungsziel	59
3.2.2. Theoretische Grundlagen	61
3.2.2.1. Zementnomenklatur.....	61
3.2.2.2. Zementhydratation.....	62
3.2.2.3. Sulfatbeständigkeit von Zement	66
3.2.2.4. Säureangriff	71

3.2.3. Material und Methoden	74
3.2.3.1. Untersuchte Hinterfüllmaterialien.....	74
3.2.3.2. Verwendete Wässer	75
3.2.3.3. Anmischen der Baustoffe.....	80
3.2.3.4. Probennahme und Probenlagerung	81
3.2.3.5. Analytik	81
3.2.3.6. Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts.....	88
3.2.3.7. Systemdurchlässigkeitsversuch.....	89
3.2.3.8. Batchversuche	92
3.2.3.9. Umströmungsversuche	93
3.2.3.10. Auswertung - Darstellung	96
3.2.3.11. Übersicht der durchgeführten Versuche.....	96
3.2.4. Ergebnisse	101
3.2.4.1. Wärmeleitfähigkeitsmessung.....	101
3.2.4.2. Durchströmungsversuche.....	104
3.2.4.3. Systemdurchlässigkeitsversuche.....	108
3.2.4.4. Batchversuche	111
3.2.4.5. Umströmungsversuche	150
3.2.5. Zusammenfassung	220
4. Technikumsversuche (Solites)	228
4.1. Untersuchungsziele	228
4.2. Erstellung der Technikumsversuchsanlage.....	228
4.3. Übersicht der durchgeführten Versuche.....	233
4.4. Exemplarische Darstellung eines Versuchsablaufs	236
4.5. Untersuchungsergebnisse	240
4.5.1. Zusammenfassung	253
5. Realmaßstabsversuche (Solites)	257
5.1. Untersuchungsziele	257
5.2. Erstellung des Realmaßstabsversuchsgeländes	257
5.3. Übersicht der durchgeführten Versuche.....	260
5.4. Exemplarische Darstellung eines Versuchsablaufs	263
5.5. Untersuchungsergebnisse	268
5.5.1. Verfüllqualität	268
5.5.2. Erkenntnisse hinsichtlich eines kontinuierlichen Verfüllvorgangs.....	274

5.5.3. Zusammenfassung	279
5.6. Effizienzvergleich unterschiedlicher Typen von EWS	280
5.6.1. Theoretische Voruntersuchung.....	280
5.6.1.1. Auswahl der verwendeten Berechnungsmethode	280
5.6.1.2. Vergleichsuntersuchung verschiedener EWS-Konfigurationen.....	289
5.6.2. Messung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands	301
5.6.3. Zusammenfassung	313
6. Ergebniskorrelation	314
6.1. Korrelation der Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuche	316
6.2. Fazit und Empfehlungen.....	321
7. Zusammenfassung und Ausblick	326
7.1. Prüfkonzept für zementäre Verfüllbaustoffe	326
7.2. Systemdurchlässigkeit.....	326
7.3. Technikumsversuche.....	327
7.4. Realmaßstabsversuche	328
7.5. Empfehlungen zur Prüfung von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen	329
7.6. Ausblick	330
8. Wissenstransfer.....	332
9. Literatur	335
10. Anhang	342
10.1. Anhang MPA Karlsruhe (KIT).....	342
10.2. Anhang AGW (KIT), EIFER.....	342
10.3. Anhang Solites	350
10.4. Allgemeiner Anhang	360

1. KURZFASSUNG

1.1. Deutsche Kurzfassung

Mit dem Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech der Projektpartner Solites, dem European Institute for Energy Research (EIFER), dem Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) sowie der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sollen grundlegende Fragestellungen zur Verfüllqualität von Erdwärmesonden (EWS) gelöst werden. Hierzu wurde ein dreistufiges Vorgehen aus Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuchen gewählt. Im Labormaßstab wurden detaillierte Charakterisierungen von 15 Erdwärmesondenverfüllbaustoffen hinsichtlich wesentlicher chemisch-physikalischer Basisparameter (Feststoff- und Wasseranteil, Viskosität, Sedimentationsverhalten, Festigkeit etc.) und Untersuchungen zur Verfüllbaustoff- und Systemdurchlässigkeit sowie der Langlebigkeit von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen in der Gegenwart sulfataggressiver oder saurer Grundwässer durchgeführt. Außerdem wurde durch zwei weitere Untersuchungsszenarien an vier ausgewählten Baustoffen deren Robustheit gegenüber verringerter Temperatur und gegenüber einer Änderung des Wasser/Feststoffgehalts untersucht. Aufbauend auf den Charakterisierungsversuchen im Labor wurden 36 Technikumsversuche zur Visualisierung des Verfüllvorgangs durchgeführt, die ein Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenbildung zum Ziel hatten. In einem oberirdischen Prüfstand mit 6 m Höhe wurde dabei der Einfluss unterschiedlicher Parameter (wie z.B. Art und W/F-Wert des Verfüllbaustoffs, Sondenart, Anmischintensität und –zeit, Verfüllgeschwindigkeit etc.) auf die Verfüllqualität untersucht. Mit den im Forschungsprojekt EWS-tech durchgeführten acht Realmaßstabsversuchen sollten die in den Labor- und Technikumsversuchen ermittelten Erkenntnisse verifiziert werden. Hierfür wurde ein Prüfstand mit zwei mehrfach nutzbaren Versuchsbohrungen erstellt, der den zerstörungsfreien Rückbau von 30 m tiefen Erdwärmesonden erlaubt und somit die Analyse des tatsächlichen Zustands der Hinterfüllung ermöglicht. Aufbauend auf der Korrelation der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Labor-, Technikums-, und Realmaßstabsversuchen können Labor-Prüfkriterien und baustellentaugliche Prüfkriterien für Erdwärmesondenverfüllbaustoffe sowie Handlungsempfehlungen zur qualitätsgesicherten Verfüllung von Erdwärmesonden erarbeitet werden. Diese können in behördliche Leitlinien oder Vorschriften etc. aufgenommen werden. Die ermittelten Prüfkriterien können darüber hinaus als Grundlage einer Eigen- und Fremdüberwachung der Baustoffhersteller sowie einer Baustoffzulassung dienen. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Langzeitstabilität von Verfüllbaustoffen sollen als Grundlage für eine Bewertung des Schadenspotentials von möglicherweise gefährdeten bereits bestehenden Erdwärmesonden dienen.

Zusammenfassend wird mit dem Forschungsvorhaben EWS-tech damit zu einer signifikanten Qualitätsverbesserung bei der Erstellung von Erdwärmesonden beigetragen.

1.2. Englische Kurzfassung – Abstract

The joint research project EWS-tech conducted by the project partners Solites, the European Institute for Energy Research (EIFER), the Institute of Applied Geosciences (AGW) as well the Materials Testing and Research Institute (MPA Karlsruhe) from the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) aims at the solution of basic questions concerning the grouting quality of borehole heat exchangers.

For this, a three-stage approach of laboratory, small-scale and real-scale experiments was chosen. On the laboratory scale, detailed characterizations of 15 borehole grouting materials regarding their chemo-physical parameters (water/solid ratio, viscosity, sedimentation behavior, compressive strength etc.) and studies concerning grout permeability and permeability of the system as well as the long term durability of grouting material in sulfate aggressive or CO₂-containing environments were conducted.

The robustness towards lower temperature conditions and towards changes in the water/solid ratio was analyzed in two additional testing scenarios for four selected borehole grout materials. Based on the laboratory characterization 36 small-scale experiments were performed to visualize the grouting process of borehole heat exchangers with the goal to understand the grouting process and the origin of discontinuities within the grouting. In a 6 m high test station above ground the influence of different parameters (type of grouting material, water/solid ratio of grouting material, mixing intensity, mixing time, injection rate, type of borehole heat exchanger, surface roughness of borehole etc.) towards the grouting quality were determined. To verify the results from laboratory and small-scale experiments 8 real scale experiments were conducted. For this a testing ground with two 30 m deep experiment boreholes was build. The multiple usable experiment boreholes enable a nondestructive removal of the borehole heat exchanger and the analyses of the effective condition of the grouting quality.

By correlating the results and findings from the laboratory, small-scale and real-scale tests laboratory test criteria for grouting material and test criteria for on-site use as well as guidance for a high-quality grouting of borehole heat exchangers can be developed. These criteria and recommendations can be included in official guidelines or regulations etc. The determined criteria can also serve as a basis for an internal and external quality control. The insights gained on the long-term stability of grouting material can serve as a basis for an assessment of the damage potential of potentially hazardous borehole heat exchangers.

In summary, the research project EWS-tech contributes to a significant improvement in borehole heat exchanger quality.

2. EINLEITUNG

2.1. Motivation und Aufgabenstellung

Erdwärmesonden bzw. Erdwärmesondenfelder eignen sich – häufig in Verbindung mit Wärmepumpen - zur regenerativen, wetterunabhängigen Wärme- und Kälteversorgung von z.B. Wohn- und Bürogebäuden.

Der mit Hilfe von Erdwärmesonden erschlossene Untergrund dient hierbei als Niedertemperaturwärmequelle bzw. -speichermedium, dem im Sommer Wärme zugeführt und im Winter Wärme entzogen werden kann. Daneben gibt es auch Erdsonden-Wärmespeicher (z.B. in Neckarsulm-Amorbach und im Baugebiet Hirtenwiesen II in Crailsheim), in denen z.B. Solarwärme mit einer Temperatur von bis zu 90 °C saisonal gespeichert wird (Mangold et al. 2012).

In den letzten Jahren wurde an Hand zahlreicher schwerwiegender Schadensfälle in Baden-Württemberg (z.B. in Staufen, Schorndorf, Leonberg-Eltingen, Rudersberg-Zumhof, Böblingen) (Grimm et al. 2014) im Zusammenhang mit der Erstellung von Erdwärmesonden deutlich, dass wesentliche Fragestellungen zur hydraulischen Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrlöchern bislang nicht geklärt sind. Die Lösung dieses Umstandes ist sehr dringlich, da unter anderem die durch Erdwärmesonden-Bohrungen und ihre unzureichende Verfüllung ausgelösten Schadensfälle zu einer größer werdenden Verunsicherung geführt haben. Diese Verunsicherung spiegelt sich durch den in Baden-Württemberg im bundesweiten Vergleich mit nur 11 % geringsten Anteil an erdgekoppelten Wärmepumpen am Gesamtabsatz der neuinstallierten Wärmepumpen wider (Bundesverband Wärmepumpe e.V 2016). Die signifikante Häufung der durch EWS ausgelösten Schadensfälle ist besonders in Baden-Württemberg zu beobachten und geht z.T. auf unvollständige EWS-Verfüllungen zurück. Hierzu tragen die speziellen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen in Verbindung mit der Zulässigkeit, bei Erdwärmesondenbohrungen mehrere Grundwasserleiter zu durchteufen, entscheidend bei. Eine Beschränkung von Erdwärmesondenbohrungen auf den oberen Grundwasserleiter würde in weiten Teilen des Landes Baden-Württemberg zu einer deutlichen Reduktion der zulässigen Bohrtiefen führen und damit auch Erdwärmesondenanlagen unter Effizienzaspekten und insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen unrentabler machen.

Daher ist es von großer Bedeutung, Maßnahmen zur Verbesserung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden zu ergreifen und offene Fragestellungen diesbezüglich zeitnah zu beantworten. Hierzu hat das Land Baden-Württemberg nicht zuletzt durch die Einführung der „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)“ am 07.10.2011 (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2011) und die Einrichtung des „Arbeitskreises Baustoffe für Erdwärmesonden“ bereits erste wichtige Maßnahmen ergriffen.

Die Verfüllqualität von Erdwärmesonden wird unter anderem durch die eingesetzten Materialien, die eingesetzten Misch- und Verfüllanlagen, die angewandte Verfüllmethode und die Arbeitsqualität der ausführenden Personen beeinflusst. Erste Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen konnten bereits in dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg finanzierten und von Solites

bearbeiteten Forschungsvorhaben EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden) (Riegger, 2013) gewonnen werden. Allerdings wurden mit Hilfe der damals durchgeführten Realmaßstabsversuche weitere grundlegende Fragestellungen aufgeworfen, deren Beantwortung Voraussetzung für eine Verbesserung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden ist. So existieren zu den nachfolgenden Fragestellungen nur unzureichende Antworten:

- Durch welche Mechanismen entstehen während oder nach dem Verfüllen einer Erdwärmesonde unverfüllte Bereiche im Bohrloch?
- Können die auftretenden Probleme durch Abstimmung der Verfüllbaustoffe mit den Misch- und Verfüllanlagen und deren Betriebsweise und durch die Art und Weise, wie diese ins Bohrloch eingebracht werden, behoben/minimiert werden?
- Ist es möglich, Laborprüfbedingungen und Grenzwerte für Erdwärmesondenverfüllbaustoffe abzuleiten, die deren Eignung zur Sicherstellung einer geforderten Verfüllqualität nachweisen?
- Ist es möglich, Baustellenprüfverfahren und Grenzwerte für Verfüllsuspensionen abzuleiten, die eine einfache und zuverlässige Überprüfung der Verfüllsuspension auf die gewünschten Eigenschaften vor dem Einbau in das Bohrloch ermöglichen?

2.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In den bislang national und international durchgeführten Forschungsvorhaben wurden die Themen thermische Effizienz und Verfüllqualität von Erdwärmesonden vor allem in Laborversuchen untersucht. Während in früheren Jahren hauptsächlich Untersuchungen zur thermischen Effizienz von Erdwärmesonden durchgeführt und darauf basierend thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe entwickelt wurden (Ebert et al. 2000), lagen die Hauptschwerpunkte der Laboruntersuchungen in den letzten Jahren auf der Analyse der hydraulischen Durchlässigkeit von Verfüllbaustoffen und von verfüllten Erdwärmesondenabschnitten insbesondere nach Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung des Verfüllmaterials (Herrmann 2008), (Niederbrucker & Steinbacher 2007), (Müller 2009), (Reuß & Kuckelkorn 2011), (Frank et al. 2011), (Anbergen 2015).

Die am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) entwickelte und erprobte Versuchsanlage (Reuß/Kuckelkorn 2011) berücksichtigt die tatsächliche Einbausituation einer Erdwärmesonde am genauesten, unter anderem durch eine Besandung der Rohre, in die die Erdwärmesonden eingebaut werden. Mit dieser Anlage konnte gezeigt werden, dass eine verfüllte Erdwärmesonde bestehend aus den Sondenrohren und dem Verfüllbaustoff deutlich höhere hydraulische Durchlässigkeiten aufweist als der reine Verfüllbaustoff. Damit wird deutlich, dass zur sicheren Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit sogenannte Systemdurchlässigkeitsversuche erforderlich sind. Untersuchungen an reinen Baustoffproben können lediglich für Voruntersuchungen herangezogen werden.

Bei den Laboruntersuchungen in den vorstehend genannten Forschungsarbeiten wurde überwiegend mit ideal hergestellten Prüfkörpern gearbeitet, die eine Länge von 2 m oder weniger aufweisen.

Demgegenüber wurden im Projekt EWSplus erstmals in großem Stil Realmaßstabsversuche an rückbaubaren Erdwärmesonden durchgeführt. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der

den Einbau und den zerstörungsfreien Rückbau von Erdwärmesonden mit einer Länge von 30 m ermöglicht. Dieser Versuchsaufbau ermöglicht die Analyse des tatsächlichen Zustands innerhalb des Bohrlochs von Erdwärmesonden. Es konnte gezeigt werden, dass die Verfüllung von Erdwärmesonden häufig nicht fehlerstellenfrei ist und dass selbst bei den vereinfachten Bedingungen im Versuchsaufbau (keine Klüfte, glatte Bohrlochwand) bei zahlreichen der erstellten Erdwärmesonden unverfüllte Bereiche, sogenannte Fehlerstellen, von bis zu einem Meter Länge vorliegen. Auf Basis der Versuche des Forschungsvorhabens EWSplus war es weder möglich, die Entstehung der Fehlerstellen mit den Randbedingungen des Verfüllvorgangs (verwendetes Verfüllmaterial, verwendete Misch- und Verfüllanlage, angewandte Verfülltechnik, etc.) zu korrelieren, noch die zur Entstehung der Fehlerstellen führenden Vorgänge zu identifizieren und zu erklären. Untersuchungen zum Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlerstellenentstehung, insbesondere in einem transparenten Versuchsaufbau, gibt es bislang nicht.

Wie in zahlreichen weiteren Forschungsvorhaben, wurden auch in dem Forschungsvorhaben EWSplus ausschließlich 1-U- und 2-U-Erdwärmesonden (EWS), jedoch keine Koaxial-EWS (vgl. Abbildung 2-1) untersucht. Die Informationslage hinsichtlich der Verfüllqualität und der thermischen Effizienz von Koaxial-EWS ist aufgrund deren geringeren Verbreitung wesentlich schlechter als bei 2-U-EWS. Die Weiterentwicklung der Sondengeometrien von Koaxial-EWS zur Verbesserung des Wärmeübergangs von Seiten der führenden Erdwärmesondenhersteller als auch eine jüngst auf dem Markt erschienene Koaxial-EWS mit einem im Vergleich zu herkömmlichen Koaxial-EWS deutlich größerem Durchmesser von 140 mm unterstreicht den Forschungsbedarf in diesem Zusammenhang. Es kann lediglich gemutmaßt werden, dass die Verfüllqualität von Koaxial-EWS auf Grund der einfacheren Geometrie besser ist als bei 2-U-EWS, bei denen sich die Sondenrohre üblicherweise sehr stark im Bohrloch verdrillen (Riegger 2012).

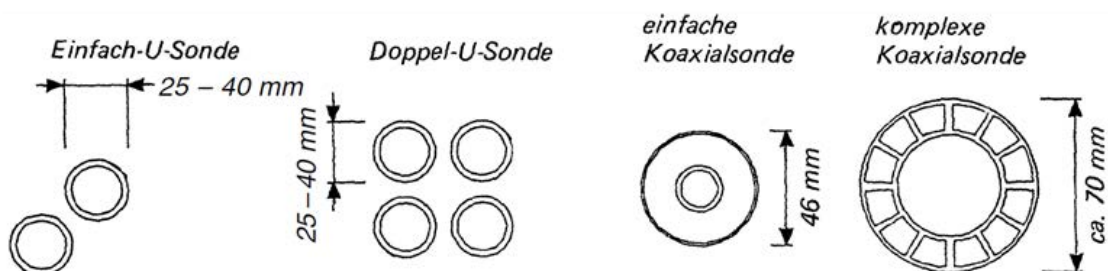


Abbildung 2-1: Verschiedene Bauarten von Erdwärmesonden im Querschnitt (Quelle: VDI 4640 Teil 2; 2001)

Hinsichtlich der thermischen Effizienz von Koaxial-EWS liegen ebenfalls keine grundlegenden Versuchsergebnisse im Vergleich zu 2-U-EWS vor. Simulationen legen allerdings nahe, dass die thermische Effizienz von Koaxial-EWS gleich gut oder sogar besser als bei 2-U-EWS ist (Baumann 2012).

Den aus den größeren Durchmessern bei Koaxial-EWS gegenüber 2-U-EWS resultierenden Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile gegenüber wie ein erschwerter Einbau in das Bohrloch durch die mit dem größeren Durchmesser einhergehende höhere Steifigkeit. Für eine Verbesserung

des Erdwärmesondeneinbaus kann, wie von einigen Erdwärmesondenherstellern zum Teil gehandhabt, die Außenrohr-Wandstärke reduziert werden, was jedoch gleichzeitig zu einer Abnahme der Druckstufe und somit auch zu einer geringeren zu realisierbaren Einbautiefe führt. Als komplex erweist sich auch der Einbau der jüngst auf den Markt gekommenen Koaxial-EWS mit einem Durchmesser von 140 mm, die nicht mit Hilfe einer Einbauhaspel in ein Bohrloch eingebaut werden kann.

Hinsichtlich der Langlebigkeit von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen, insbesondere bei Vorliegen sulfat- oder CO₂-haltiger Grundwässer, liegen keine Informationen über weitere abgeschlossene Forschungsvorhaben vor. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Thematik ergänzend zum Forschungsvorhaben EWS-tech in einem Projekt der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe bearbeitet wird. Der Schwerpunkt des genannten Projekts der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe ist die Untersuchung der Sulfatbeständigkeit des EWS-Verfüllbaustoffs, der beim EWS-Schadensfall in Rudersberg-Zumhof (Grimm et al. 2014) zum Einsatz kam.

2.3. Planung und Ablauf des Projektes

Mit einem dreistufigen Vorgehen aus Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuchen sollen die in Abschnitt 2.1 dargestellten Fragestellungen bearbeitet werden. Im Labormaßstab sollen dafür detaillierte Charakterisierungen von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen und Untersuchungen zur Verfüllbaustoff- und Systemdurchlässigkeit sowie der Langlebigkeit von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen in der Gegenwart sulfathaltiger oder saurer Grundwässer durchgeführt werden. Aufbauend auf den Charakterisierungsversuchen im Labor werden Technikumsversuche zur Visualisierung des Verfüllvorgangs durchgeführt, die ein Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenbildung zum Ziel haben. Für die verschiedenen getesteten Verfüllbaustoffe sollen Wertebereiche möglicher Prüfparameter (z.B. W/F-Wert, Anmischdauer und -intensität, Verfüllgeschwindigkeit etc.) ermittelt werden, mit denen eine gute Verfüllqualität erreicht wird. Neben den üblichen 2-U-EWS sollen bei den Versuchen auch Koaxial-EWS eingesetzt werden. Mit Hilfe von Realmaßstabsversuchen sollen die in den Labor- und Technikumsversuchen ermittelten Erkenntnisse verifiziert werden. Durch die Korrelation der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Labor-, Technikums-, und Realmaßstabsversuchen sollen Laborprüfkriterien und baustellentaugliche Prüfkriterien für Erdwärmesondenverfüllbaustoffe sowie Handlungsempfehlungen zur qualitätsgesicherten Verfüllung von Erdwärmesonden erarbeitet werden.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech zu untersuchenden Verfüllbaustoffe wurden im Oktober 2013 in einer Sitzung des „Arbeitskreis Baustoffe für Erdwärmesonden“, der vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg geleitet wird, in Zusammenarbeit mit den anwesenden Verfüllbaustoffherstellern festgelegt. Hierbei fand eine Kategorisierung der Verfüllbaustoffe in fünf Kategorien statt:

- Kategorie 1: Nicht thermisch verbesserte Standard-Verfüllbaustoffe (Wärmeleitfähigkeit ca. 0,8 – 1,0 W/m/K)
- Kategorie 2: Thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe auf Quarzsandbasis
- Kategorie 3: Thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe mit anderen Zuschlagstoffen (Graphit etc.)

- Kategorie 4: Sonderbaustoffe (z.B. Verfüllbaustoffe in Pelletform)
- Kategorie 5: Baustellen-/ Eigenmischungen; die im Forschungsvorhaben EWS-tech untersuchte Baustellenmischung besteht in Anlehnung an VDI 4640 Teil 2 (2001) aus: 10 Gew.-% Bentonit, 10 Gew.-% CEM I Portlandzement, 30 Gew.-% Quarzsand und 50 Gew.-% Wasser

Darüber hinaus wurden auch die Arbeits- und Anmischmethoden der Laborversuche mit den Herstellern abgestimmt. Die von den Herstellern für die Laboruntersuchungen (AGW, EIFER, MPA) zur Verfügung gestellten Hinterfüllbaustoffe wurden chargenrein, also aus einer Herstellung geliefert und verwendet.

Eine Übersicht der im Forschungsvorhaben EWS-tech durch die Projektpartner in den verschiedenen Prüfständen untersuchten Verfüllbaustoffe zeigt Tabelle 2-1. Die Verfüllbaustoffe werden in dem Forschungsvorhaben EWS-tech wie mit den Verfüllbaustoffherstellern vereinbart in anonymisierter Form als Verfüllbaustoffe 01 bis 16 bezeichnet.

Tabelle 2-1: Übersicht der in den verschiedenen Prüfständen untersuchten Verfüllbaustoffe

	Baustoffnummer	MPA Karlsruhe Labor- untersuchungen	AGW/ EIFER Labor- untersuchungen	Solites Technikums- versuche	Solites Realmaßstabs- versuche
Standardbaustoffe	01	xx	x		
	02	x		x	
	03	x		x	x
	04	x			
	05	x			
	06	x			
therm. Verbessert mit Quarzsand	07	xx	x	x	x
	08	xx		x	x (fehlgeschlagen)
	09	x		x	x
	10	nicht geliefert			
	11	x			
	12	x			
therm. Verbessert mit Graphit etc.	13	xx	x	x	x
	14	x			
	15	x		x	
Eigen- mischung	16	x	x		

x: Untersuchungen wurden durchgeführt (im Technikum und Realmaßstab i.d.R. mit verschiedenen Randbedingungen)

xx: Es wurden zusätzliche Szenarienuntersuchungen durchgeführt.

Die im Labor der MPA Karlsruhe (KIT) durchgeführte Materialcharakterisierung (s. Tabelle 3-1 auf Seite 17) wurde an allen 16 Verfüllbaustoffen mit Ausnahme des nicht gelieferten Verfüllbaustoffs 10 durchgeführt. Bei den von AGW (KIT), EIFER und Solites durchgeführten Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuchen wurden hingegen lediglich ausgewählte Verfüllbaustoffe eingesetzt. Die Szenarienuntersuchungen der MPA Karlsruhe (KIT) umfassten vier Fokusmaterialien. Hierbei wurde darauf geachtet, aus den drei wichtigsten Verfüllbaustoffkategorien (Kategorie 1 bis 3) jeweils mindestens einen Verfüllbaustoff zu untersuchen. Bei der Auswahl der vier Verfüllbaustoffe für die Szenarienuntersuchungen der MPA Karlsruhe (KIT) (s. Abschnitt 3.1.4.1.2 und 3.1.4.1.3) wurden durch das Projektkonsortium die folgenden Kriterien berücksichtigt:

- Berücksichtigung je eines repräsentativen Baustoffs aus den Kategorien 1, 2, 3 und 5
- Sofern möglich: Auswahl von Verfüllbaustoffen, die mit den von AGW (KIT), EIFER und Solites untersuchten Verfüllbaustoffen übereinstimmen. Damit wird eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Untersuchungen untereinander erreicht.

2.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In diesem Abschnitt sind die das Forschungsvorhaben EWS-tech unterstützenden Firmen aufgeführt.

Das Projektkonsortium bedankt sich herzlich bei den nachfolgend aufgeführten Verfüllbaustoffherstellern für die Kooperation und die kostenfreie Bereitstellung der Verfüllbaustoffe:

- Dantonit A/S
- Fischer Spezialbaustoffe GmbH
- Hans G. Hauri KG
- HDG Umwelttechnik GmbH
- HeidelbergCement AG Geotechnik
- Rehau AG + Co
- Schwenk Zement KG
- Soilution GmbH

Weiterer Dank gilt der Jansen AG, der geoKOAX GmbH sowie der Rehau AG + Co für die kostenfreie bzw. vergünstigte Zurverfügungstellung von Erdwärmesondenrohren für die Technikums- und Realmaßstabsversuche. Desweiteren bedanken wir uns bei Gertec Maschinen- und Anlagenbau GmbH und der HDG Umwelttechnik GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung der Vorversuche zu den Technikumsversuchen (s. Abbildung 4-1 auf S. 229), sowie bei der Firma Andreas Stihl AG & Co. KG für die Bereitstellung eines Trennschleifers zur Untersuchung der rückgebauten Erdwärmesonden und bei der Firma Keller & Hahn Brunnenbau GmbH für die konstruktive Unterstützung bei der Planung und Erstellung der Bohrungen der Realmaßstabsversuchsanlage.

Im Rahmen des Projektes wurde sich intensiv mit dem ZAE Bayern ausgetauscht. Das ZAE Bayern besitzt unter anderem Erfahrungen bei der Durchführung von Systemdurchlässigkeitsversuchen von hinterfüllten Erdwärmesonden im Technikumsmaßstab (Kuckelkorn & Reuss 2011). Die Technikumsversuche des ZAE Bayerns dienen als Grundlage für das Konzept der vereinfachten Systemdurchlässigkeitsversuche im Labormaßstab. Das ZAE hat neben konzeptioneller Beratung zusätzlich eigene Versuchsergebnisse zur System- und Verfüllbaustoffdurchlässigkeit zur Verfügung gestellt und an internen Workshops zur Interpretation der Messergebnisse teilgenommen. Die notwendige Besandung der Rohre für die jeweiligen Versuche zur Vermeidung von Randumläufigkeiten wurde unter Anleitung des ZAE Bayern durchgeführt. Ferner hat uns das ZAE Bayern bei der Durchführung der Thermal Response Tests im Realmaßstab aktiv unterstützt.

3. LABORVERSUCHE

3.1. Entwicklung eines Prüfkonzpts für zementäre Verfüllbaustoffe (MPA Karlsruhe (KIT))

3.1.1. Untersuchungsziele

Zielsetzung des vorliegenden Teilprojekts war es, baustellentaugliche und reproduzierbare Prüfmethode zu identifizieren, mit denen eine umfassende Qualitätssicherung von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesondenanlagen unter Einfluss unterschiedlicher Anmischverhältnisse und Temperaturszenarien gewährleistet werden kann. Im Einzelnen wurde folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- Wie können die am Markt erhältlichen Materialien im Hinblick auf Eigenschaften und Inhaltsstoffe klassifiziert werden?
- Welche Laborprüfverfahren und -bedingungen sind zur Charakterisierung von Hinterfüllbaustoffen geeignet?
- Welche Prüfverfahren sind uneingeschränkt reproduzierbar, erfüllen die Anforderung an die Baustellentauglichkeit und können somit als Methode zur Qualitätssicherung von EWS-Systemen eingesetzt werden?
- Sind verschiedene Kennwerte von Hinterfüllbaustoffen korrelierbar und ist es so möglich Laborprüfungen durch Baustellenmethoden abzubilden?
- Welche der ermittelten Kennwerte sind als Grundlage für eine Qualitätsprüfung geeignet?

3.1.2. Untersuchungskonzept und Arbeitsprogramm

Die Auswahl der zu untersuchenden Hinterfüllbaustoffe erfolgte unter der Maßgabe, ein möglichst breites Spektrum an marktverfügbaren Materialien abzudecken, um den nicht normierten und somit möglicherweise sehr unterschiedlichen Materialzusammensetzungen und den daraus resultierenden Eigenschaften Rechnung zu tragen. Die untersuchten Kennwerte wurden unter den Gesichtspunkten der Praxisrelevanz, den Vorgaben in Richtlinien und Anleitungen, sowie der gängigen Baustellen- und Herstellerlaborpraxis ausgewählt. Die Auswahl der Prüfmethode und des Anmischprozesses wurde in enger Abstimmung mit Herstellern von Hinterfüllbaustoffen vorgenommen. Der in diesem Rahmen festgelegte Anmischprozess wurde von allen Projektpartnern

für die Laboruntersuchungen verwendet, und somit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Bei der Auswahl der Prüfmethode für das Untersuchungsprogramm wurde, ausgehend von den in den Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2012) des Landes Baden-Württemberg definierten Methoden darauf geachtet, dass alle für den späteren Verfüllprozess relevanten Mechanismen durch mindestens einen Kennwert abgedeckt sind. Jeder Kennwert wurde wiederum mit mehreren Prüfmethode untersucht, um die Repräsentativität, Reproduzierbarkeit und Praxistauglichkeit bewerten zu können. Die Gesamtheit der Prüfmethode wurde einer Bewertung unterzogen, mit dem Ziel, die am besten geeignete Prüfmethode zur Erhebung des gewünschten Parameters zu identifizieren.

Die Untersuchungen wurden weiterhin unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien durchgeführt. Das sog. Normalszenario wurde bei Standardlaborbedingungen und unter strikter Einhaltung der W/F-Werte nach Herstellervorgaben durchgeführt. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen wurden weitere Untersuchungen mit einem reduzierten Materialspektrum (vier Fokusmaterialien) und mit ausgewählten Prüfverfahren vorgenommen. Um neben Standardlaborbedingungen auch reale Baustellenbedingungen abzubilden wurden hierzu ein Temperaturszenario und ein Wassergehaltsszenario entwickelt. Das Temperaturszenario sollte sowohl niedrige Temperaturen des Hinterfüllvorgangs bei Baudurchführung während kalter Jahreszeiten als auch die Bedingungen im realen Bohrloch mit für den Untergrund typischen Temperaturen widerspiegeln. Zur Simulation eines erhöhten Wassergehalts in der Hinterfüllsuspension, wie er bei unsachgemäßer Dosierung auf einer Baustelle zu erwarten wäre, wurde ein Szenario mit um 5 %-Vol. erhöhtem Wassergehalt gegenüber dem Wassergehalt nach W/F-Wert Vorgabe des Herstellers gewählt.

Insgesamt wurden an 15 Hinterfüllmaterialien 13 Parameter mittels 16 Methoden im zeitlichen Verlauf untersucht. Eine Übersicht des Untersuchungsprogramms ist in Tabelle 3-1 (Normalszenario) und Tabelle 3-2 (Temperatur- und Wassergehaltsszenario) dargestellt.

Tabelle 3-1: Untersuchungsprogramm des Normalszenarios

Kennwert	Methode	Hinterfüllmaterial Nr.															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Suspensionsdichte	Dichtetopf (DIN 1015-6)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Dichtewaage (DIN 10414)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Viskosität	Rheometer	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Marsh-Trichter (DIN 4127)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Fließgrenze	Kugelharfe (DIN 4127)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Suspensionsstabilität	Wasserabsetzmaß (LQS EWS)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Filtratwasserabgabe	Filtration	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Filterpresse (DIN 4127)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Suspensionstemperatur	Digitalthermometer	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Erstarrungsverhalten	Rheometer	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
pH-Wert	pH-Sonde	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
elektrische Leitfähigkeit	Leitfähigkeitssonde	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Zusammensetzung	Röntgendiffraktometrie	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Abbindeverhalten	Kalorimetrie	x						x	x				x				
einaxiale Druckfestigkeit nach 7, 14, 28 und 91 Tagen	in Anlehnung an DIN 1015-11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Biegezugfestigkeit nach 7, 14, 28 und 91 Tagen	in Anlehnung an DIN 1015-11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

Tabelle 3-2: Untersuchungsprogramm des Temperatur- und Wassergehaltsszenarios der vier Fokusmaterialien

Kennwert	Methode	Hinterfüllmaterial Nr.											
		1	7	8	13					1	7	8	13
		Temperatur				Wassergehalt							
Suspensionsdichte	Dichtetopf (DIN 1015-6)	x	x	x	x					x	x	x	x
Viskosität	Rheometer	x	x	x	x					x	x	x	x
	Marsh-Trichter (DIN 4127)	x	x	x	x					x	x	x	x
Fließgrenze	Kugelharfe (DIN 4127)	x	x	x	x					x	x	x	x
Suspensionsstabilität	Wasserabsetzmaß (LQS EWS)	x	x	x	x					x	x	x	x
Filtratwasserabgabe	Filtration	x	x	x	x					x	x	x	x
Suspensionstemperatur	Digitalthermometer	x	x	x	x					x	x	x	x
Erstarrungsverhalten	Rheometer	x	x	x	x					x	x	x	x
einaxiale Druckfestigkeit nach 7, 14, 28 und 91 Tagen	in Anlehnung an DIN 1015-11	x	x	x	x					x	x	x	x
Biegezugfestigkeit nach 7, 14, 28 und 91 Tagen	in Anlehnung an DIN 1015-11	x	x	x	x					x	x	x	x

3.1.3. Untersuchte Verfüllbaustoffe

Insgesamt wurden 15 Hinterfüllmaterialien im Rahmen dieses Teilprojektes untersucht. Neben einer Eigenmischung nach VDI 4640 (Baustellenmischung mit 10 Gew.-% Bentonit, 10 Gew.-% CEM I Portlandzement, 30 Gew.-% Quarzsand und 50 Gew.-% Wasser) wurden 14 verschiedene, am Markt aktuell erhältliche Materialien (Stand 2013) untersucht.

Die für die Untersuchungen ausgewählten Baustoffe wurden auf Grundlage von Herstellerangaben und anhand ihrer Zusammensetzung sowie thermischen Eigenschaften vier Klassen zugeordnet:

- Nicht thermisch verbesserte Standard-Verfüllbaustoffe (6 Materialien)
- Thermisch verbesserte Hinterfüllbaustoffe auf Quarzsandbasis (6 Materialien)
- Thermisch verbesserte Hinterfüllbaustoffe mit anderen die Wärmeleitfähigkeit erhöhenden Ausgangsstoffen (3 Materialien)
- Baustellenmischung nach VDI 4640

Die Einteilung der Materialien in die Klassen ist in Tabelle 2-1 auf Seite 13 dargestellt. Neben den thermischen Eigenschaften weisen die Materialien darüber hinaus erhebliche Unterschiede bezüglich der zuzusetzenden Wassermengen (W/F-Wert) und der Ergiebigkeit auf.

3.1.4. Untersuchungsmethoden

3.1.4.1. Versuchsszenarien

3.1.4.1.1. Durchführung des Normalszenarios

Als Normalszenario wurden Untersuchungen bei 20°C und dem vom Hersteller vorgegebenen Wassergehalt definiert. Jedes Material wurde dabei mit einem definierten Satz aus mehreren Untersuchungsmethoden charakterisiert. Jeder Satz wurde direkt nach Anmischende sowie 1h, 2h, 5h, und 24h nach Anmischende wiederholt und so die zeitliche Entwicklung der Baustoffeigenschaften erfasst. Bei der Festlegung der Untersuchungssätze wurde insbesondere darauf geachtet, alle Untersuchungen innerhalb von maximal 30 Minuten durchzuführen, sodass jedes Ergebnis immer eindeutig einer Zeitstufe zugeordnet werden konnte. Zusätzlich wurde der Versuchsbeginn jeder Einzeluntersuchung dokumentiert. Bei Wiederholungs- und Mehrfachversuchen wurde immer die gleiche Reihenfolge der Untersuchungsmethoden eingehalten. Alle Versuche wurden, soweit nicht anders beschrieben, in einem klimatisierten Raum bei 20°C durchgeführt. Zum Mischen der Suspensionen wurde Karlsruher Leitungswasser benutzt, welches zuvor ebenfalls auf 20°C temperiert wurde. Da aufgrund der zeitlichen Beschränkung nicht alle Suspensionsuntersuchungen an der gleichen Anmischcharge durchgeführt werden konnten, wurde das Versuchsprogramm in zwei Teile aufgeteilt (Set 1 und Set 2). Die Zusammenstellung der Untersuchungssets sowie die zeitliche Reihenfolge der Untersuchungen kann Tabelle 3-3 entnommen werden.

Tabelle 3-3: Einteilung der Prüfmethode in Gruppen und jeweilige Reihenfolge der Versuchsdurchführung.

Set 1	Set 2
1. Absetzmaß	1. Dichtetopf
2. Temperatur	2. Dichtewaage
3. Dichtetopf	3. Filterpresse
4. Marshtrichter	4. Filtration
5. Kugelharfe	5. pH- Wert
6. Rheometer	6. Leitfähigkeit

An allen Materialien wurde zuerst Set 1 und danach Set 2 durchgeführt. Die Dichte im Dichtetopf wurde bei sämtlichen Untersuchungen (Set 1, Set 2, Nachuntersuchungen, Mehrfachversuche, Prismenherstellung etc.) immer als Kontrollparameter mitbestimmt.

3.1.4.1.2. Szenario zur Materialrobustheit gegenüber erhöhtem W/F-Wert

In diesem Szenario wurde gezielt der Einfluss einer Überdosierung des Wassergehalts auf die Baustoffeigenschaften untersucht. Der Wassergehalt wurde, bezogen auf die Ausgangswassermenge der Herstellerangaben (W/F-Wert), um 5 %-Vol. erhöht. Sämtliche Einzeluntersuchungen wurden analog zu den Untersuchungen des Nomalszenarios durchgeführt.

Im Rahmen der Szenarienuntersuchungen wurden die Basisvergleichswerte der vier Fokusmaterialien erneut erhoben um zusätzliche Vergleichswerte im Sinne der Methodenreproduzierbarkeit zu erhalten. Die Auswertung der Szenarien im Ergebniskapitel bezieht sich im Folgenden auf diese neuen Basiswerte.

3.1.4.1.3. Szenario zur Materialrobustheit bei reduzierter Temperatur

Während im Labor in der Regel bei Temperaturen von 20°C und definierter Luftfeuchte gearbeitet wird, sind die Verfüllbaustoffe auf der Baustelle und insbesondere im Kontakt mit Erdreich bzw. innerhalb der Bohrung deutlich geringeren Temperaturen von ca. 10°C ausgesetzt. Diese Fragestellung wurde hier eingehend untersucht. Es wurde versucht, die Raumtemperatur so nah wie möglich an die Zieltemperatur von 10 °C zu regulieren, um während der Versuchsdurchführung eine möglichst geringe Erwärmung der Arbeitsmittel und der Untersuchungsmaterialien zu gewährleisten. Eine außerordentliche Hitzeperiode verhinderte während der Untersuchungswoche eine Absenkung der Raumtemperatur, welche letztendlich zwischen 18,5 °C und 20 °C pendelte. Um die Suspensionstemperatur bei 10 °C zu halten, wurden sämtliche Arbeitsmittel (Dichtetopf, Marsh-Trichter, etc.) sowie die Ausgangsmaterialien schon am Vortag in einem Kühlschranks bei 8 °C gelagert. Ebenfalls wurde die Suspension zwischen allen Einzelversuchen im Kühlschranks gelagert, um die Expositionszeit bei Raumtemperatur zu minimieren. Der Thermostat des Rheometers wurde auf 8 °C eingestellt, um die Zieltemperatur im Rheometertopf von 10 °C zu erreichen.

Zur Kontrolle der Suspensionstemperatur wurde diese vor und nach jeder Untersuchung gemessen und dokumentiert. Die Temperaturerhöhung lag im Verlauf eines Untersuchungsdurchgangs im Bereich < 1 K. Abweichend vom Untersuchungsablauf des Normal- und Wassergehaltsszenarios wurde während der Kälteversuche pro Tag nur je ein Material untersucht um die Kühlzeiten der Arbeitsmaterialien zu maximieren.

Die Auswertung des Szenarios gegenüber reduzierter Temperatur erfolgte parallel zur Robustheit gegenüber erhöhtem W/F-Wert ebenfalls mit den neu erhobenen Basiswerten.

3.1.4.2. Untersuchungsprogramm

3.1.4.2.1. Anmischvorgang

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Projektpartner wurde vor Versuchsbeginn eine gemeinsame Arbeitsanweisung zur Durchführung des Anrührvorgangs verfasst. Diese beinhaltete unter anderem die Festlegung der Rühraufsätze, des Messbechers, der Drehzahl des Rührwerks (650 U/min) (Abbildung 3-1, links) sowie des zeitlichen Ablaufs. Das exakte Vorgehen sowie die verwendeten Materialien sind in Kapitel 3.2.3.3 beschrieben. Abweichend wurde lediglich eine Dissolverscheibe mit Zacken verwendet (IKA R 1300), die jedoch laut Hersteller bei gleichem Durchmesser keine Änderung des Anmischverhaltens verursacht. Dieser Ablauf wurde mit den einzelnen Baustoffherstellern abgestimmt. Der Mischvorgang (Abbildung 3-1, rechts) wurde auf insgesamt 5 min zzgl. der Zeit für die Feststoffzugabe eingestellt. Die angemischten Volumina variierten zwischen 2,5 l und 3,5 l pro Mischvorgang.

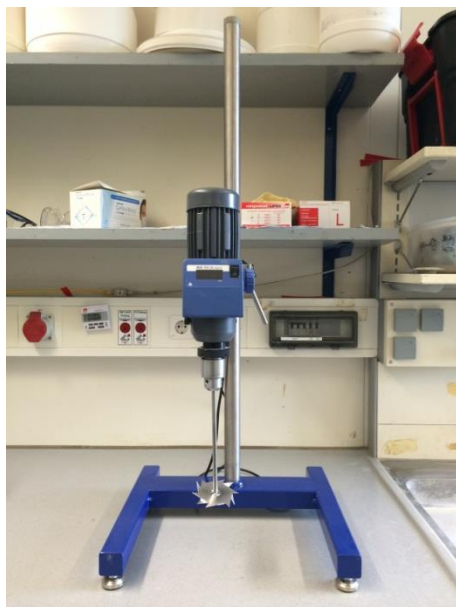


Abbildung 3-1: Labormischer mit Dissolverscheibe (links), Suspension während des Anmischvorgangs (rechts).

3.1.4.2.2. Absetzmaß

Die Bestimmung des Absetzmaßes erfolgte in Anlehnung an die LQS-EWS des Landes Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2012). Hiernach wurde zur Bestimmung des Absetzmaßes ein 250 ml Glaszylinder direkt nach Anmischende mit 250 ml Suspension befüllt (Eichstrich) und erschütterungsfrei gelagert (Abbildung 3-2, links und rechts oben). Der Zylinder wurde dampfdicht verschlossen. Die Erfassung des überstehenden Wassers erfolgte durch Ablesen an der Eichskala zu definierten Zeitpunkten (Abbildung 3-2, rechts unten).

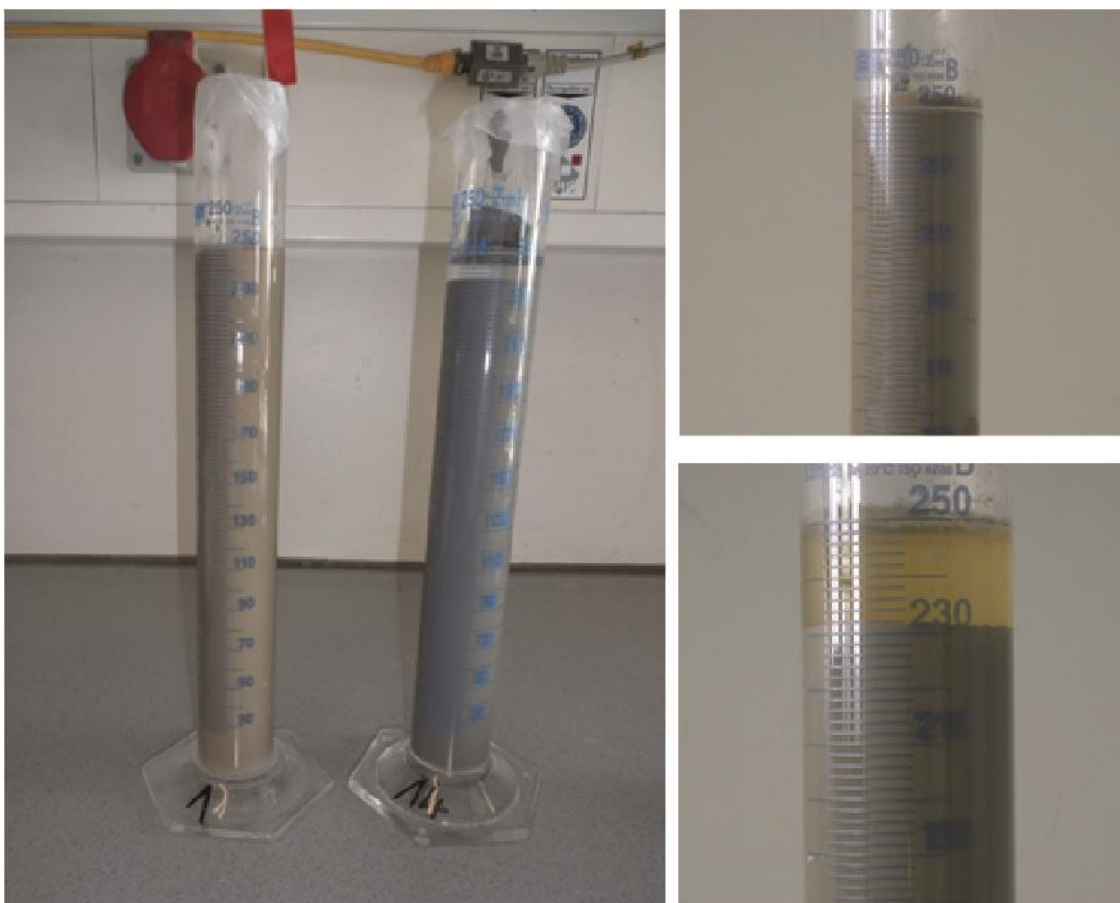


Abbildung 3-2: Abgedeckte Standzylinder (links); Vergleich eines Materials bei Untersuchungsbeginn (rechts oben) und nach 5 h (rechts unten).

3.1.4.2.3. Dichtetopf

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte nach DIN EN 1015-6 mittels eines 1 dm³ fassenden Dichtetopfs. Der Topf wurde mit etwas mehr als einem Liter Suspension gefüllt (Abbildung 3-3, links). Das überstehende Material wurde mit einem Metalllineal abgezogen (Abbildung 3-3, rechts), der Topf außen sorgfältig gesäubert und anschließend gewogen.



Abbildung 3-3: Befüllung des Dichtetopfes mit Suspension (links), Abziehen der Überschüssigen Suspension (rechts).

3.1.4.2.4. Dichtewaage

Zur Bestimmung der Dichte in Anlehnung an DIN EN ISO 10414-1 wurde eine Druckspülungswaage der Fa. Ofite benutzt (Abbildung 3-4, links). Die Waage wurde bis knapp unter den Rand mit Suspension gefüllt, der Deckel aufgesetzt und festgeschraubt. Durch eine Öffnung in der Deckelmitte wurde mittels einer Handpumpe weitere Suspension in die Waage gepresst bis das Druckventil von selbst schloss (Abbildung 3-4, rechts). Die Waage wurde von außen gesäubert und anschließend zur Messung auf dem Balken austariert.



Abbildung 3-4: Einzelkomponenten der Druckspülungswaage (links), Druckbefüllung der Waage mit Suspension mittels Pumpe (rechts).

3.1.4.2.5. Marsh-Trichter

Die Bestimmung der Marsh-Zeit erfolgte in Anlehnung an DIN 4127. Der Auslauf des Trichters (Abbildung 3-5) wurde zunächst händisch verschlossen und anschließend der Marsh-Trichter durch das innenliegende Sieb bis zur Markierung gefüllt. Die Zeitmessung startete mit Öffnen des Trichters und endete nach Auslaufen von einem Liter Suspension (Eichstrich am Messbecher). Bei zähflüssigen Suspensionen mit langen Auslaufzeiten wurde der Versuch nach spätestens 3 min abgebrochen und die bis dahin ausgelaufene Suspensionsmenge erfasst. Die Restauflaufzeit wurde nicht erfasst.

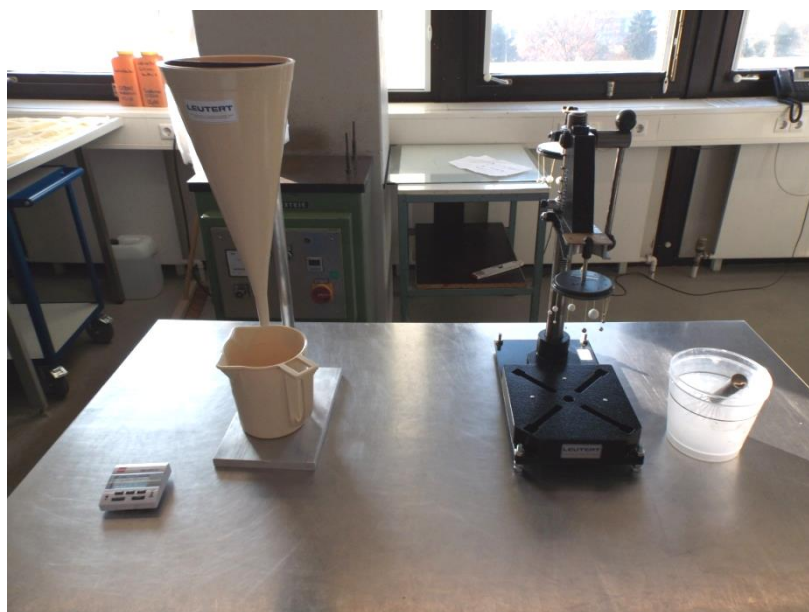


Abbildung 3-5: Marsh-Trichter (links) und Kugelharfe (rechts)

3.1.4.2.6. Rheometer

Die Suspensionen wurden parallel zu den empirischen Prüfmethode mit einem Rotationsrheometer auf ihre rheologischen Eigenschaften hin untersucht. Hierzu wurde ein Messsystem bestehend aus einem Hochleistungsrheometer *ThermoFisher Haake MARS* und einer speziell für Baustoff Suspensionen entwickelten Messzelle – der sog. Baustoffzelle – eingesetzt (siehe Abbildung 3-6). Die Baustoffzelle besteht aus einem zylindrischen Gefäß mit einer variabel profilierbaren Wandung, das mit Zementleim gefüllt wird. Eine detaillierte Beschreibung des Messsystems kann Haist (2009) entnommen werden. Durch die in die Behälterwandung integrierten Lamellen wird ein Abgleiten der Baustoff Suspension in der Kontaktfläche zur Behälterwandung verhindert. Die mit Baustoff Suspension gefüllte Baustoffzelle wird in das Rheometer eingebaut. Über einen padelartigen Drehkörper, der mit dem Rheometer verbunden und in die Suspension eingetaucht wird, können definierte Scherbelastungen in den frischen Baustoff eingetragen werden.

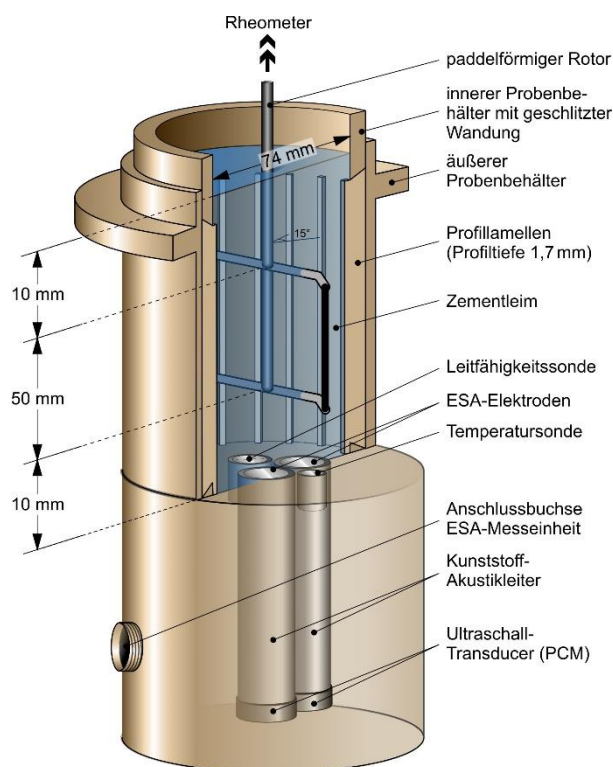


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung des Messsystems (Baustoffzelle) einschließlich der elektroakustischen Messeinheit (letztere wurde im Projekt nicht eingesetzt) (Haist, 2009)

Um das rheologische Verhalten der Suspension bei sehr geringen Scherbelastungen messen zu können, wird die Schubbelastung τ in ausgewählten Versuchen in Form einer oszillatorischen Schwingung, d. h. jeweils für sehr kurze Zeit ($t < 0,5$ s), auf die Suspension aufgebracht und die resultierende Verformung γ gemessen. Im Falle eines ideal-elastischen Werkstoffs reagiert das Material auf die Belastung τ mit einer instantanen Verformung γ , so dass beide Schwingungen in Phase sind. Der Quotient aus der Schubspannungsamplitude τ_A und der Schubverformungsamplitude γ_A ist gleich dem Schubmodul G des Werkstoffs. Bei viskoelastischen Baustoffsuspensionen sind beide Kenngrößen Schubspannung τ_A und Schubverformung γ jedoch zeitlich versetzt. Der aus dem Quotient beider Amplituden errechnete Schubmodul ist folglich eine komplexe Zahl und wird mit einem Stern zu G^* gekennzeichnet.

Steigert man schrittweise die Schubspannungsamplitude τ_A ausgehend von einem sehr geringen Wert und misst für jeden Wert den resultierenden Schubmodul (hier als Betrag der komplexen Zahl $|G^*|$), so ergibt sich der in Abbildung 3-7 gezeigte Zusammenhang.

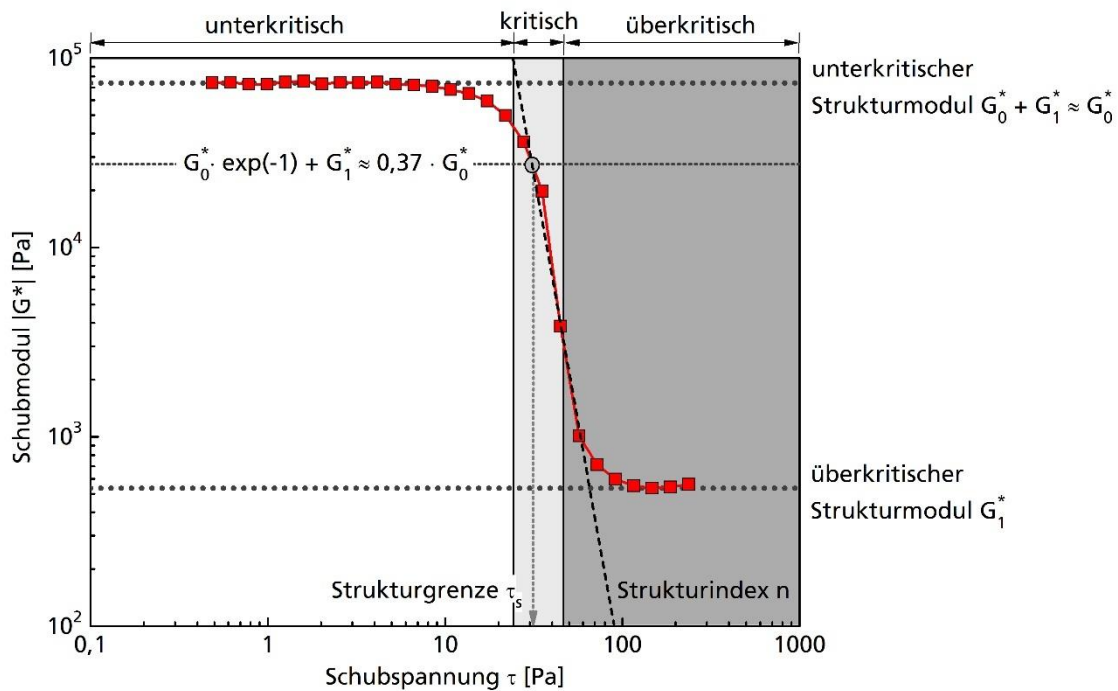


Abbildung 3-7: Betrag des Schubmoduls $|G^*|$ in Abhängigkeit von der anliegenden Schubspannung τ (d.h. Schubspannungsamplitude τ_A) (Haist, 2009)

Abbildung 3-7 zeigt, dass Baustoffsuspensionen für geringe und nur kurzzeitig wirkende Schubspannungen einen annähernd konstanten, sehr hohen Schubmodul (im Folgenden als unterkritischer Strukturmodul G_0 bezeichnet) aufweisen und somit annähernd ideal-elastisch reagieren. Ab einer als kritisch bezeichneten Belastung τ_s ist jedoch ein starker Abfall des komplexen Schubmoduls festzustellen. Gleichzeitig nimmt der Phasenverschiebungswinkel δ – dieser errechnet sich aus der Phasenverschiebungszeit Δt und der Messfrequenz f zu $\delta = \Delta t \cdot f \cdot 360 [^\circ]$ – zwischen der Belastung τ und der Verformung γ stark zu (hier nicht dargestellt). Das Materialverhalten geht daher vom elastischen in ein viskoses Verhalten über, und die Baustoffsuspension beginnt zu fließen. Dieses Verformungsverhalten wurde im vorliegenden Projekt über eine Regressionsfunktion entsprechend Gleichung 3-1 erfasst.

$$|G^*|(\tau) = G_0 \cdot \exp\left\{-\left[\frac{\tau}{\tau_s}\right]^n\right\} + G_1 \tag{ 3-1 }$$

Aufgrund des hoch-dynamischen Charakters der oszillatorischen Messungen kann der Einfluss der Belastungsdauer in diesen Messungen vernachlässigt werden. Entsprechend ist diese Methode in idealer Weise dazu geeignet, die ideal-elastischen Verformungsanteile der Baustoffsuspensionen zu ermitteln. Nachfolgend werden die Kenngrößen G_0 , G_1 sowie τ_s zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften der Baustoffsuspension im Ruhezustand angegeben. Insbeson-

dere der unterkritische Schubmodul G_0 und die Strukturgrenze τ_s geben dabei wichtigen Aufschluss über das Fließverhalten der Suspension bei geringen Fördergeschwindigkeiten sowie im Ruhezustand.

Zur Beschreibung des Fließverhaltens der Baustoffsuspensionen bei erhöhten Scherbelastungen wurde die sog. Fließkurve der Suspensionen ermittelt. Hierzu wurde die Schubspannung linear innerhalb von 180 s von 0 Pa auf maximal 480 Pa bzw. auf eine maximale Schergeschwindigkeit von 80 s^{-1} gesteigert, dieser Wert für 90 s konstant gehalten und anschließend die Schergeschwindigkeit wiederum linear innerhalb von 120 s auf 0 Pa reduziert.

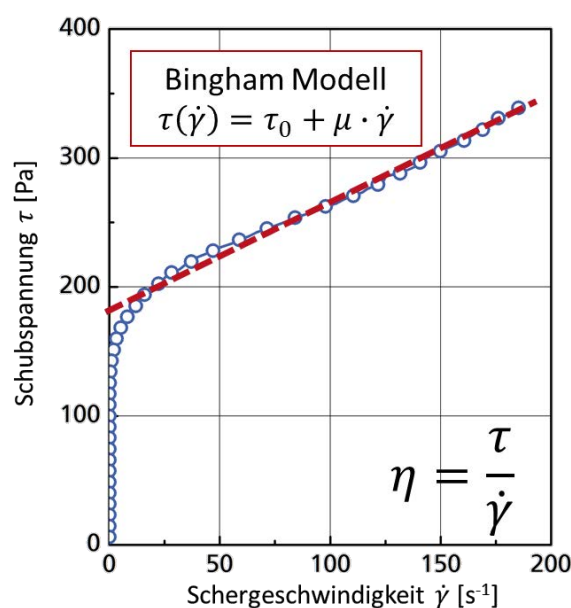


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung der Fließkurve im Fließversuch inkl. zugehöriger Regressionsfunktion nach Bingham. η = dynamische Viskosität

Maßgebend zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften ist die dynamische Viskosität, die über das Bingham Modell vereinfacht durch die Fließgrenze und die plastische Viskosität ausgedrückt werden kann. Abbildung 3-8 zeigt exemplarisch die resultierende Fließkurve bei abnehmender Schubspannung und die zugehörige Regressionsfunktion. Die Fließkurve wurde dabei für Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma} > 1 \text{ s}^{-1}$ mittels des Bingham Modells ausgewertet (siehe Gleichung 3-2).

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (3-2)$$

Hierin bezeichnet τ_0 die sogenannte Fließgrenze und beschreibt diejenige Schubspannung, bei der die Suspension zu fließen beginnt. Das Fließverhalten ist weiterhin durch die sog. plastische Viskosität μ gekennzeichnet.

3.1.4.2.7. Kugelharfe

Die Bestimmung der Fließgrenze erfolgte in Anlehnung an DIN 4127 mittels einer Kugelharfe der Fa. Leutert (Abbildung 3-5) gemäß der Herstellerangabe. Mit einem Schneebeesen wurde 1 l der Suspension in einem Messbecher 1 min lang gerührt um thixotrope Effekte zu unterbinden. Anschließend wurde der Kugelsatz auf die Suspensionsoberfläche abgelassen und bestimmt, welche Kugeln auf der Oberfläche verbeiben und welche einsinken. Anhand der zugehörigen Eich-tabelle wurde anschließend die Fließgrenze ermittelt.

3.1.4.2.8. Filtration

Zur Bestimmung der Wasserabgabemenge der Suspensionen wurden diese in Anlehnung an DIN 4127 filtriert. Hierfür wurden je 250 ml Suspension in eine Filternutsche (Keramik, Durchmesser von 13,5 cm) gefüllt, glattgestrichen und anschließend 7,5 min lang durch eine Wasserstrahlpumpe mit Unterdruck beaufschlagt (Abbildung 3-6, links). Auftretende Trocknungsrisse an der Oberfläche wurden über den gesamten Versuchszeitraum mit einem Spatel wieder verschlossen.



Abbildung 3-6: Filtrationseinheit mit Filternutsche, Exsikkator und Wasserstrahlpumpe (links), Filterpresse (rechts).

3.1.4.2.9. Filterpresse

Eine weitere Bestimmung der Wasserabgabemenge erfolgte in Anlehnung an DIN 4127 mit einer Filterpresse der Fa. Leutert (Abbildung 3-6, rechts). Zur Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Filtration wurde ebenfalls mit 250 ml Suspension und einem Versuchszeitraum von 7,5 min gearbeitet. Die 250 ml entsprechen hierbei der Füllhöhe im Zylinder gemäß DIN. Der nötige initiale Druck von 7 bar wurde durch kleine Einmalkartuschen aufgebaut.

3.1.4.2.10. Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert

Das entwässerte Filtrat aus Filtration und Filterpresse wurde jeweils direkt im Anschluss noch auf weitere Parameter untersucht. Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte mittels Indikatorstäbchen der Fa. Merck auf 0,5 pH-Einheiten genau. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit einem Gerät der Fa. Mettler Toledo bestimmt.

3.1.4.2.11. Temperatur

Die Bestimmung der Suspensionstemperatur erfolgte jeweils zu Beginn eines Untersuchungssets. Abweichend hierzu wurde die Suspensionstemperatur während des Kälteszenarios nach jeder Untersuchung gemessen und dokumentiert. Zur Temperaturerfassung wurde ein PT-100 Sensor der Fa. Testo sowie das Handgerät Testo-112 benutzt.

3.1.4.2.12. Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Die Herstellung aller Prismen für die Prüfungen der Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit erfolgte in Styroporformen. Pro Hinterfüllmaterial wurden für jede einzelne Prüfung drei Prismen hergestellt und geprüft. Die Prüfung erfolgte nach 7, 14, 28 und 91 Tagen. Zuzüglich dreier Reserveprismen wurden pro Material 15 Prismen hergestellt. Diese wurden in jeweils zwei Chargen aus Suspension vergossen. Die drei Prismen einer Prüfung stammen hierbei immer aus der gleichen Anmischung (Abbildung 3-7, links). Die Prismen wurden im Anschluss bei 100 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Am ersten Tag fand die Lagerung unter feuchten Jutetüchern statt, um die Suspensionen anfänglich nicht zu erschüttern. Die restliche Zeit wurden die Prismen in einem Klimaschrank bei 20 °C und 100 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Am Tag der Prüfung (Abbildung 3-7, rechts) wurden die Prismen aus ihren Styroporformen gelöst und Unebenheiten auf der Oberfläche entgratet. Die Prüfungen der Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit der Prismen erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1015-11 mit dem Prüfgerät TC4 der Fa. Toni Technik. Die Laststufen wurden jeweils an die realen Druckfestigkeiten angepasst. Die Lagerung der Prismen für das Temperaturszenario erfolgte im Kühlschrank bei 10 °C und 100 % relative Luftfeuchtigkeit.



Abbildung 3-7: Frisch eingefüllte Suspension in Styroporformen (links), Prismen nach 28 Tagen Lagerung (rechts).

3.1.4.2.13. Röntgenographische Phasenanalyse XRD

Der Mineralbestand der Hinterfüllmaterialien wurde mittels röntgenographischer Phasenanalyse am Röntgendiffraktometer D8 Advance der Fa. Bruker detektiert. Die Auswertung der Daten erfolgte unter Zuhilfenahme der Software DIFFRAC Plus Evaluation.

3.1.4.2.14. Isothermische Kalorimetrie

Die freigesetzte Reaktionswärme der Hinterfüllmaterialien wurde mit Hilfe eines isothermen Wärmeflusskalorimeters TAM Air der Fa. TA Instruments ermittelt.

Für jedes der untersuchten Hinterfüllmaterialien wurde eine Feststoffeinwaage von 2,0 g sowie von 3,0 g (zu Vergleichszwecken) mit 1,0 g destilliertem Wasser vermischt. Der Mischvorgang erfolgt innerhalb des Geräts, so dass die Aufzeichnung des Wärmeflusses mit der Wasserzuzugabe beginnt. Die Integration der Wärmeflüsse über den gesamten Versuchszeitraum von 7 Tagen je Probe ergab die jeweils insgesamt freigesetzte Reaktionswärme, welche größtenteils der Hydratationswärme des Zementanteils des jeweiligen Hinterfüllmaterials zuzuordnen ist.

3.1.4.2.15. Untersuchungen für Projektpartner

Innerhalb des Teilprojekts und im Rahmen des Gesamtprojekts wurden folgende Untersuchungen für Projektpartner durchgeführt.

- Röntgenographische Phasenanalysen (XRD) (ungefähr 130 Analysen)
- Bestimmung der Quecksilberdruckporosimetrie (ungefähr 80 Analysen)
- Bestimmung der Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 1015-11 (ungefähr 45 Prismen)
- Vergleichsuntersuchen; hier insbesondere Anmischtechnik, Wasserabsetzmaß, Dichtebestimmung, Marsh-Trichter, Kugelharfe

3.1.5. Untersuchungsergebnisse

3.1.5.1. Eigenschaften der Hinterfüllmaterialien

3.1.5.1.1. Überblick

Zur allgemeinen Abbildung eines Wertespektrums der am Markt verfügbaren Hinterfüllmaterialien wurden für alle Untersuchungen die statistischen Kennwerte erhoben (Tabelle 3-4). Die prozentuale Standardabweichung wurde als Maß der Streuung der Ergebnisse angegeben. Hier ist zu bemerken, dass die Dichten und Festigkeiten nur eine sehr geringe Streuung aufweisen, während das Absetzmaß, die Marsh-Zeit und die rheologischen Parameter (Viskosität, Fließgrenze, etc.) einen großen Schwankungsbereich der Werte besitzen.

Tabelle 3-4: Statistische Kennwerte erhoben über alle Materialien für das Normalszenario

Kennwert	Einheit	Zeit	n	Min	Max	Mittel	Median
Dichte (Herstellerangabe)	[g/cm ³]	0 h	16	1,43	1,90	1,62	1,58
Dichte (Dichtetopf)	[g/cm ³]	0 h	16	1,43	1,87	1,60	1,55
Dichte (Dichtewaage)	[g/cm ³]	0 h	16	1,45	1,88	1,62	1,55
Absetzmaß	[%]	24 h	16	0	12	4,16	3,6
Wasserabgabe (Filtration)	[%]	0 h	16	26,72	57,76	37,65	38,05
Wasserabgabe (Filterpresse)	[%]	0 h	16	16,76	50,46	34,46	34,00
pH	[-]	0 h	16	11,50	13,50	12,70	13,00
elektrische Leitfähigkeit	[mS/cm]	0 h	16	5,54	20,50	10,48	8,74
Fließgrenze (Kugelharfe)	[N/m ²]	0 h	16	4,77	64,00	26,12	15,02
Fließgrenze (Rheometer)	[N/m ²]	0 h	15	4,49	48,32	15,55	10,87
Schubmodul	[Pa]	0 h	16	38,58	12360,19	3457,78	1615,92
Strukturgrenze	[Pa]	0 h	15	0,47	19,77	4,02	1,58
Marsh-Zeit	[s]	0 h	16	35	180	77	46
Biegezugfestigkeit	[N/mm ²]	91 d	15	0,87	4,52	2,34	2,26
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	91 d	16	0,56	12,21	7,23	7,38

3.1.5.1.2. Dichte

Die in Abbildung 3-8 dargestellte Suspensionsdichte wurde mit dem Dichtetopf (links) sowie mit der Dichtewaage (rechts) bestimmt. Die mittels Dichtetopf ermittelten Werte von 11 der 15 Hinterfüllmaterialien liegen in einem Bereich von 1,43 g/cm³ bis 1,64 g/cm³. Die maximale Suspensionsdichte mit 1,86 g/cm³ wurde von Material Nr. 11 erreicht.

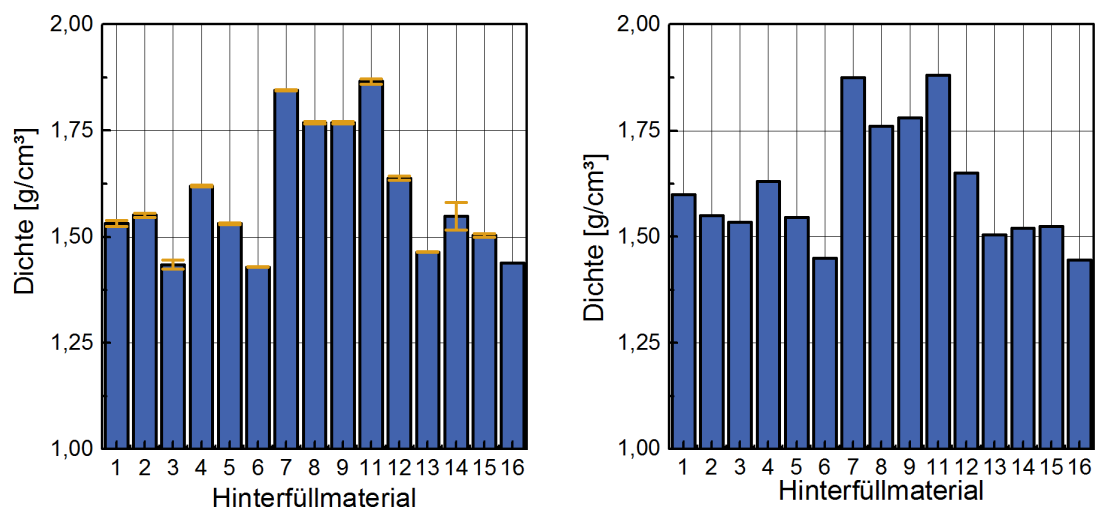


Abbildung 3-8: Ergebnisse des Dichtetopfs mit Standardabweichung (links) sowie der Dichtewaage (rechts)

3.1.5.1.3. Rheologische Eigenschaften

Die rheologischen Eigenschaften der Suspensionen wurden mit dem Marsh-Trichter-Verfahren (Abbildung 3-9, links), der Kugelharfe in Anlehnung an DIN 4127 (Abbildung 3-9, rechts) sowie durch Messung mit einem Rotationsrheometer ermittelt. Die Auslaufzeiten der frischen Suspensionen im Marsh-Trichter-Versuch betragen zwischen 35 s und 85 s. Einige Materialien wiesen jedoch deutlich höhere Werte auf (Material Nr. 3 mit 170 s) bzw. erlaubten aufgrund ihrer Konsistenz überhaupt keine Durchführung des Marsh-Trichter-Versuchs (Materialien Nr. 4 und 16). Die mit der Kugelharfe ermittelten Fließgrenzen der unterschiedlichen Materialien unterschieden sich ebenfalls sehr stark und betragen typischerweise zwischen 4,8 N/m² und 21,3 N/m². Lediglich Material 1 (33,1 N/m²) und Material 3 (55,0 N/m²) zeigten höhere Werte. An den Materialien Nr. 4, 11 und 16 konnte die Fließgrenze nicht mit diesem Verfahren ermittelt werden, da ihre Konsistenz außerhalb der Messgrenze der verwendeten Kugelharfe lag.

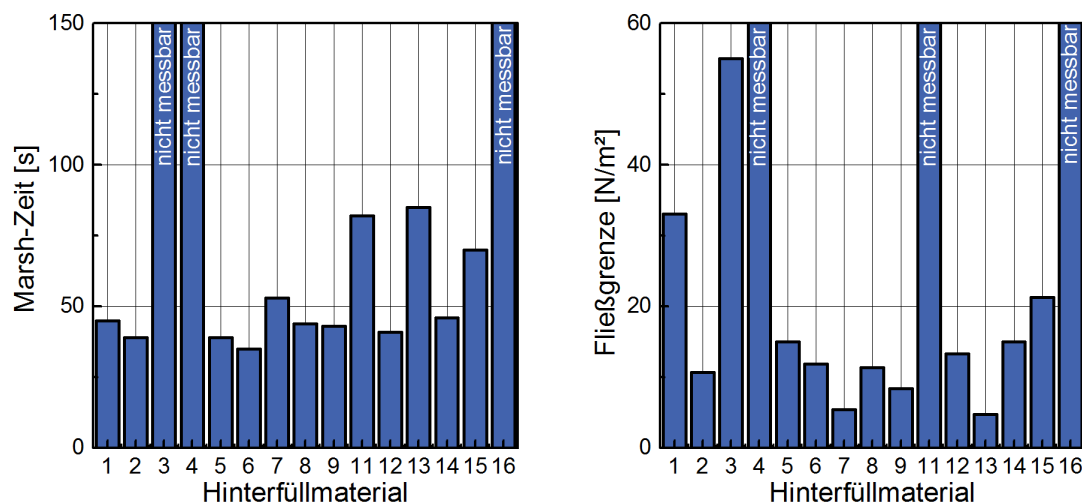


Abbildung 3-9: Marsh-Zeit (links) und Fließgrenze (rechts).

Zur Kontrolle dieser etablierten Baustellenmethoden wurden die rheologischen Eigenschaften der Suspensionen zusätzlich mittels eines Rheometers untersucht. Die plastische Viskosität (Abbildung 3-10) der Materialien bewegte sich hierbei im Bereich zwischen 0,25 Pa * s bis 1,25 Pa * s. Die beiden höchsten Werte erreichten die Materialien Nr. 4 und 16. Für Material Nr. 11 und 15 konnte die plastische Viskosität nicht ermittelt werden. Der Grund dafür ist, dass die Messkurve nicht der für die beiden Parameter typisch zu erwarteten Kurven entsprach und somit kein Curve fitting angewendet werden konnte. Entsprechend konnten die Parameter auch nicht aus der gefitteten Funktion abgeleitet werden. Die mit dem Rheometer ermittelten Fließgrenzen (Abbildung 3-10) waren durchgehend niedriger als die mittels Kugelharfe ermittelten Werte. Die Werte bewegen sich im Bereich zwischen 5 und 35 N/m². Ähnlich wie die Kugelharfe waren die Fließgrenzen der Materialien Nr. 1, 3, 4, 5, 12 und 16 am höchsten. Eine Auswertung der Messung für die Materialien Nr. 11 und 15 war auch hier nicht möglich.

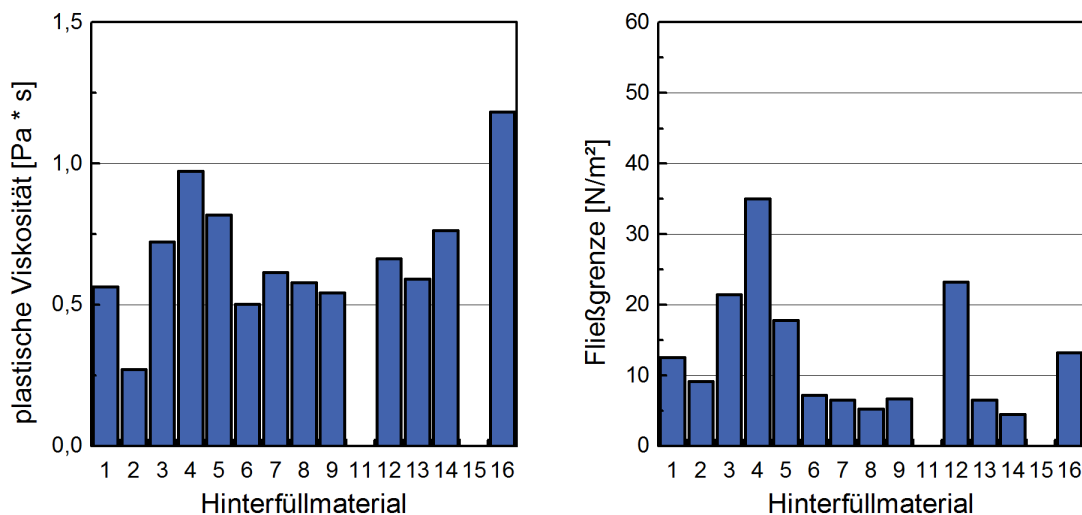


Abbildung 3-10: Messergebnis der plastischen Viskosität (links) und der Fließgrenze (rechts) mit dem Rheometer.

3.1.5.1.4. Homogenität und Sedimentationsstabilität

Ein wichtiger Parameter zur Bewertung der Homogenität einer Suspension ist das Wasserabsetzmaß. Die zeitliche Entwicklung des Absetzmaßes der untersuchten Baustoffe über einen Zeitraum von 24 Stunden ist in Abbildung 3-11 dargestellt. Man sieht, dass das Absetzen bei nahezu allen Materialien bereits nach zwei Stunden zum Erliegen kommt. Ausnahmen bilden die Materialien Nr. 7 und Nr. 13, welche ein stetig zunehmendes Absetzmaß aufwiesen und zum letzten Messzeitpunkt nach 24 Stunden ihr Maximum eventuell noch nicht erreicht hatten. Für sechs der untersuchten Materialien wurde ein Absetzmaß ≤ 2 Vol.-%, entsprechend den Forderungen in LQS EWS eingehalten. Die Mehrzahl der Materialien wies ein deutlich größeres Absetzmaß von bis zu 6 Vol.-% auf. Zwei weitere Materialien (Nr. 8 und 9) wiesen ein Absetzmaß von bis zu 12 Vol.-% auf (Abbildung 3-11).

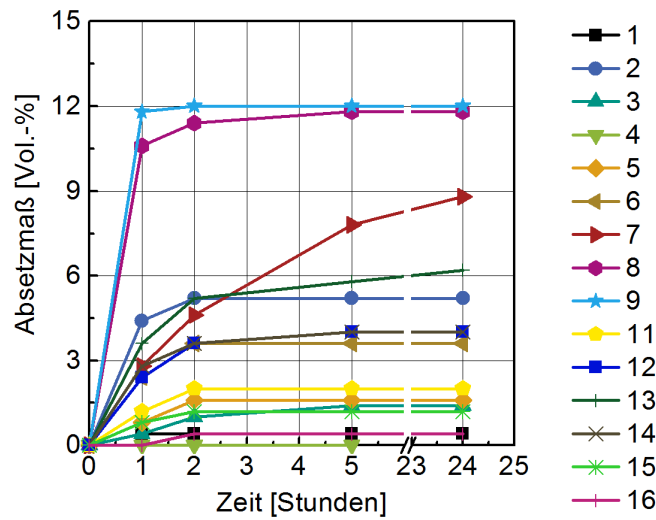


Abbildung 3-11: Absetzmaß im zeitlichen Verlauf.

Ein weiteres Maß für die Suspensionsstabilität ist die Abgabe von Filtratwasser. Die abgegebene Wassermenge je Suspensionsvolumen wurde zum einen mittels Vakuum-Filtration und zum anderen mittels einer Filterpresse nach DIN 4127 ermittelt. Die Werte der Vakuum-Filtration liegen für alle Materialien direkt nach dem Anmischen in einem Bereich zwischen 27 Vol.-% bis 58 Vol.-% (Abbildung 3-12) bezogen auf das gesamte Suspensionsvolumen.

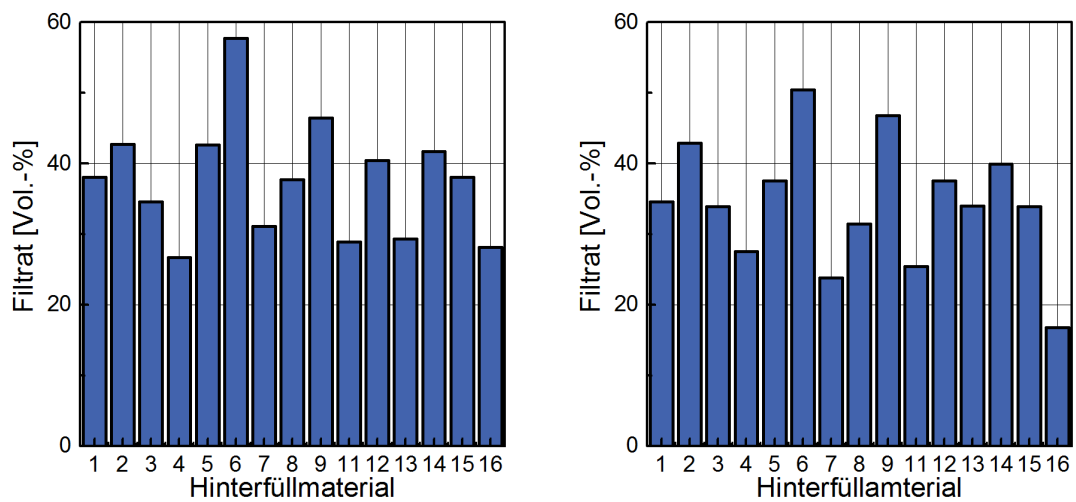


Abbildung 3-12: Filtrierbarer Suspensionsanteil bestimmt mittels Vakuum-Filtration (links) und Filterpresse (rechts).

3.1.5.1.5. Mechanische Eigenschaften

Die Druckfestigkeiten nach DIN 1015-11 wurden nach 7, 14, 28 und 91 Tagen bestimmt (Abbildung 3-13). Mit wenigen Ausnahmen nahm die Druckfestigkeiten im zeitlichen Verlauf kontinuierlich zu. Nach 28 Tagen erreichten alle Materialien mit Ausnahme der Baustellenmischung (Nr. 16) eine Festigkeit von $> 1 \text{ N/mm}^2$. Allerdings zeigt sich, dass eine Reihe von Materialien auch bei einer Lagerungstemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (im Einbauzustand werden deutlich geringere Temperaturen erwartet) noch im Alter von 7 Tagen und manche selbst im Alter von 14 Tagen noch nicht prüfbar waren. Diese langsame Festigkeitsentwicklung ist aus Sicht der Gewährleistung einer guten Bohrlochintegrität kritisch anzusehen.

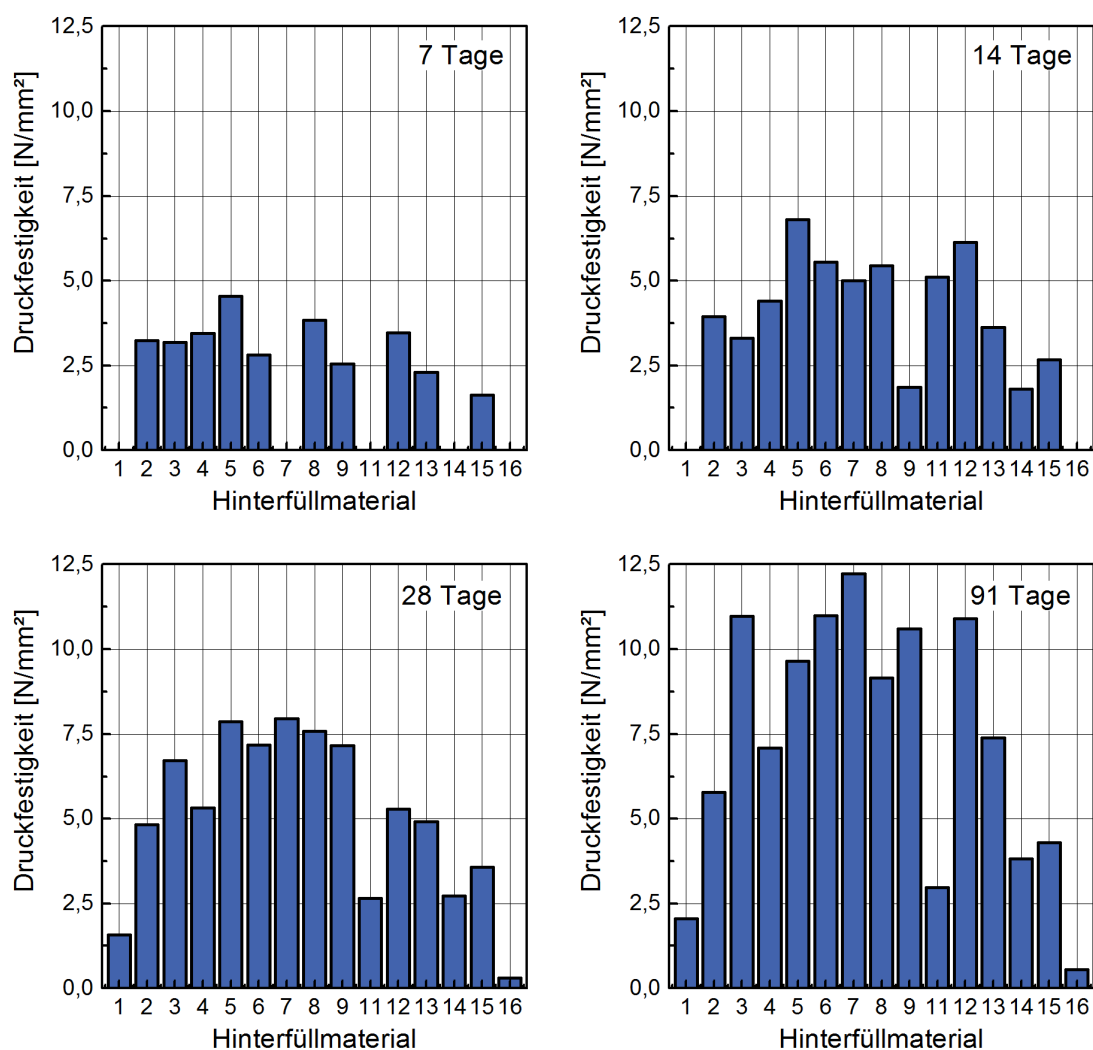


Abbildung 3-13: Druckfestigkeiten nach 7, 14, 28 und 91 Tagen ermittelt nach DIN EN 1015-11.

Parallel zur Druckfestigkeit wurde auch die Biegezugfestigkeit nach 7, 14, 28 und 91 Tagen bestimmt (Abbildung 3-14). Mit Ausnahme von Material Nr. 1, 3 und 11 besitzen alle Materialien

nach 28 Tagen eine Biegezugfestigkeit $> 1 \text{ N/mm}^2$. Aufgrund der zu geringen Festigkeit, konnten für Material Nr. 1, 7 und 16 nach 7 Tagen noch keine Prüfergebnisse ermittelt werden, Material Nr. 16 war selbst nach 91 Tagen noch nicht prüfbar.

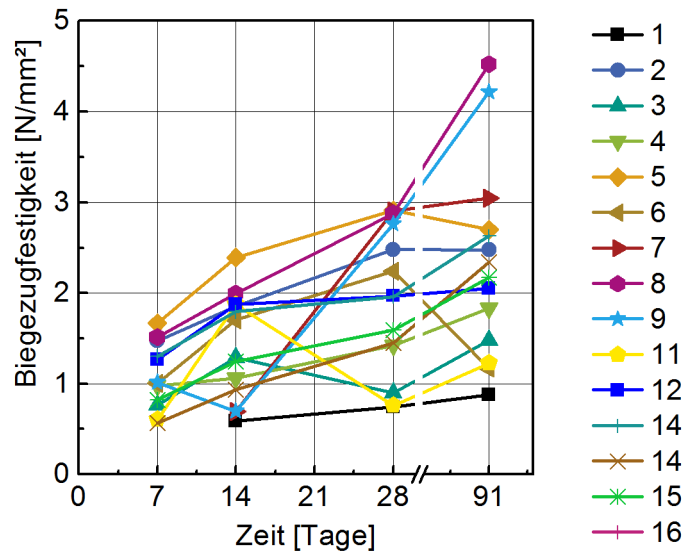


Abbildung 3-14: Verlauf der Biegezugfestigkeit über einen Zeitraum von 91 Tagen für alle untersuchten Hinterfüllmaterialien

3.1.5.1.6. Röntgendiffraktometrie

Die Mineralphasen der Hinterfüllmaterialien wurden mittels röntgenografischer Phasenanalyse (XRD) analysiert, hierbei ist eine semiquantitative Bestimmung möglich. Die auftretenden Mineralphasen wurden innerhalb des jeweiligen Mineralbestands eines Hinterfüllmaterials entsprechend ihres Mengenanteils innerhalb dieses Materials gewichtet (Tabelle 3-5). Bei grafithaltigen Hinterfüllmaterialien wurden durch das Graphitspektrum weitere möglicherweise vorhandene Signale weiterer Mineralphasen überlagert. Aufgrund der Produktspezifikation (Klasse der thermisch verbesserten Materialien) bekannte Bestandteile wie Quarz- bzw. Grafitzuschlag bestätigten sich bei der röntgenographischen Phasenanalyse im Diffraktogramm. Bei Material Nr. 3 wurde Graphit als Hauptbestandteil detektiert, obwohl es nicht als thermisch verbessert ausgewiesen ist. In verschiedenen Hinterfüllmaterialien konnten weiterhin Calcit, Anhydrit, Calciumsilikat, Calciumaluminat, Natrolit, Orthoklas, Kaolinit und Dolomit detektiert werden.

Tabelle 3-5: Röntgenographischer Phasenbestand der Hinterfüllmaterialien. Die Gewichtung einzelner Mineralphasen ist nur innerhalb des jeweiligen Mineralbestands eines Hinterfüllmaterials gültig.

+++ = Hauptbestandteil, ++ = Nebenbestandteil, += untergeordnet vorhanden.

Hinterfüllmaterial	Mineralphase mit Gewichtung										
	Quarz	Calcit	Anhydrit	Calciumsilikat	Calciumaluminat	Graphit	Natrolit	Orthoclas	Kaolinit	Dolomit	Portlandit
1	++	+++	+	++							
2	+	++	+++	++							
3						+++					
4	++	++	+	++							
5				+++			++	+++			
6	+++	++	+	++					+		
7	+++	++		+							
8	+++			++						++	
9	+++		+	++				++			
11	+++			++	+						
12	+++		+	++							
13						+++					
14				+		+++				+++	
15				+		+++	+				

3.1.5.1.7. Isothermische Kalorimetrie des Abbindevorgangs

Ein Vergleich der beiden Einwaagen (2 und 3 g) der vier im Detail untersuchten Hinterfüllmaterialien (Abbildung 3-15) zeigt, dass die gemessene massebezogene Reaktionswärme bei der Probeinwaage von 3 g teilweise etwas niedrigere Werte ergibt. Möglicherweise wurde hier aufgrund der Zusammensetzung der Hinterfüllbaustoffe Wasser an andere Bestandteile gebunden (z. B. Bentonit), so dass die Abbindereaktion des Zementanteils nicht quantitativ ablaufen konnte, obwohl der theoretisch notwendige W/F-Wert nicht unterschritten wurde.

Auffällig ist Material 7, welches über den gesamten Versuchszeitraum keinen signifikanten Anstieg der normierten Wärme aufweist und auch nach sieben Tagen nur einen Wert von kleiner 10 J/g_{Hinterfüllmaterial} erreicht. Dieses träge Verhalten von Material 7 hat sich auch bei anderen Methoden gezeigt (Absetzmaß, 7-Tage-Festigkeit).

Der Verlauf der Wärmeentwicklung der Materialien 1, 8 und 13 ist unterschiedlich, insbesondere die Steigung innerhalb der ersten drei Tage. Die insgesamt bestimmte normierte Wärmemenge der einzelnen Hinterfüllmaterialien erreicht nach sieben Tagen maximal einen Wert von ungefähr 75 J/g_{Hinterfüllmaterial} (Material 8). Die Verläufe der massebezogenen Reaktionswärme deuten darauf hin, dass die Reaktionsprozesse nach sieben Tagen noch nicht vollständig abgeschlossen sind.

Der Vergleich mit typischen Verläufen der Reaktionswärmemengen eines CEM I und eines CEM III (Abbildung 3-16) zeigen keine unmittelbaren Parallelitäten zu den untersuchten Hinterfüllmaterialien. Die nach sieben Tagen erzielte gesamte massebezogene Reaktionswärme liegt für den

hier dargestellten typischen CEM I bei ungefähr $300 \text{ J/g}_{\text{Zement}}$ bzw. für den hier dargestellten typischen CEM III bei ungefähr $200 \text{ J/g}_{\text{Zement}}$. Diese Werte liegen höher als die der Hinterfüllmaterialien, die nur zu einem bestimmten Anteil aus Zement bestehen.

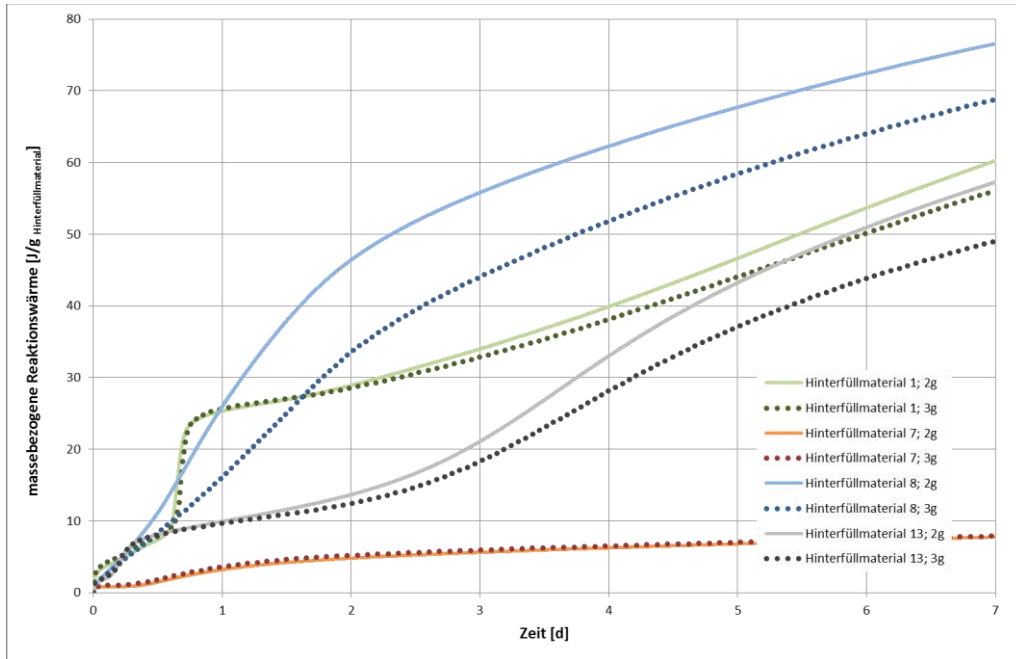


Abbildung 3-15: Massebezogene Reaktionswärme der Hinterfüllmaterialien bei 2 g und 3 g Probeneinwaage

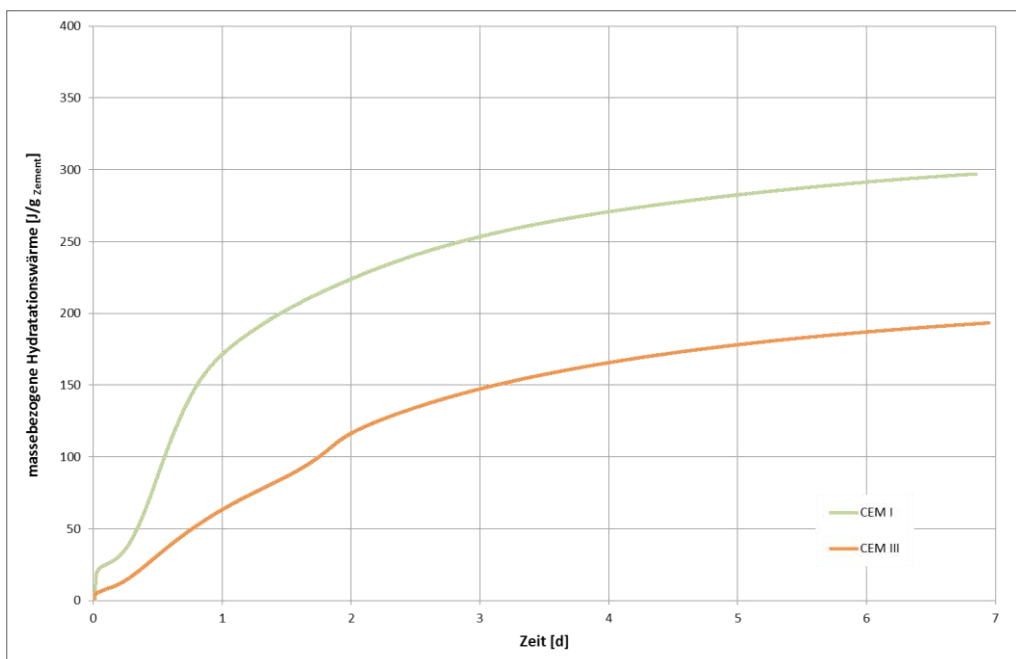


Abbildung 3-16: Massebezogene Reaktionswärme zweier typischer Zemente (CEM I und CEM III)

3.1.5.2. Robustheit der Hinterfüllmaterialien

3.1.5.2.1. Robustheit gegenüber erhöhten Wassergehalten

Durch die Erhöhung des Wassergehalts der Suspension verändern sich vor allem deren physikalische Eigenschaften. Prinzipiell kann mit einer Verringerung der Viskosität sowie einem verzögerten Aushärteverhalten gerechnet werden.

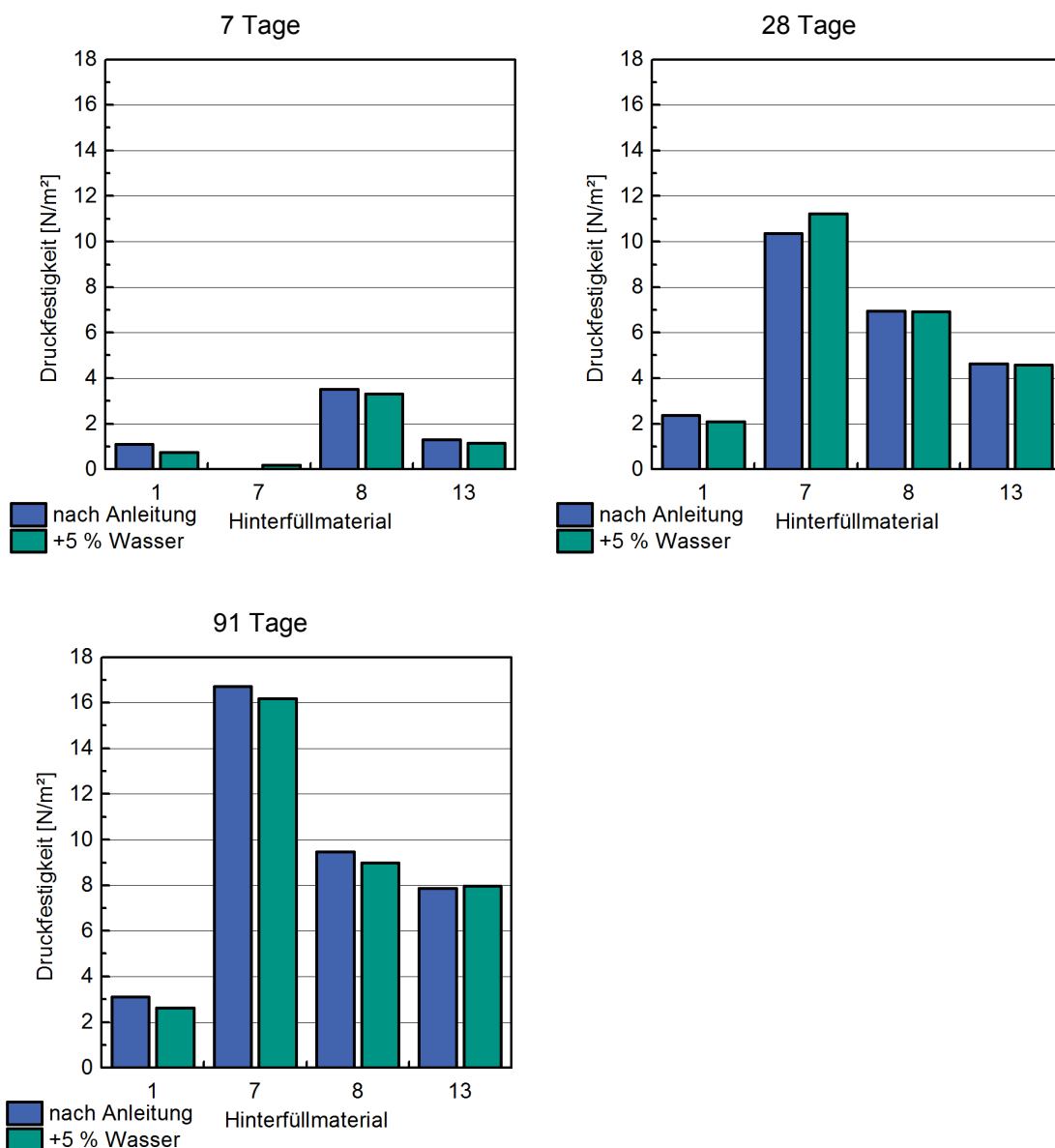


Abbildung 3-17: Vergleich der Druckfestigkeiten mit Wassergehalt nach Herstellerangaben (blau) und mit 5 % Wasserüberschuss (grün) nach 7 Tagen (links oben), 28 Tagen (rechts oben) und 91 Tagen (links unten).

Im Vergleich der Druckfestigkeiten mit Herstellerwassergehalt und mit dem um 5 % erhöhten Wassergehalt (Abbildung 3-17) ist eine Festigkeitsverminderung bei Material 1 und 8 über den gesamten Zeitraum erkennbar, während Material 13 kaum durch den erhöhten Wassergehalt beeinflusst wird. Die Ergebnisse von Material 7 zeigen erst nach 91 Tagen eine Festigkeitsabnahme während nach 28 Tagen die Mischung mit erhöhtem W/F-Wert noch eine höhere Festigkeit zeigt.

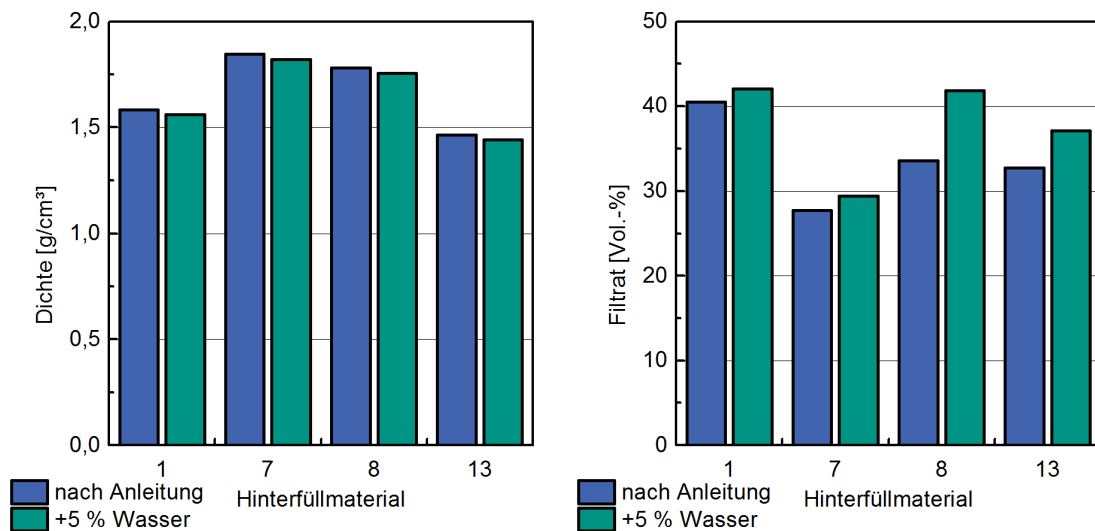


Abbildung 3-18: Vergleich der Suspensionsdichte (links) und Filtratwassermenge (rechts) bei Wassergehalt nach Herstellerangabe (blau) und mit 5 % Wasserüberschuss (grün) zum Zeitpunkt $t = 0$ Stunden.

Der erhöhte Wassergehalt führt bei allen vier Materialien im Vergleich mit der Ausgangsmischung als offensichtlich direkte Folge zu geringeren Dichten (Abbildung 3-18, links). Die erhöhten Wassergehalte konnten im Anschluss erwartungsgemäß auch bei allen vier Materialien bei der Bestimmung der Filtratwassermengen nachgewiesen werden (Abbildung 3-18, rechts).

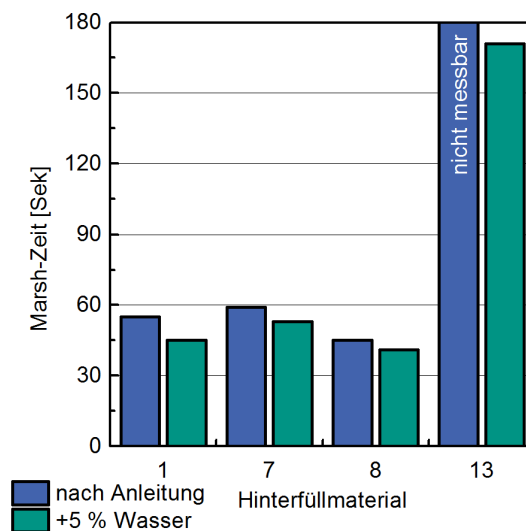


Abbildung 3-19: Vergleich der Marsh-Zeit bei Wassergehalt nach Herstellerangabe (blau) und mit 5 % Wasserüberschuss (grün) zum Zeitpunkt $t = 0$ Stunden. Werte > 180 waren nicht messbar.

Einen einheitlichen Trend zeigen auch die veränderten Marsh-Zeiten in Abhängigkeit vom W/F-Wert (Abbildung 3-19). Die Messwerte mit erhöhtem Wassergehalt weisen für alle Fokusmaterialien eine verringerte Auslaufzeit auf. Analog änderten sich auch die bestimmten Fließgrenzen. Insbesondere bei der Messung mittels Rheometer (Abbildung 3-20, rechts) zeigen drei Suspensionen (1, 7 und 13) eine erniedrigte Fließgrenze bei erhöhtem Wassergehalt. Die Ergebnisse der Kugelharfe (Abbildung 3-20, links) zeigen dies ebenfalls für die Materialien 1 und 13. Dahingegen zeigen die Materialien 7 und 8 keine deutlichen Unterschiede. Die geringen Unterschiede zwischen der Ausgangsmischung und der Mischung mit erhöhtem Wassergehalt bei diesen Materialien sind methodenbedingt.

Der Methodenvergleich zur Bestimmung der Fließgrenzen von Kugelharfe und Rheometer zeigt auf, dass die Messwerte zwar gleiche Tendenzen aufweisen, die quantitativen Änderungen der Ergebnisse aber nicht vergleichbar sind.

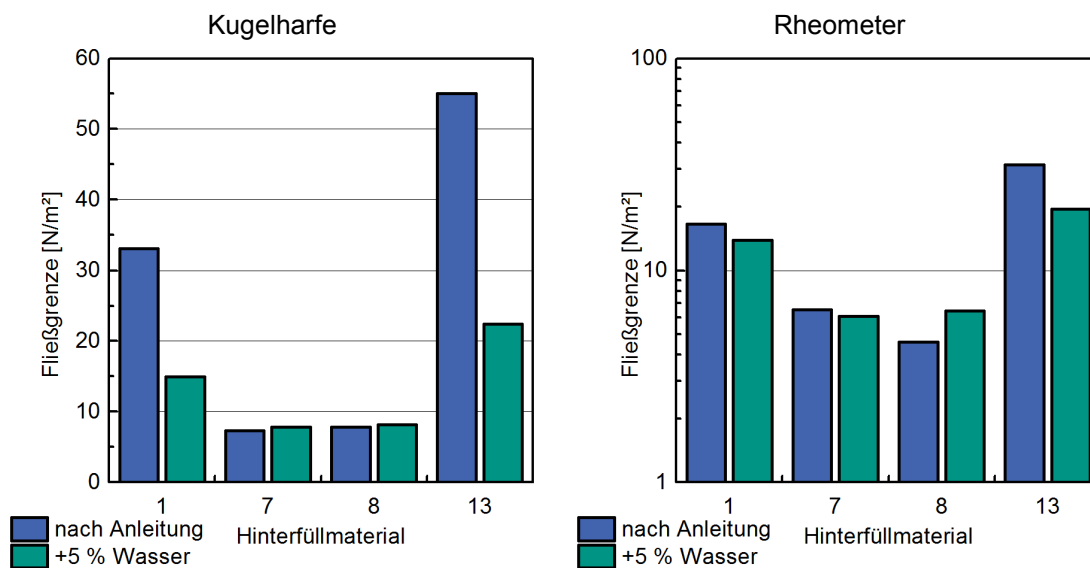


Abbildung 3-20: Vergleich der Fließgrenzen von Kugelharfe (links) und Rheometer (rechts) bei Wassergehalt nach Herstellerangabe (blau) und mit 5 % Wasserüberschuss (grün) zum Zeitpunkt $t = 0$ Stunden.

Die Ergebnisse des Wasserabsetzmaßes nach 2 Stunden (Abbildung 3-21) zeigen erhöhte Absetzmengen für Material 7, 8 und 13 bei erhöhtem Wassergehalt. Material 1 zeigt hier keine Auswirkungen. Die weitere Messung nach 24 Stunden Standzeit ergibt lediglich noch Änderungen bei Material 7. Die anderen Materialien haben bei beiden W/F-Werten bereits nach 2 Stunden einen stabilen Zustand erreicht.

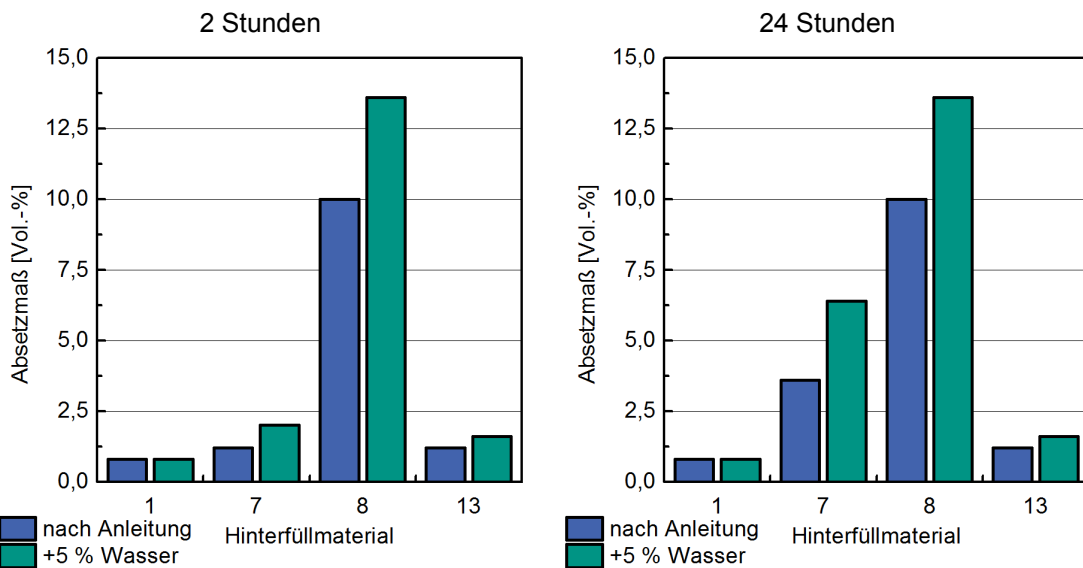


Abbildung 3-21: Vergleich des Absetzmaßes bei Wassergehalt nach Herstellerangabe (blau) und mit 5 % Wasserüberschuss (grün) zum Zeitpunkt t = 2 Stunden (links) und t = 24 Stunden (rechts).

Die Messungen mittels Rheometer zeigen bei erhöhtem Wassergehalt eine erniedrigte plastische Viskosität (Abbildung 3-22) für Material 1, 7 und 13. Material 8 zeigt eine Erhöhung der plastischen Viskosität bei gegenüber der Herstellerangabe erhöhtem Wassergehalt.

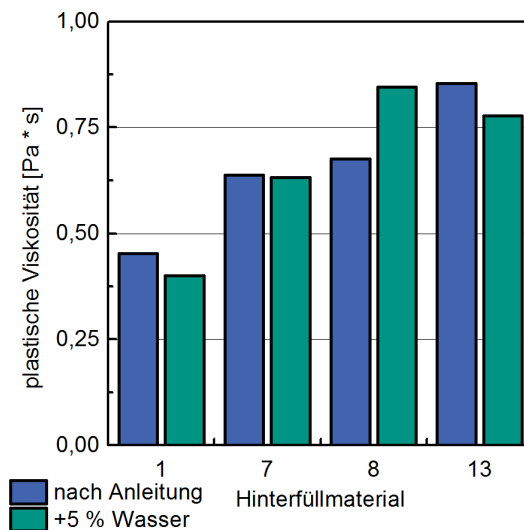


Abbildung 3-22: Vergleich der plastischen Viskosität (Rheometer) bei Wassergehalt nach Herstellerangabe (blau) und mit 5 % Wasserüberschuss (grün) zum Zeitpunkt t = 0 Stunden.

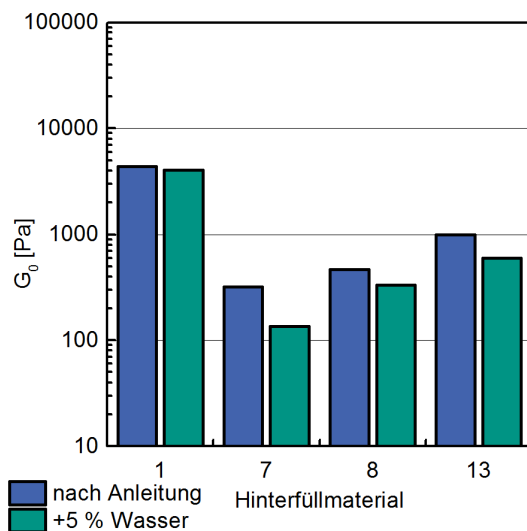


Abbildung 3-23: Vergleich von G_0 (Rheometer) bei Wassergehalt nach Herstellerangabe (blau) und mit 5 % Wasserüberschuss (grün) zum Zeitpunkt $t = 0$ Stunden.

Der mittels Rheometer bestimmte Schubmodul G_0 ist bei allen Suspensionen mit 5 Prozent gegenüber der Herstellerangabe erhöhtem Wassergehalt erniedrigt (Abbildung 3-23).

3.1.5.2.2. Robustheit gegenüber erniedrigter Temperatur

Die Absenkung der Lagerungs- und Untersuchungstemperatur auf 10 °C sollte sich vor allem auf die Aushärtungs- und Stabilisationsprozesse auswirken. Durch die Verringerung der Umgebungstemperatur würden folglich auch chemische Prozesse verlangsamt ablaufen, was verglichen zu den bisherigen Messungen bei Raumtemperatur zu Verzögerungen beim Abbinden des Zements führen könnte.

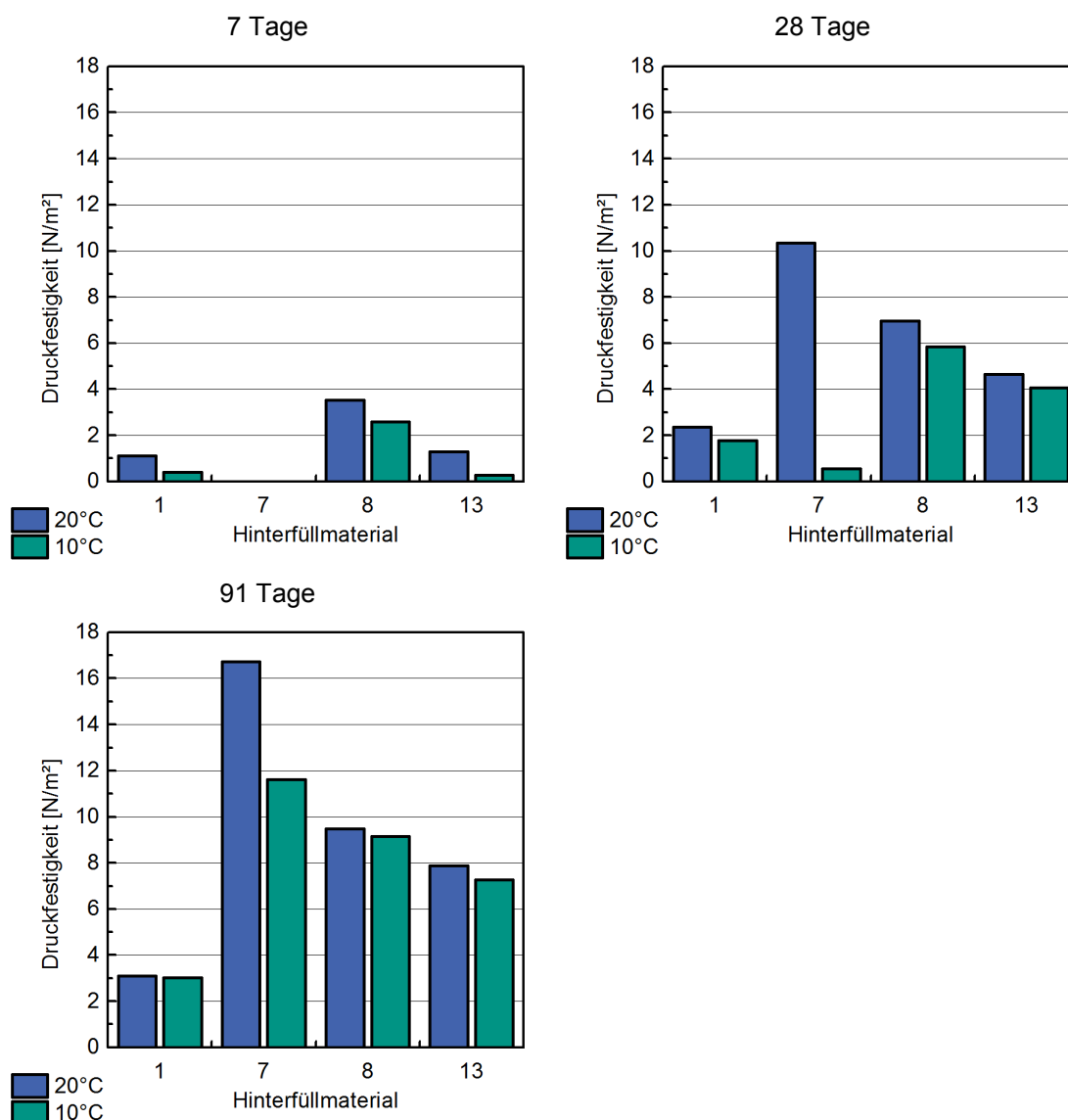


Abbildung 3-24: Vergleich der Druckfestigkeiten bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) nach 7 Tagen (links oben), 28 Tagen (rechts oben) und 91 Tagen (links unten).

Eine Betrachtung der Druckfestigkeiten (Abbildung 3-24) zeigt für sämtliche Messungen ansteigende Werte mit zunehmendem Alter der Proben. Andererseits wird durch die Temperaturerniedrigung um 10 °K eine verringerte Druckfestigkeit verglichen zur Herstellung und Lagerung bei Normbedingungen (20 °C) gemessen. Besonders deutlich wird dies für Hinterfüllmaterial 7 nach 28 Tagen. Die 91-Tage Festigkeiten zeigen, dass die Prismen bei erniedrigter Temperatur entweder eine niedrigere Endfestigkeit erreichen oder diese durch Verzögerungen des Aushärtungsprozesses nach 91 Tagen noch nicht erreicht ist.

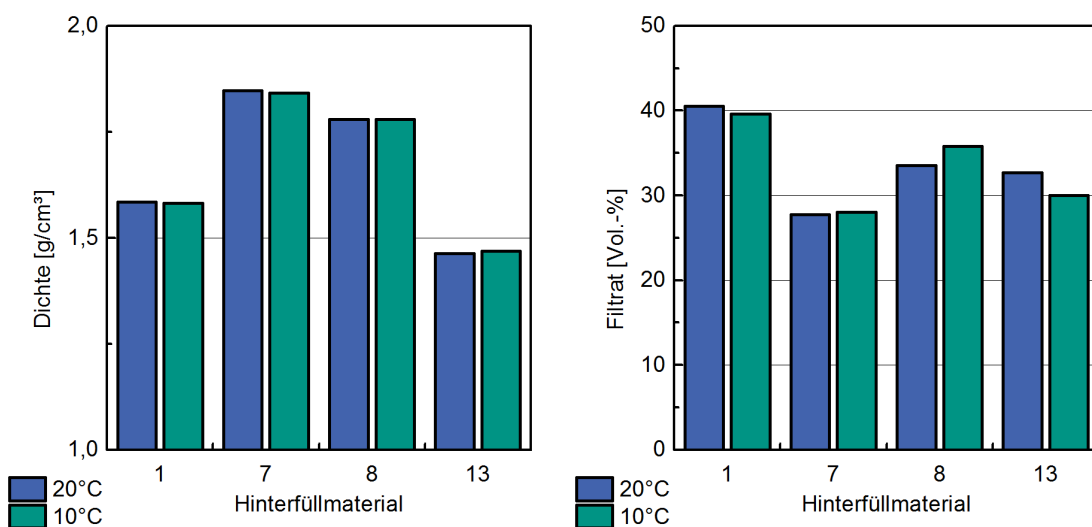


Abbildung 3-25: Vergleich der Dichte (links) und der Filtratmenge (rechts) bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) zum Zeitpunkt t = 0 Stunden.

Die Dichte (Abbildung 3-25, links) zeigt keine nennenswerten Unterschiede zwischen den beiden Versuchstemperaturen. Gleiches lässt sich für die Filtratmengen feststellen (Abbildung 3-25, rechts), welche lediglich im Bereich der Methodenunsicherheit schwanken. Die erniedrigte Temperatur hat offensichtlich keine Auswirkungen auf die Suspensionsdichte und die Filtratwasserabgabe.

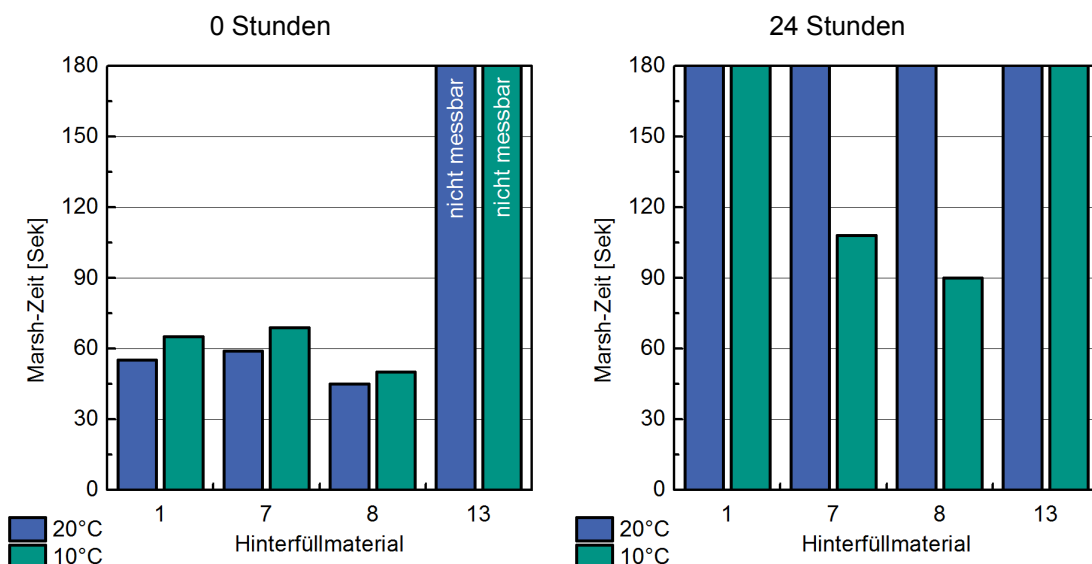


Abbildung 3-26: Vergleich der Marsh-Zeit bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) zum Zeitpunkt t = 0 Stunden (links) und t = 24 Stunden (rechts). Werte > 180 waren nicht messbar.

Die Bestimmung der Marsh-Zeiten zeigt für Material 1, 7 und 8 je leicht längere Auslaufzeiten bei 10 °K niedrigerer Temperatur (Abbildung 3-26, links) zum Zeitpunkt des Untersuchungsbeginns

($t=0$ h). Nach 24 Stunden (Abbildung 3-26, rechts) kann für Material 7 und 8 bei niedriger Temperatur jeweils noch ein Messwert im Messintervall erhalten werden, während dies bei Raumtemperatur nicht mehr möglich war. Die Materialien hatten also eine kürzere Auslaufzeit. Dies beruht offenbar auf der Verzögerung der Verfestigungsprozesse.

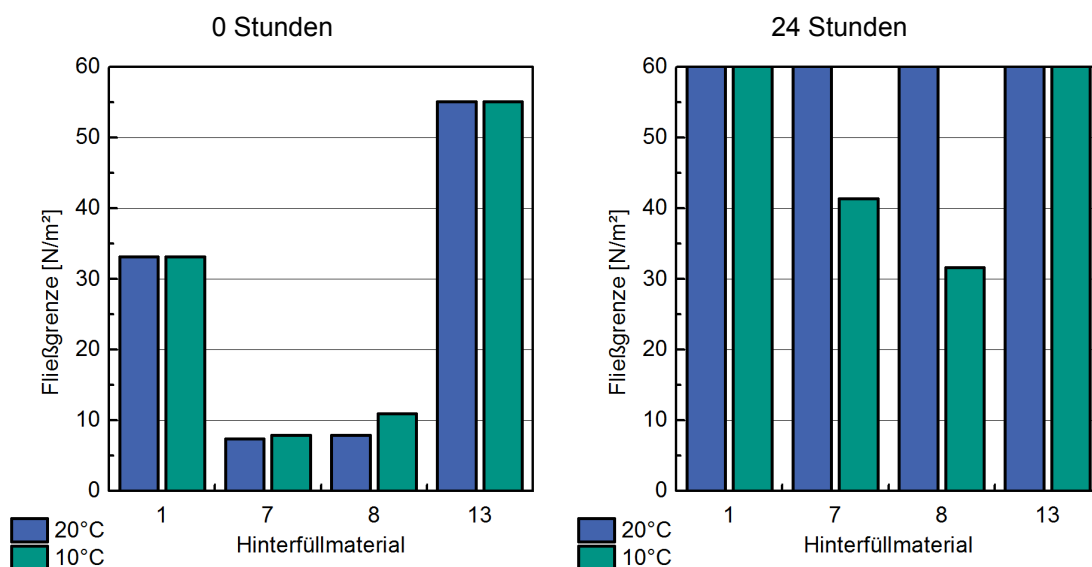


Abbildung 3-27: Vergleich der Fließgrenze (Kugelharfe) bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) zum Zeitpunkt $t = 0$ Stunden (links) und $t = 24$ Stunden (rechts). Werte > 60 waren nicht messbar.

Die Ergebnisse der Fließgrenzenbestimmung (Abbildung 3-27) mit der Kugelharfe zeigen vergleichbare Tendenzen wie die Ergebnisse des Marsh-Trichters. Während es zur Anfangsbestimmung keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Untersuchungen bei 10 °C und bei 20 °C gibt, bleiben erneut die Materialien 7 und 8 auch nach 24 Stunden noch prüfbar und zeigen bei 10 °C deutlich geringere Messwerte für die Fließgrenze (Abbildung 3-27, rechts).

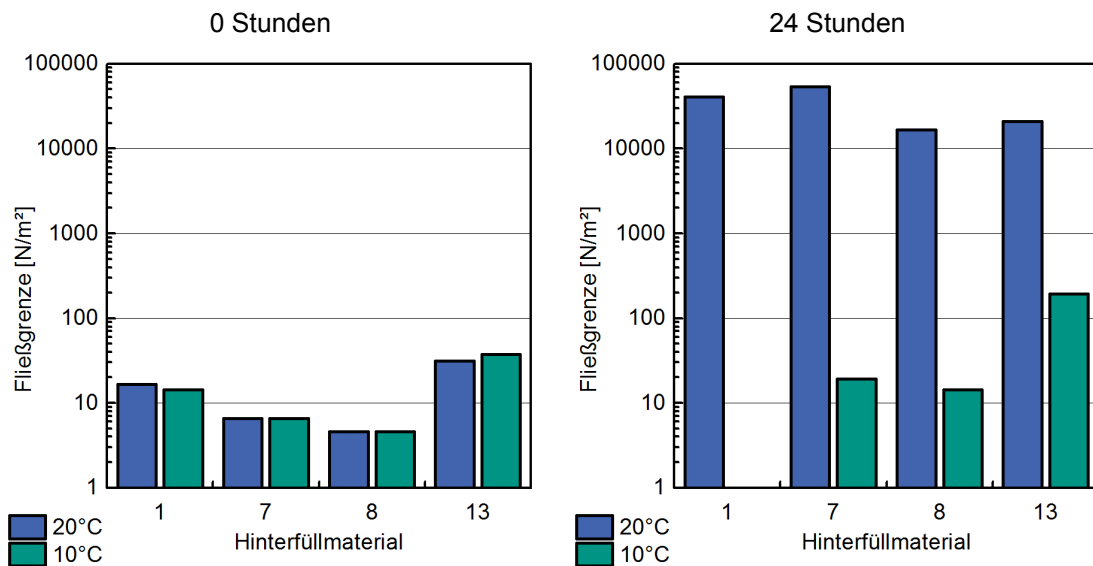


Abbildung 3-28: Vergleich der Fließgrenze (Rheometer) bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) zum Zeitpunkt t = 0 Stunden (links) und t = 24 Stunden (rechts)

Das gleiche Verhalten zeigen auch die Ergebnisse, die mit dem Rheometer gewonnen wurden (Abbildung 3-28). Ein deutlich größerer Messbereich ermöglicht bei dieser Methode zudem die Darstellung der Fließgrenze für alle Materialien (Abbildung 3-28, rechts). Für Material 7, 8 und 13 kann hier nach 24 Stunden eine deutlich erniedrigte Fließgrenze bei der niedrigen Temperatur festgestellt werden. Wiederum zeigt sich, dass zwar die Grundtendenzen der Messwerte von Kugelharze und Rheometer übereinstimmen, aber die absoluten Messwerte z.T. deutlich voneinander abweichen.

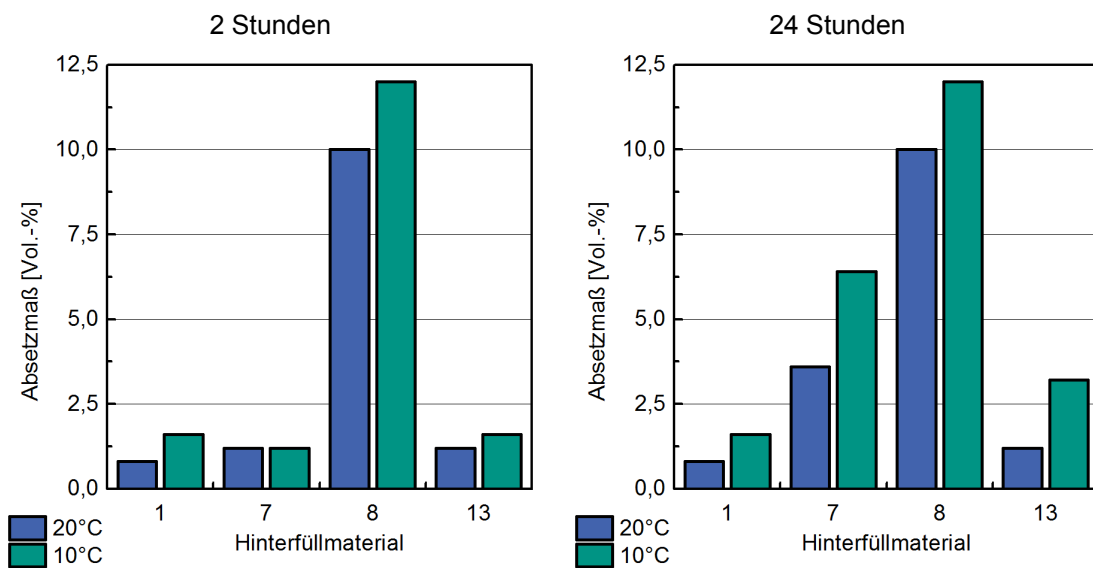


Abbildung 3-29: Vergleich des Absetzmaßes bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) zum Zeitpunkt t = 2 Stunden (links) und t = 24 Stunden (rechts).

Die Ergebnisse des Absetzmaßes (Abbildung 3-29) zeigen fast durchgehend erhöhte Werte bei niedrigerer Temperatur für Material 1, 8 und 13 sowohl nach 2 als auch nach 24 Stunden. Lediglich bei Material 7 sind die Ergebnisse nach 2 Stunden bei 20 °C und 10 °C identisch. Nach 24 Stunden (Abbildung 3-29, rechts) ist jedoch auch hier der Wert bei 10 °C gegenüber dem bei 20 °C erhöht. Auch im Kälteszenario ist der Absetzprozess bei den zwei Suspensionen 1 und 8 größtenteils bereits nach 2 Stunden abgeschlossen. Material 13 zeigt lediglich im kalten Zustand nach 24 Stunden einen geringfügig höheren Wert. Bei Material 7 erhöhen sich die Messwerte zwischen 2 und 24 Stunden bei beiden Versuchstemperaturen.

Die plastische Viskosität zeigt zu Versuchsbeginn kaum signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungen bei 10 °C und 20 °C (Abbildung 3-30, links). Bei 10 °C zeigt Material 1 hier minimal höhere Werte, Material 7, 8 und 13 sind gegenüber der Messung bei 20 °C leicht erniedrigt. Bei 10 °C ist jedoch nach 24 Stunden (Abbildung 3-30, rechts) die plastische Viskosität deutlich niedriger als bei 20 °C, was ebenfalls auf einen vermutlich verzögerten Aushärtprozess hindeutet.

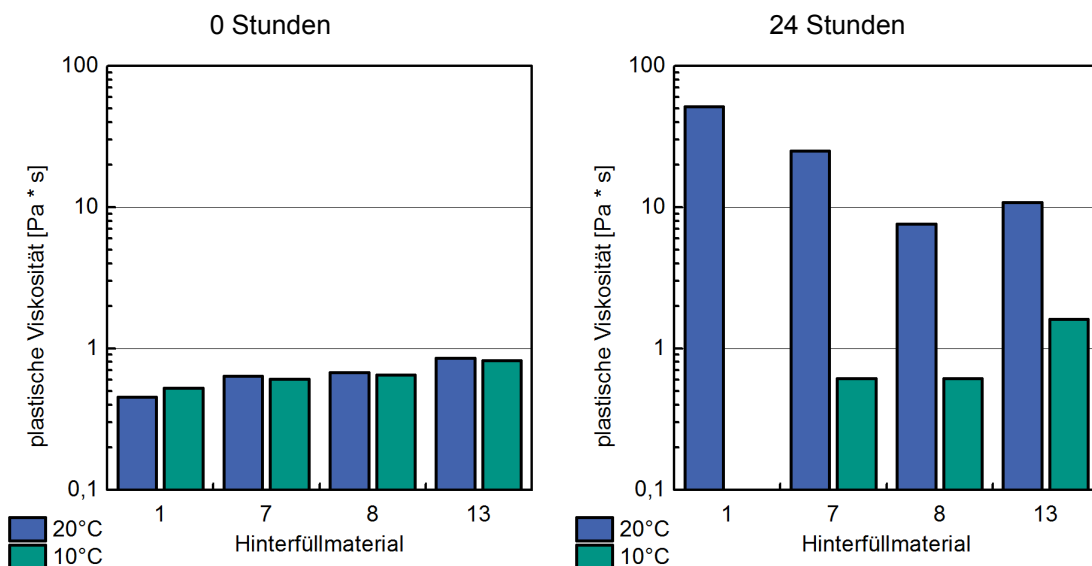


Abbildung 3-30: Vergleich der plastischen Viskosität (Rheometer) bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) zum Zeitpunkt $t = 0$ Stunden (links) und $t = 24$ Stunden (rechts). Fehlende Messwerte konnten nicht ausgewertet werden.

Die Rheometermessung des Schubmoduls (Abbildung 3-31) zeigt zu Versuchsbeginn für Material 7, 8 und 13 leicht höhere Werte bei 10 °C verglichen mit 20 °C. Der Schubmodul von Material 1 ist gegenüber der Messung bei 20 °C leicht erniedrigt. Nach 24 Stunden zeigen die Messungen für alle Proben genau gegensätzliche Ergebnisse. Jetzt ist der Schubmodul von Material 1 bei 10 °C höher als bei 20 °C, während die Schubmodule von Material 7, 8 und 13 deutlich geringer sind.

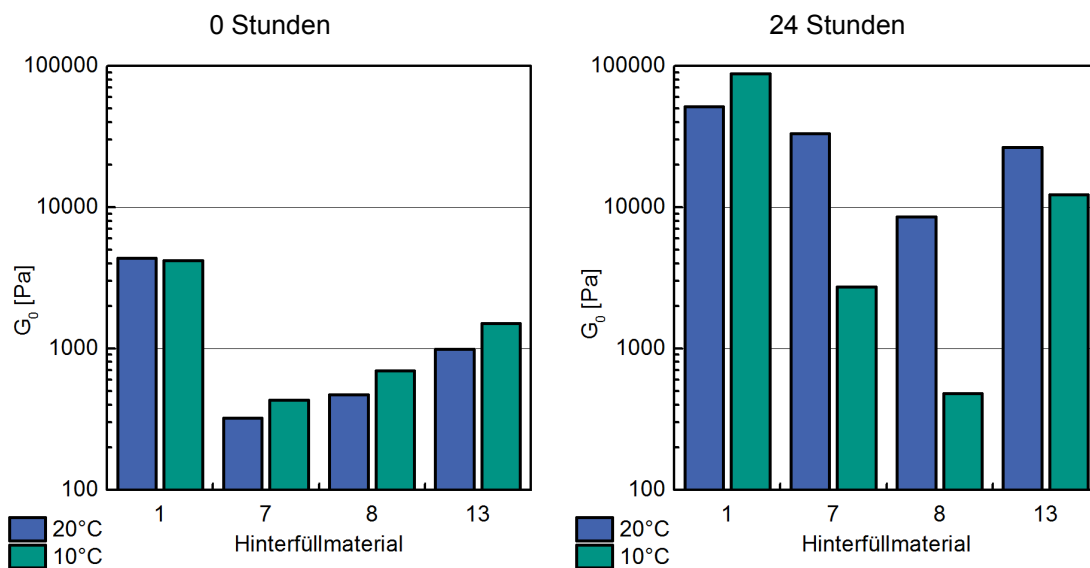


Abbildung 3-31: Vergleich von G_0 (Rheometer) bei 20 °C (blau) und bei 10 °C (grün) zum Zeitpunkt $t = 0$ Stunden)

3.1.5.2.3. Betrachtung möglicher Alterungseffekte

Ein Vergleich der neu erhobenen Basiswerte im Rahmen der Szenarienuntersuchung (3.1.5.2.1 und 3.1.5.2.2.) mit den ursprünglichen Untersuchungsergebnissen des Normal Szenarios (Kap. 3.1.5.1) zeigte bei einigen Materialien deutliche Abweichungen. Aufgrund der großen Zeitspanne (mehrere Monate) zwischen der Durchführung des Normal Szenarios und der Robustheitsszenarien, kann darum ein Einfluss der Materialalterung auf die Reproduzierbarkeit der Basisergebnisse nicht ausgeschlossen werden. Durch die Erhebung der neuen Basiswerte für die Robustheitsszenarien bleiben diese Ergebnisse dennoch in sich stimmig und in ihrer Aussage gültig.

3.1.6. Diskussion

3.1.6.1. Festlegung von Eigenschaftsgruppen und deren Bedeutung für die sichere Verfüllung von EWS-Bohrungen

Im Hinblick auf die Verfüllung von Erdwärmebohrungen erscheint es zweckmäßig, die einzelnen Eigenschaften in Eigenschaftsgruppen einzuordnen. Im Untersuchungsrahmen des Teilprojekts der MPA Karlsruhe konnten die folgenden materialcharakterisierenden Eigenschaftsgruppen identifiziert werden.

Dichte:

Die Suspensionsdichte spielt insbesondere während des Hinterfüllvorgangs eine elementare Rolle. Um eine sichere Verdrängung des entstehenden Bohrschlammes bzw. der verwendeten Stützflüssigkeit zu gewährleisten, muss die Suspensionsdichte größer als die Dichte der vorgenannten Medien sein. Die richtige Einstellung der Suspensionsdichte ist hier gerade bei Stockwerksübergreifender Wasserbewegung von entscheidender Bedeutung. Des Weiteren ist die Dichte ein wichtiges Prüfkriterium für die richtige Verarbeitung des Hinterfüllmaterials.

Rheologische Eigenschaften:

Hinterfüllmaterialien müssen gut pumpbar sein und eine gute Fließfähigkeit besitzen, um im Bohrloch mit eingebauter Erdwärmesonde sämtliche Hohlräume auszufüllen und eine gute Anbindung an die umgebende Formation zu gewährleisten. Maßgebend zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften ist die dynamische Viskosität, die über das Bingham Modell vereinfacht durch die Fließgrenze und die plastische Viskosität ausgedrückt werden kann.

Homogenität und Sedimentationsstabilität:

Hinterfüllmaterialien sollten über den gesamten Hinterfüllvorgang (Mischen, Pumpen, Aushärten) ihre Homogenität bewahren und eine möglichst geringe Entmischungsneigung aufweisen. Nur so können die gewünschten Materialeigenschaften über den gesamten Verfüllraum gewährleistet werden. Durch Entmischungsvorgänge entstehende Hohlräume können die Systemdichtigkeit negativ beeinflussen. Als physikalischer Parameter ist insbesondere der Anteil an entziehbarem Wasser in Form von Filtration bzw. Sedimentation relevant.

Mechanische Eigenschaften im erhärteten Zustand:

Die ausgehärteten Hinterfüllmaterialien sollen ausreichende mechanische Stabilität aufweisen um eine Grundwasserdurchströmung durch das verfüllte Bohrloch zu verhindern

und im möglichen Schadensfall ausreichend Schutz vor austretendem Kühlmittel zu gewährleisten. Darüber hinaus muss über die gesamte Betriebsdauer die Bohrlochstabilität und -standsicherheit sichergestellt werden.

3.1.6.2. Bewertung der Prüfverfahren nach Eigenschaftsgruppen

3.1.6.2.1. Dichte

Die beiden Methoden zur Dichtebestimmung waren im Labor ohne Probleme und in kurzer Zeit durchführbar. Die mittels der Dichtewaage ermittelten Werte sind vergleichbar mit den Ergebnissen des Dichtetopfs. Beide Methoden korrelieren gut, lediglich im Dichtebereich zwischen $1,4 \text{ kg/dm}^3$ und $1,5 \text{ kg/dm}^3$ sind leichte Abweichungen von einer Linearität erkennbar. (Abbildung 3-32). Aufgrund der guten Korrelation und der einfachen Handhabbarkeit können beide Methoden gleichbedeutend für eine Baustellenprüfung empfohlen werden.

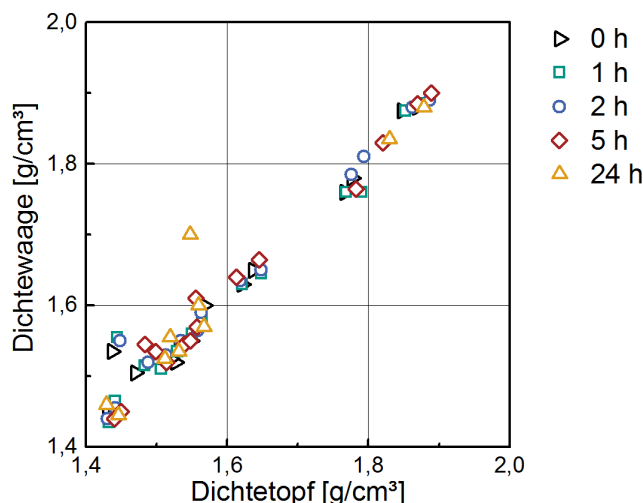


Abbildung 3-32: Ergebnisvergleich von Dichtewaage und Dichtetopf.

3.1.6.2.2. Rheologische Eigenschaften

Die unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften konnten im Labor ohne Probleme durchgeführt werden. Insbesondere der Marsh-Trichter und die Kugelharfe sind in anderen Baubereichen bereits etablierte Methoden zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften von Baustoffen. Wie Abbildung 3-33 (oben) zeigt, konnte keine signifikante Korrelation der Marsh-Zeit mit der im Rheometer-Versuch ermittelten plastischen Viskosität μ festgestellt werden. Der Vergleich der mittels der Kugelharfe und dem Rheometer ermittelten Fließgrenze zeigt hingegen einen schwach ausgeprägten linearen Zusammenhang (Abbildung 3-33, unten). Insgesamt konnten die Ergebnisse der beiden Baustellenmethoden nur teilweise mit den Rheometermessungen in Einklang gebracht werden, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass das Ausflussverhalten im Marsh-Trichter nicht speziell einem einzelnen physikalischen Parameter zugeordnet werden kann, sondern durch eine Kombination aus mehreren

Parametern bestimmt wird. Die Kugelharfe bietet mit einer Unterteilung der Fließgrenze in 10 Stufen ebenfalls nur eine grobe Darstellung dieses Parameters. Hinsichtlich einer groben Beurteilung der rheologischen Suspensionseigenschaften auf der Baustelle sind beide Verfahren dennoch geeignet.

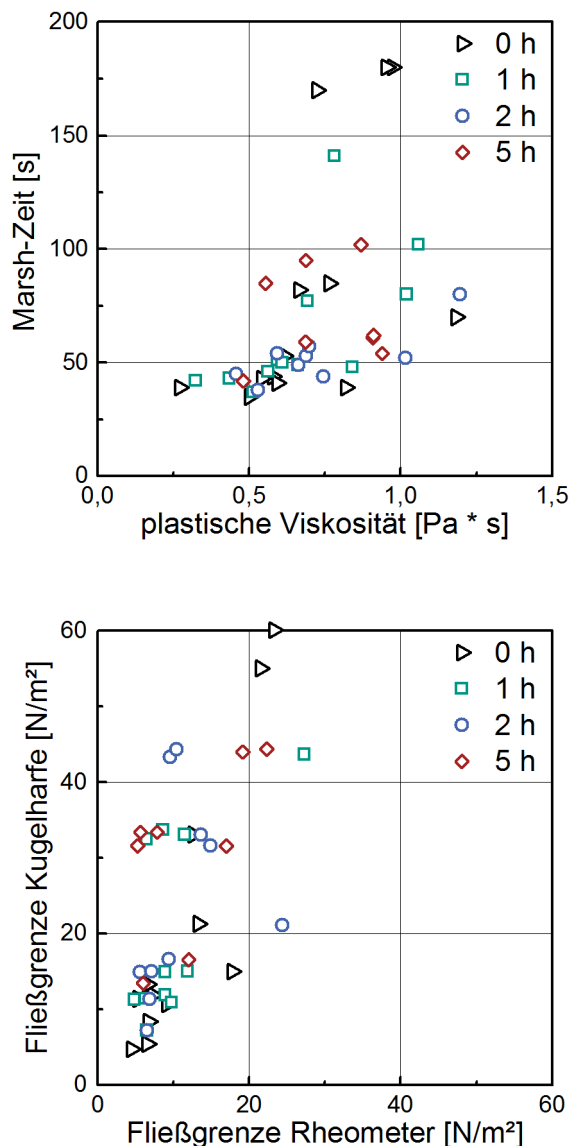


Abbildung 3-33: Vergleich der Marsh-Zeit mit der plastischen Viskosität (oben) und der Fließgrenze am Rheometer mit der Fließgrenze der Kugelharfe (unten)

Ein direkter Vergleich von Kugelharfe und Marsh-Zeit (Abbildung 3-34) zeigt ebenfalls nur eine sehr schwache Korrelation. Die Ergebnisse der beiden Methoden können folglich nicht direkt voneinander abgeleitet werden. Zur physikalisch vollständigen Beschreibung des Materialverhaltens sollte daher beide Prüfmethode durchgeführt werden.

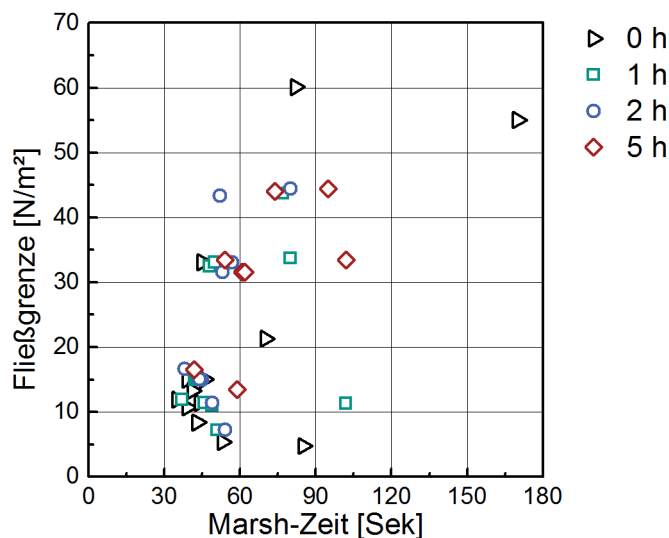


Abbildung 3-34: Vergleich von Fließgrenze und Marsh-Zeit.

3.1.6.2.3. Homogenität und Sedimentationsstabilität

Außerhalb dieses Forschungsprojektes liegen derzeit keine detaillierten Untersuchungen zum Einfluss des Absetzmaßes auf die Abdichtwirkung von Bohrlöchern vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Dichtwirkung mit zunehmendem Absetzmaß stark abnimmt (s.a. Kapitel 6.1). Vor diesem Hintergrund sind die hier ermittelten Ergebnisse in ihrer Größe kritisch zu bewerten. Die Sedimentationsstabilität wurde anhand von drei unterschiedlichen Methoden untersucht. Hier gibt insbesondere das Absetzmaß den in der Praxis beobachteten Prozess einer natürlichen Sedimentation wieder. Der Absetzvorgang kommt zumeist erst nach 2 – 3 Stunden zum Erliegen und bestimmt so die Mindestversuchsdauer. Um diesen Umständen Rechnung zu tragen wurde untersucht, ob das Absetzmaß mit Schnellprüfmethoden wie der Filterpresse oder der Filtration abgebildet werden kann.

Der direkte Vergleich der einzelnen Methoden (Abbildung 3-35, unten) weist für die beiden Filtrationsmethoden untereinander eine gute Korrelation auf. Die Werte des Absetzmaßes können jedoch mit keiner der beiden Filtrationsmethoden in Beziehung gebracht werden (Abbildung 3-35, oben links und rechts).

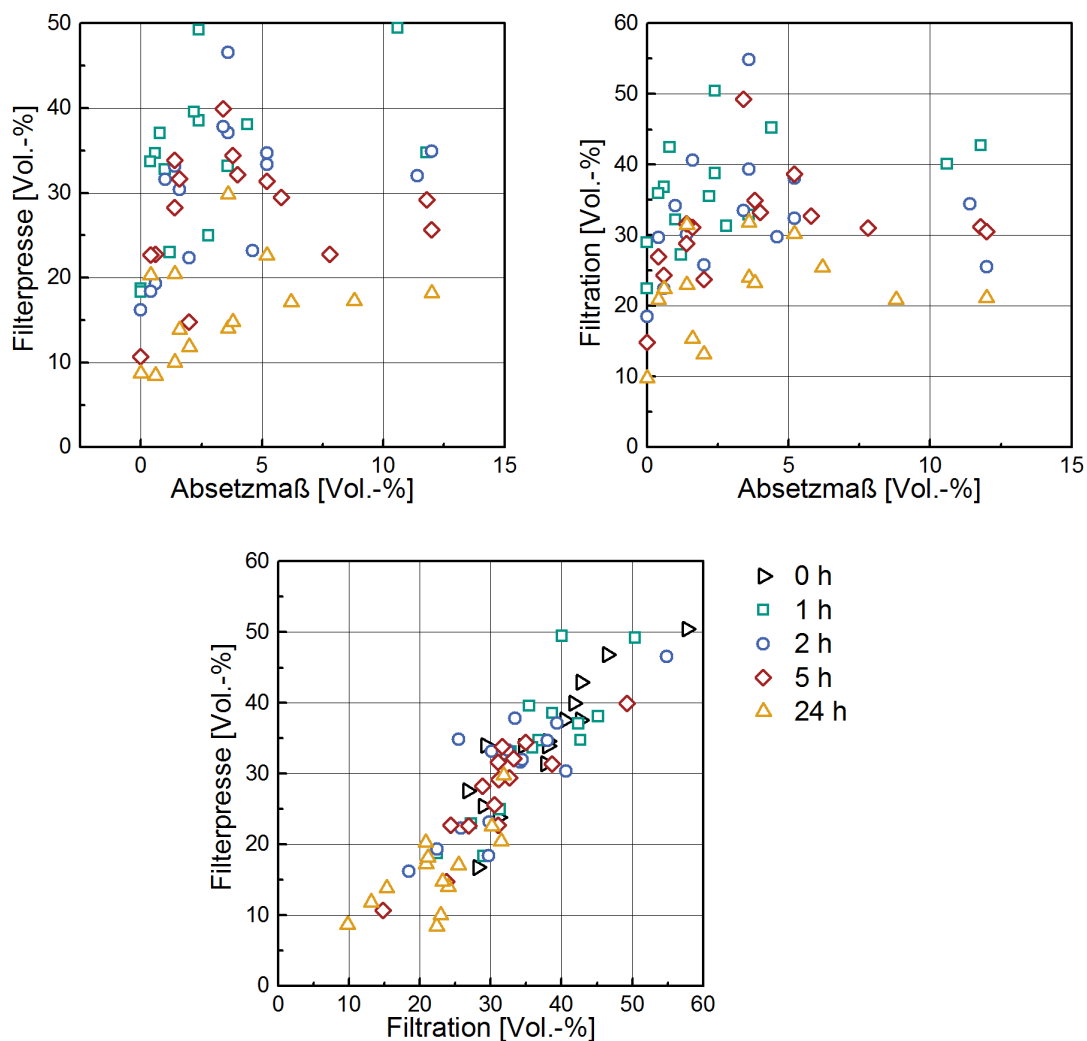


Abbildung 3-35: Vergleich der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Suspensionsstabilität.

Somit bleibt festzustellen, dass die Sedimentationsstabilität als wichtiger Parameter bisher nur in Form des zeitintensiven Absetzmaßes erhoben werden und ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen nicht durch eine Schnellprüfmethode ersetzt werden kann.

3.1.6.2.4. Mechanische Eigenschaften

Die Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Proben erfolgte nach DIN EN 1015-11 zu verschiedenen Prüfaltern. Bezogen auf die Druckfestigkeit weisen die untersuchten Materialien dabei eine vergleichsweise hohe Biegezugfestigkeit auf (Abbildung 3-36).

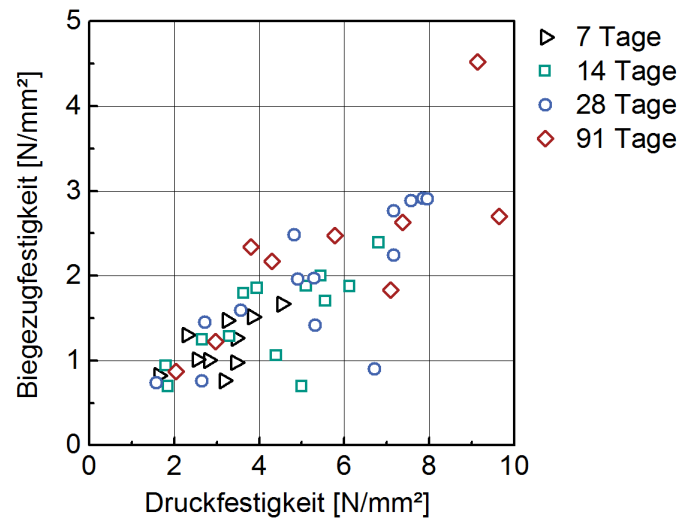


Abbildung 3-36: Vergleich der Biegezug- und Druckfestigkeiten.

3.1.6.2.5. Dauerhaftigkeit

Die Sulfatbeständigkeit wurde durch die Projektpartner AGW (KIT) und Eifer untersucht. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 3.2 dargestellt und diskutiert.

3.1.6.2.6. Zusammenfassende Bewertung

Alle in Kapitel 3.1.4.2 aufgeführten Prüfverfahren sowie vorgeschlagene Änderungen des Prüfablaufs gegenüber vorhandener Normen und eine Bewertung ihrer Praxistauglichkeit sind in Tabelle 3-6 zusammengefasst.

Tabelle 3-6: Übersicht über die untersuchten Prüfverfahren mit Empfehlung für etwaige Modifikationen im Versuchsablauf sowie zusammenfassende Bewertung (+ = geeignet, - = ungeeignet, o = Änderung notwendig)

Prüfverfahren (DIN)	Eigentlicher Anwendungsbereich	Modifikation des Verfahrens im Rahmen von EWS	Bewertung der Methode	Praxistauglichkeit	Vorschlag für weitere Modifikationen
Dichtetopf (DIN 1015-6)	Mörtel für Mauerwerk	keine	+	geeignet auf Baustellen	keine
Druck-Dichtewaage (DIN EN ISO 10414-1)	Feldprüfung von Bohrspülungen	keine	+	geeignet auf Baustellen	keine
Marsh-Trichter (DIN 4127)	Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau	keine	+o	geeignet auf Baustellen	Anpassung der geforderten Auslaufzeiten, größere Auslauföffnung
Kugelharte (DIN 4127)	Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau	Messwertextrapolation bei Dichten außerhalb des Messbereichs	+o	geeignet auf Baustellen	Kugelsatz für höhere Dichten notwendig, normaler Baustellensatz ist bei einigen Materialien nicht anwendbar
Rheometer (Haist 2009)	Frischbeton-eigenschaften	Spezialmessablauf für Hinterfüllmaterialien	+	Labormethode	
Wasserabsetzmaß (LOS EWS)	Hinterfüllmaterialien	Ablese nach 1 h, 2 h, 5 h, 24 h. Eine Messung nach 3 h wurde nicht durchgeführt	-o	Versuchsdauer 2-3 h	Reduktion der Versuchsdauer auf 1 h und entsprechende Anpassung des Grenzwerts
Filterpresse (DIN 4127)	Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau	Suspensionsmenge wurde exakt eingewogen	-o	Eingeschränkt durch mangelnde Übertragbarkeit zum realen Prozess	
Filtration über Büchnertrichter mit Wasserstrahlpumpe (Haist 2009)	Entwässerung von Suspensionen	Die Suspensionsmenge und die Filtrationsdauer wurden an die Durchführung mit der Filterpresse angepasst	o	Erfordert Wasserstrahlpumpe	Entwicklung einer baustellentauglichen Unterdruckmethode
Biegezug- und Druckfestigkeit (DIN 1015-11)	Mörtel für Mauerwerk	Lastgeschwindigkeiten wurden an die auftretenden Festigkeiten angepasst. Länge der Prüfzeiten wurden ignoriert	+	Probenherstellung auf Baustelle sinnvoll	keine

3.1.6.3. Bewertung der Materialeigenschaften auf Basis LQS EWS

Die Qualitätssicherung von EWS-Hinterfüllmaterialien ist in Baden-Württemberg in den Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2012) geregelt. Darin wird die Einhaltung folgender Zielwertkriterien gefordert:

- Minstdichte $> 1,3 \text{ g/cm}^3$.
- Marsh-Zeit Empfehlung zwischen 50 s – 100 s.
- Absetzmaß $< 2 \text{ Vol.-%}$ nach 3 Stunden
- Druckfestigkeit $> 1 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen

Für die hier untersuchten Hinterfüllmaterialien wurden für diese vier Kriterien die Untersuchungsergebnisse in Form einer qualitativen Bewertung in Tabelle 3-7 farblich abgestuft dargestellt. Sämtliche Materialien erfüllen demnach die Vorgabe für die Minstdichte. Gleiches gilt für die Druckfestigkeit mit Ausnahme von Material 16. Zur Bewertung des Absetzmaßes muss angemerkt werden, dass dieses in den vorliegenden Versuchen bereits nach 1 und 2 Stunden erhoben wurde. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit Messungen zu späteren Zeitpunkten zeigt, dass alle Materialien die das Kriterium Absetzmaß nach 1 Stunde erfüllen auch nach 2, 5 Stunden und 24 Stunden unterhalb des Grenzwerts bleiben. Demzufolge könnte das Absetzmaßkriterium bereits bei 1 Stunde, und nicht erst nach 3 Stunden wie in LQS gefordert als Bewertungskriterium herangezogen werden.

Der Vergleich von Marsh-Zeit-Kriterium und Wasserabsetzmaß zeigt, dass viele Materialien nur lediglich eines der Kriterien erfüllen und sich Ergebnisse der beiden Kriterien bei hohen Marsh-Zeiten gegensätzlich verhalten. Die Erwartung bei erhöhtem Wassergehalt wäre beispielsweise geringere Marsh-Zeiten aber gleichzeitig auch ein erhöhtes Absetzmaß. Entsprechend resultieren zu niedrige Marsh-Zeiten ($< 50 \text{ Sek}$) häufig auch wieder in einer Überschreitung der Grenze für das Absetzmaß. Eine Gesamtbetrachtung über alle vier Methoden zeigt, dass lediglich Material 15 alle Kriterien der LQS EWS erfüllt.

Tabelle 3-7: Bewertung der Untersuchungsergebnisse anhand der Vorgaben der LQS EWS für Dichte, Marsh-Zeit, Wasserabsetzmaß und Druckfestigkeit. Grün = Kriterium wird erfüllt, rot = Kriterium wird nicht erfüllt.

Material	Dichte	Marsh-Trichter Auslaufzeit	Wasserabsetzmaß (2h)	Druckfestigkeit nach 28 Tagen
	[g/cm ³]	[s]	[Vol.-%]	[N/mm ²]
LQS EWS	> 1,3	50 - 100	< 2	> 1
1	1,57	45	0,6	1,6
2	1,55	39	5,2	4,8
3	1,44	170	1,0	6,7
4	1,62	180	0,0	5,3
5	1,53	39	1,6	7,9
6	1,43	35	3,6	7,2
7	1,85	53	4,6	8,0
8	1,77	44	11,4	7,6
9	1,78	43	12,0	7,2
11	1,87	82	2,0	2,7
12	1,64	41	3,6	5,3
13	1,47	85	5,2	4,9
14	1,53	46	3,4	2,7
15	1,52	70	1,4	3,6
16	1,44	180	0,4	0,3

3.1.7. Empfehlungen

Zielsetzung des vorliegenden, vom Projektpartner MPA Karlsruhe des KIT durchgeführten Teilprojekts war es, die Eignung unterschiedlicher Prüfmethode für die Qualitätssicherung von EWS-Hinterfüllmaterialien zu überprüfen. Eine wichtige Randbedingung war es hierbei, sowohl alle für den Hinterfüllvorgang maßgeblichen Eigenschaften durch geeignete Prüfmethode zu erfassen sowie Prüfmethode zu untersuchen, die entweder für das Labor oder für die Baustelle oder ggf. für beide Einsatzorte geeignet sind.

Auf Grundlage der in Kapitel 3.1.6.1 festgelegten Eigenschaftsgruppen sowie der Bewertung in Kapitel 3.1.6.2 können nun die einzelnen Prüfmethode hinsichtlich ihrer Eignung zur Prüfung der EWS-Hinterfüllmaterialien bewertet werden. Die einzelnen Methoden werden dabei entsprechend der zu prüfenden physikalischen Eigenschaft aufgeführt.

Für die Festlegung der zuvor beschriebenen Qualitätssicherungsmaßnahmen stehen dem Baustoffhersteller bzw. Baustoffverwender verschiedene Prüfmethode zur Verfügung, die nachstehend jeweils nach den einzelnen Eigenschaftsgruppen bewertet werden.

Dichte:

Die Dichte sollte zwingend als Kontrollparameter zur Überprüfung der Einhaltung des vom Hersteller vorgegebenen W/F-Werts herangezogen werden und gestattet eine gute Differenzierung zwischen ordnungsgemäß und nicht ordnungsgemäß dosierter Hinterfüllmaterialien. Alle untersuchten Methoden, sowohl die Dichtetopfprüfung nach DIN 1015-6 als auch die Dichtewaage gemäß DIN EN ISO 10414-1 sind hier uneingeschränkt zur Prüfung dieses Parameters geeignet und gestatten eine gute Vergleichbarkeit.

Rheologische Eigenschaften:

Die Untersuchung der rheologischen Eigenschaften hat gezeigt, dass das Fließverhalten der Hinterfüllmaterialien durch zwei voneinander unabhängigen Kennwerten, die Fließgrenze und die plastische Viskosität, geprägt wird. Die Marsh-Trichter-Prüfung gemäß DIN 4127 ermöglicht keine physikalisch korrekte Differenzierung zwischen diesen Parametern. Dennoch sollte dieser Versuch als Prüfmethode beibehalten werden, da er sehr anschaulich die Vorgänge während des Hinterfüllvorgangs abbildet. Eine gute Ergänzung stellt nach Auffassung der Berichtersteller die Prüfung mittels Kugelharfe gemäß DIN 4127 dar. Dieser Versuch ist für die Baustelle geeignet und gestattet eine direkte Ermittlung des physikalischen Kennwerts Fließgrenze.

Homogenität und Sedimentationsstabilität:

Die Sedimentationsstabilität und die dauerhafte Homogenität einer Hinterfüllsuspension sollten mittels der Absetzmaßmethode gemäß LQS EWS geprüft werden. Die Versuche haben gezeigt, dass diese zeitintensive Methode bislang nicht durch Schnellprüfverfahren wie Filterpresse oder die Filtration ersetzt werden kann, da die Ergebnisse keine ausreichende Korrelation zwischen den Methoden erbrachten. Eine Vorverlegung des Bewertungszeitpunkts von 3 h auf 1 h scheint aufgrund der Laborergebnisse für die meisten Hinterfüllmaterialien möglich, erfordert jedoch eine vorangehende Langzeitcharakterisierung des Materials durch den Hersteller im Rahmen der Erstprüfung. Weiterhin müssen die Zielwerte für das Absetzverhalten angepasst werden.

Mechanische Stabilität:

Die mechanische Stabilität eines Hinterfüllmaterials ist durch die Druckfestigkeit nach 28 Tagen gemäß DIN 1015-11 ausreichend abgebildet.

3.2. Evaluierung der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden und Bewertung relevanter Hinterfüllbaustoffe (KIT-AGW, EIFER)

3.2.1. Untersuchungsziel

Für Hinterfüllmaterialien von Erdwärmesonden, die über keinen ausreichenden Widerstand gegenüber Sulfationen verfügen, bedeuten sulfathaltige und saure Wässer und Böden einen Angriff auf deren Dauerhaftigkeit, der eine Schädigung der Hinterfüllung zur Folge haben kann. Dadurch kann es von Betriebsstörungen der Erdwärmesondenanlage über Veränderung der Grundwasserbedingungen und Grundwasserverunreinigungen bis hin zu massiven Bauschäden an umgebenden Gebäuden kommen. Die DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 schreibt für mäßig (XA2) und

stark (XA3) angreifende Bedingungen sowohl die Verwendung von Zementen mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zementen) als auch die Herstellung von physikalisch dichtem Beton (Hinterfüllung) vor.

Ziel der Laboruntersuchungen im Rahmen des EWS-tech-Projekts war die Ermittlung und Evaluierung der Stabilität ausgewählter Hinterfüllbaustoffe, um künftig einen ökonomischen, ökologischen und nachhaltigen Betrieb von Erdwärmesondenanlagen auch unter ungünstigen Umgebungen gewährleisten zu können. Frühere Beobachtungen und Untersuchungen zeigten, dass aggressive Wässer die Zementphasen in zementgebundenen Baustoffen durch Festigkeitsverlust, Rissbildung und Treiberscheinungen stark schädigen können (Müllauer 2013, Lipus & Puntke 2004, Santhanam et al. 2002, 2003, AiF 2013, Locher & Rechenberg 1975, Franke 1996, Breit 2003).

Die einzelnen Versuche wurden durch ein detailliertes Analyseprogramm begleitet, um gesicherte Aussagen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Baustoffe unter betonaggressiven Bedingungen treffen zu können (Tabelle 3-8). In Bezug auf aktuelle Schadensfälle (z. B. Staufen im Breisgau oder Böblingen) und unter Berücksichtigung der Grundwasserzusammensetzung in Baden-Württemberg wurden im Labor sulfataggressive und saure Wässer simuliert und in z.T. speziell entwickelten Versuchsaufbauten die Dauerhaftigkeit von Hinterfüllbaustoffen getestet. Hierbei wurden folgende Methoden angewendet:

1. Systemdurchlässigkeit: Durchlässigkeit des Systems
2. Durchströmungsversuche:
 - a. Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts
 - b. Simulation eines Grundwasserstauers: Die Trennung von verschiedenen Grundwasserstockwerken muss gewährleistet bleiben (Dichtigkeit)
3. Umströmungsversuche: Simulation unterschiedlicher Grundwasserszenarien (stagnierende und fließende Grundwasserverhältnisse)
4. Batchversuche: Beschleunigte Kleinmaßstabsversuche

Die einzelnen Versuche wurden durch ein detailliertes Analyseprogramm begleitet um gesicherte Aussagen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Baustoffe unter betonaggressiven Bedingungen treffen zu können.

Tabelle 3-8: Betonkorrosion (nach Knoblauch & Schneider 2013)

Angreifendes Medium	Angreifender Stoff im Zementstein	Zerstörung des Zementsteins durch	Auswirkung auf den Beton/Hinterfüllung	Reaktionsgleichung (Beispiel)
Säure an-org./org.	Ca(OH) ₂ C-S-H-Phasen C-A-H-Phasen	Lösen des Ca(OH) ₂ , Zersetzung der C-S-H- und C-A-H-Phasen	Festigkeitsabnahme, zunehmende Undichtheit, Oberflächenangriff	Ca(OH) ₂ + 2HCl → CaCl ₂ + 2H ₂ O 3CaO + 2SiO ₂ + 3H ₂ O + 6HCl → 3CaCl ₂ + 2SiO ₂ + 6H ₂ O
Starke Basen	C-A-H-Phasen	Auflösen der C-A-H-Phasen	Siehe oben	4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O + 2NaOH → 4Ca(OH) ₂ + 2NaAl(OH) ₄ + 6H ₂ O
Weiches Wasser	Ca(OH) ₂	Herauslösen des Ca(OH) ₂	Festigkeitsabnahme	-
Ammoniumsalz	Ca(OH) ₂	Umsetzen des Ca(OH) ₂	Siehe Säure	Ca(OH) ₂ + 2NH ₄ Cl → CaCl ₂ + 2NH ₃ + 2H ₂ O
Austauschfähige Salze	Ca(OH) ₂	Auslaugen des Ca(OH) ₂	Festigkeitsabnahme	Ca(OH) ₂ + 2NaNO ₃ → Ca(NO ₃) ₂ + 2NaOH
Kalklösende Kohlensäure	Ca(OH) ₂	Auslaugen des Ca(OH) ₂	Festigkeitsabnahme	Ca(OH) ₂ + 2CO ₂ → Ca(HCO ₃) ₂
Sulfate	Ca(OH) ₂ Aluminate	Gips Trisulfat	Treiberscheinungen Risse Festigkeitsverlust	Ca(OH) ₂ + Na ₂ SO ₄ + 2H ₂ O → CaSO ₄ ·2H ₂ O + 2NaOH C ₃ AH ₆ + 3Cs + 26H → C ₃ A·3Cs·23H
Magnesiumsalze	Ca(OH) ₂ C-S-H-Phasen	Mg(OH) ₂ *aq Mg-Silicate	Treiberscheinungen Festigkeitsverlust weißer Belag	Ca(OH) ₂ + Mg ²⁺ → Mg(OH) ₂ + Ca ²⁺ CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O + Mg ²⁺ → MgO·2SiO ₂ ·3H ₂ O + Ca ²⁺

3.2.2. Theoretische Grundlagen

3.2.2.1. Zementnomenklatur

Die Zementnomenklatur ist eine verkürzte Schreibweise für chemische Verbindungen, die in der Zement- und Bauchemie eingesetzt wird. Sie stellt eine vereinfachte, übersichtliche Darstellung von Summenformeln und Reaktionsgleichungen dar. Kurzzeichen und deren Verbindungen dürfen nicht mit den Elementensymbolen aus dem Periodensystem der Elemente verwechselt werden. Da die Zemente überwiegend aus Oxiden der Hauptgruppenelemente bestehen, werden die Oxide der Hauptbestandteile durch den jeweiligen Anfangsbuchstaben des Elements ersetzt (Tabelle 3-9; König 2010). Die Kurzschreibweise der Klinkerphasen zeigt Tabelle 3-10.

Tabelle 3-9: Kurzschreibweise der Oxide im Zement (nach König 2010)

Kurzschreibweise	Oxid
C	CaO
S	SiO ₂
A	Al ₂ O ₃
F	Fe ₂ O ₃
<u>S</u>	SO ₃
H	H ₂ O

Tabelle 3-10: Bezeichnung und chemische Formeln der im Zement enthaltenen Klinkerphasen (nach Verein Deutscher Zementwerke, 2002)

Klinkerphase	Chemische Formel	Kurzbezeichnung
Tricalciumsilikat (Alit)	3 CaO SiO ₂	C ₃ S
Dicalciumsilikat (Belit)	2 CaO SiO ₂	C ₂ S
Calciumaluminatferrit	2 CaO·(Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	C ₂ (A,F)
Tricalciumaluminat	3 CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
Freies CaO	CaO	C
Freies MgO (Periklas)	MgO	

3.2.2.2. Zementhydratation

Die beim Herstellungsprozess des Zements entstandenen Klinkerphasen (Tabelle 3-11) bilden bei Zugabe von Wasser durch Hydratation sogenannte Hydratphasen. Der Begriff Hydratation umfasst alle Prozesse, die beim Mischen von Zement mit Wasser unter „Verbrauch“ von Wasser ablaufen, unabhängig davon, wie das Wasser reagiert oder gebunden wird. Bei der Zementhydratation laufen verschiedene Reaktionen nach- und nebeneinander ab (Benedix 2011):

- Hydratations- und Protolysereaktionen
- Lösungs- und Kristallisationsvorgänge, wobei aus gesättigten bzw. übersättigten Lösungen gelartige oder kristalline wasserhaltige Verbindungen entstehen können (Hydratphasen)
- Grenzflächenprozesse, die eine „Verbindung“ der Bestandteile des Zementsteins bzw. Betons bewirken

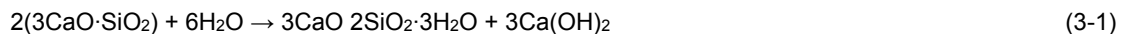
Die verschiedenen Klinkerphasen unterscheiden sich sowohl in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit als auch in ihrem Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Zementsteins (Verein Deutscher Zementwerke, 2002). Die ablaufenden Prozesse sind relativ komplex, da die Klinkerphasen unabhängig voneinander reagieren und sich in ihrer Reaktionsfähigkeit gegenseitig beeinflussen können. Die Reaktionen, die zur Bildung der Hydratphasen führen, lassen sich nicht durch einfache stöchiometrische Gleichungen beschreiben, da vielfach Festkörperprodukte unterschiedlicher Zusammensetzung entstehen bzw. die Umsetzungen über Zwischenprodukte verlaufen. Die Reaktionsprodukte enthalten im Wesentlichen CaO, SiO₂ und Wasser. Ihre spezifische Zusammensetzung hängt vom Wasser/Zement-Wert als auch vom Sulfatangebot ab (Benedix 2011, Verein Deutscher Zementwerke, 2002).

Eine Übersicht über die im Zement enthaltenen Klinkerphasen und deren jeweiligen Hydratationsprodukte gibt Tabelle 3-11. Die im Detail stattfindenden Reaktionen werden im Folgenden beschrieben.

Tabelle 3-11: Klinkerphasen mit den jeweiligen Hydratationsprodukten (Verein Deutscher Zementwerke, 2002; Benedix 2011)

Klinkerphase	Chem. Formel	Hydratationsprodukt	
C ₃ S Tricalciumsilikat (Alit)	3 CaO SiO ₂	Calciumsilikathydrat-Phase	C ₃ S ₂ H ₄
C ₂ S Dicalciumsilikat (Belit)	2 CaO SiO ₂	Calciumsilikathydrat-Phase	C ₃ S ₂ H ₄
C ₃ A Tricalciumaluminat	3 CaO·Al ₂ O ₃	Monosulfat	C ₃ A·C ₃ S·H ₁₂
		Ettringit (Trisulfat)	C ₃ A·3C ₃ S·H ₃₂
		Calciumaluminathydrat	C ₄ AH ₁₃
C ₄ AF Calciumaluminatferrit	4 CaO·(Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	Tetracalciumaluminatferrithydrat	C ₄ AH ₁₃ + C ₄ FH ₁₃
Freikalk	CaO	Portlandit	Ca(OH) ₂ = CH
Magnesiumoxid	MgO	Brucit	Mg(OH) ₂

Bei der Reaktion von **C₃S** mit Wasser entstehen kalkärmere Calciumsilikathydrate (CSH) unter Freisetzung von Portlandit (Ca(OH)₂) (Benedix 2011):



bzw. in Kurzschreibweise:



Der Hydratationsprozess von C₃S wird aufgrund dessen Reaktionskinetik in 5 Stadien eingeteilt (Tabelle 3-12).

Für die Hydratation der **C₂S**-Phase gelten folgende Reaktionen:



Die aus den silikatischen Klinkerphasen C₃S und C₂S während der Hydratation gebildeten Calciumsilikathydratphasen bestimmen die Endfestigkeit eines Zements (vgl. Abbildung 3-37a/c).

Tabelle 3-12: Reaktionsfolge bei der Zementhydratation von C₃S (nach Benedix 2011)

Periode	Stadium	Bezeichnung der Periode	Kinetik der Reaktion	Chemischer Prozess	Einfluss auf den Zementleim bzw. -stein
Früh	I	Induktionsperiode	Chemisch kontrolliert, sehr schnell	Beginn der Hydratation, In Lösung gehen von Ionen	Einstellung des basischen pH-Werts
	II	Dormante Periode	Durch Keimbildung gesteuert, langsam	In Lösung gehen von Ionen setzt sich fort	Ansteifen, Erstarungsbeginn
Mittel	III	Accelerationsperiode	Chemisch kontrolliert, schnell	Bildungsbeginn und Wachstum von permanenten Hydratationsprodukten	Erstarrungsende und Erhärtungsbeginn
	IV	Retardationsperiode	Chemisch und durch Diffusion kontrolliert, langsam	Weiteres Wachstum von Hydratationsprodukten, Ausbildung von Mikrostrukturen	Bestimmt die Frühfestigkeit
Spät	V	Finalperiode	Durch Diffusion kontrolliert, langsam	Langsame Bildung von C-S-H-Phasen allmähliche Verdichtung der Mikrostrukturen	Bestimmt die Endfestigkeit

Die Reaktionen des Aluminats **C₃A** sind von der Anwesenheit eines Sulfatträgers abhängig. Sind keine Sulfate (z.B. Gips) als Erstarrungs- oder Abbinderegler vorhanden, reagiert C₃A zu schnell mit Wasser und erstarrt bereits nach wenigen Minuten. Um das spontan einsetzende Erstarren zu verhindern, wird dem Zement ein Abbinderegler (meist Gips) zugesetzt. Je nach Sulfatangebot verläuft die Reaktion langsamer oder schneller. Je nach Konzentration des Abbindereglers laufen unterschiedliche Reaktionen ab und bestimmt die Art der entstehenden Calciumaluminatsulfate. Steht ein hoher CaSO₄-Gehalt zu Verfügung, reagiert das C₃A mit Wasser und CaSO₄ zu Ettringit. Da pro Mol Ettringit drei Mole CaSO₄ gebunden werden, bezeichnet man **Ettringit** auch als „Trisulfat“ (Benedix 2011):



oder



Die zur Erstarrungsregelung des angemachten Zements benötigten Sulfatmengen verbrauchen sich in den ersten Stunden des Erhärtungsprozesses. Damit ist die primäre Ettringitbildung abgeschlossen. In der Regel steht noch ursprüngliches C₃A für die weitere Hydratation zur Verfügung. Ist der Sulfatgehalt in der Zementmischung niedrig, bildet sich Monosulfat:



Bei der Hydratation der Aluminatferritphase **C₄AF** entstehen ähnliche Produkte wie bei der Hydratation von C₃A, wobei Aluminium teilweise durch Eisen ersetzt ist. Die Reaktion verläuft zwar langsamer als im Vergleich zu C₃A, muss dennoch mit einem Sulfatträger verzögert werden. In Zementen mit hohem Sulfatwiderstand ist entweder kein oder nur wenig C₃A vorhanden, dafür ist der C₄AF-Anteil höher (Stark & Wicht 2013). Die langsamere Hydratation des C₄AF wird durch eine Auslaugung des Aluminiums aus den C₄AF-Körnern erklärt. Das in Lösung gelangte Aluminium reagiert mit Sulfat und Ca(OH)₂ zu Ettringit. Aufgrund der langsamen Aluminiumfreisetzung und der schnellen SO₃-Löslichkeit (Sulfatträger) kann es im Zementgefüge zur Bildung von sekundärem Gips kommen (Stark & Wicht 2013). Er verschwindet wieder, sobald für die Ettringitbildung des ausgelaugten Aluminats weiteres Sulfat benötigt wird (Benedix 2011).

Unmittelbar nach Zugabe von Wasser zum Zement beginnen die Hydratationsreaktionen, die ein anfangs geringes, nach einiger Zeit verstärktes Ansteifen zur Folge haben. Die zeitlich anschließende, weitere Verfestigung ist als *Erstarren*, die danach fortschreitende Verfestigung als *Erhärten* definiert (Verein Deutscher Zementwerke, 2002). Zu Beginn des Hydratationsprozesses kommt es zu einer Reaktion des Freikalks, einer Dissoziation der Alkalisulfate sowie in unterschiedlichem Umfang zur Bildung von Ettringit und Gips (Abbildung 3-37 b, c). Damit verbunden ist ein schneller Anstieg der Alkali- und Sulfationenkonzentration (Stark & Wicht 2013). Die Geschwindigkeit dieses Prozesses nimmt zwar schnell ab, geht aber auch während der Ruhephasen nie gegen null. Eine gesättigte Ca(OH)₂-Lösung besitzt einen pH-Wert von 12,5. Durch die zusätzlich im Zement enthaltenen Alkalien (NaOH, KOH) liegt der pH-Wert meist um ± 13 (Benedix 2011). Der pH-Wert steigt in Abhängigkeit vom Verbrauch der Sulfationen, da durch die Bildung von Ettringit und Gips Sulfationen der Lösung durch OH⁻-Ionen ersetzt werden (Stark & Wicht 2013). Wird in der wässrigen Phase die Löslichkeit von Ca(OH)₂ überschritten (~1700 mg/l), beginnt die Kristallisation von Portlandit (CH) und der Calciumsilikathydrate (CSH). Während die primär gebildeten CSH-Kristalle (röntgenamorph) auf der C₃S-Oberfläche kristallisieren, fällt Portlandit in Form tafelförmiger Kristalle aus.

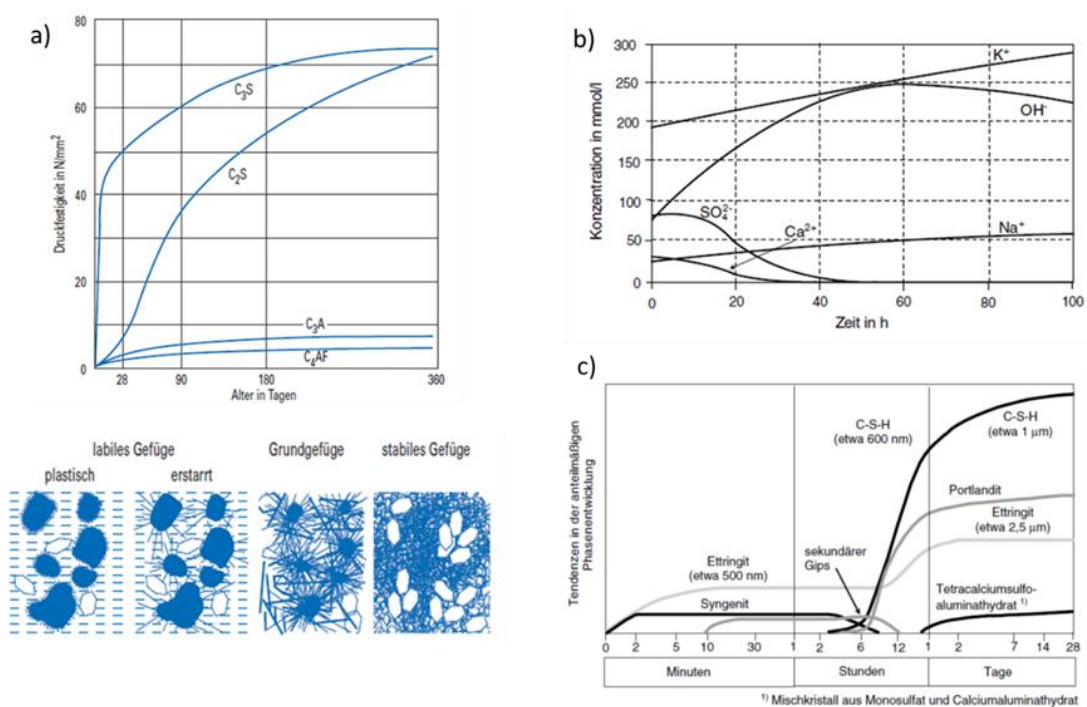


Abbildung 3-37: a) Druckfestigkeiten der reinen Klinkerphasen und Gefügeentwicklung in Abhängigkeit der Hydratationsdauer (Verein Deutscher Zementwerke, 2002), b) Zeitlicher Verlauf der Ionenkonzentration während der Hydratation (Stark & Wicht 2013), c) Schema der Portland-Zemthydratation (Stark & Wicht 2013)

3.2.2.3. Sulfatbeständigkeit von Zement

Bei einem chemischen Angriff auf erhärteten Beton bzw. Zement wird zwischen einem treibenden und einem lösenden Angriff unterschieden (Verein Deutscher Zementwerke, 2002):

- Lösender** Angriff: wird durch Säuren und bestimmte austauschfähige Salze hervorgerufen.
- Treibender** Angriff: wird durch Ionen hervorgerufen, die in den erhärteten Zement eindringen und mit bestimmten Silikathydratphasen unter Mineralneubildung reagieren. Nehmen die neugebildeten Minerale einen größeren Raum als die Ausgangsprodukte ein, entsteht ein Kristallisationsdruck, welcher zu Spannungen im Zement und schließlich zu Treiberscheinungen und Rissbildung führt. Verschiedene Dehnungsmechanismen werden bei Müllauer (2013) erläutert.

Das Sulfattreiben ist eine der häufigsten Ursachen der chemischen Zersetzung von Beton/Zement. Sulfate gelangen auf unterschiedliche Weise in Oberflächen- und Grundwässer. Die wichtigsten Sulfatquellen sind das SO_2 der Luft (Saurer Regen), Gips (Anhydrit)- oder MgSO_4 -haltige Bodenschichten, industrielle und gewerbliche Abwässer, landwirtschaftliche Aktivitäten (Mineraldüngung) und bakterielle Abbauprozesse schwefelhaltiger organischer Stoffe (Benedix 2011).

Sulfate dringen von außen als wasserlösliche Sulfate (z.B. Natriumsulfat, Magnesium- oder Calciumsulfat) in den Beton/Zement ein und reagieren chemisch unter Volumenvergrößerung mit den Bestandteilen des Zements.

Der Sulfatangriff auf Beton/Zement wird grundlegend in zwei Formen eingeteilt (Müllauer 2013, Stark & Wicht 2013):

- Äußerer** Sulfatangriff: Hierbei dringen wasserlösliche Sulfationen, z. B. sulfathaltige mineralische Säuren, Sulfate oder Sulfide aus den angrenzenden Wässern und Böden (DIN 4030), in den Zement ein und reagieren chemisch unter Volumenvergrößerung mit den Bestandteilen des Zementsteins. Dies führt zur Treiberscheinungen im Zement/Beton gefolgt von Rissbildung und vollständiger Gefügezerstörung. Als schädigende Neubildungen kommen die Minerale Ettringit, Gips und Thaumasit in Betracht.
- Innerer** Sulfatangriff: Die Sulfationen liegen bereits im Zement/Beton in Form des Sulfatträgers vor. Ursachen für einen inneren Sulfatangriff können z.B. eine Fehldosierung des Sulfatträgers oder eine falsche Wärmebehandlung sein.

Im Rahmen der Batchversuche wird ausschließlich der äußere Sulfatangriff auf Hinterfüllmassen (Zemente) von Erdwärmesonden betrachtet und näher beschrieben.

Beim Sulfatreiben wird zwischen Gips- und Ettringittreiben unterschieden. Eine besondere Art des Sulfatangriffs stellt die Bildung von Thaumasit dar, welche durch Auflösung des Zementsteingefüges zu einer Entfestigung führt (Verein Deutscher Zementwerke, 2002). Nachfolgend werden die einzelnen Reaktionsmechanismen beschrieben. Eine zusammenfassende Übersicht über die Ursache, Voraussetzungen und Mechanismen beim äußeren Sulfatangriff geben Abbildung 3-38 und Tabelle 3-13.

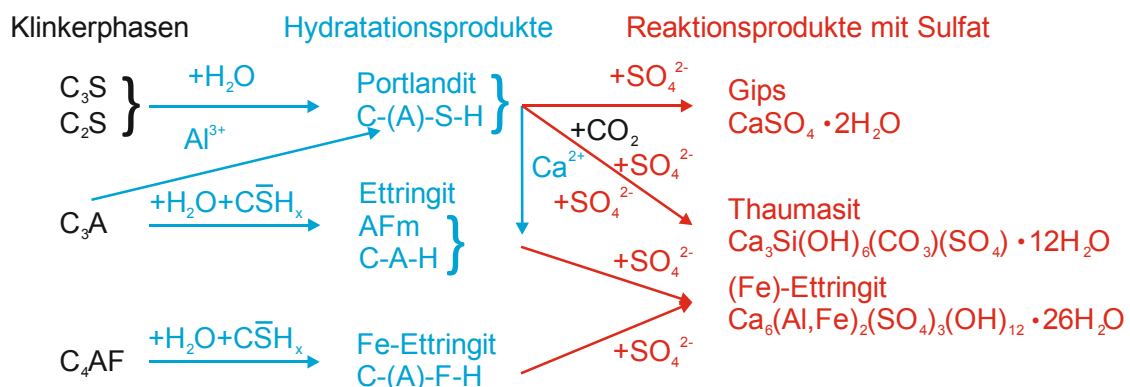


Abbildung 3-38: Hydratation von Portlandzement und mögliche chemische Reaktionen bei einem äußeren Sulfatangriff (aus Müllauer 2013)

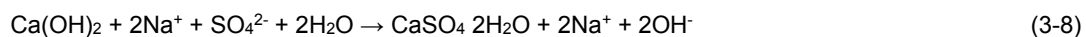
Tabelle 3-13: Übersicht von Ursache, Voraussetzungen und Mechanismen beim äußeren Sulfatangriff (nach Stark & Wicht 2013 und Müllauer 2013)

Merkmale	Treibender Sulfatangriff	Thaumasitbildung
Schädigung	Dehnungs- und Rissbildung durch Sulfattreiben	Verlust der Festigkeit
Ursache	Entstehung von Ettringit und Gips, welche im Vgl. zur Ausgangsphase ein größeres Volumen einnehmen	Bildung von Thaumasit (bevorzugt bei $T < 15^{\circ}\text{C}$)
Voraussetzung	Anwesenheit von aluminiumhaltigen Phasen (primär C_3A -Phasen bzw. deren Hydratationsprodukte)	Anwesenheit einer Carbonatquelle
Mechanismen	<ul style="list-style-type: none"> Gips- und Ettringitbildung laufen an exponierten Flächen gleichzeitig ab Portlandit wird im oberflächennahen Bereich fast vollständig in Gips umgewandelt bzw. ausgewaschen => Erhöhung der Porosität; Bildung eines CaCO_3-Saums Bei Anwesenheit von MgSO_4 kann zusätzlich eine Schicht aus Brucit und Gips auf der Oberfläche die Diffusion von Sulfationen verlangsamen Nach Einsetzen der Bildung von Mikro- und Makrorissen wird die äußere Dehnung beschleunigt, insbesondere bei Anwesenheit von Na_2SO_4-Lösungen 	Lösung von calcium-haltigen Mineralphasen des Zementsteins wie z.B. Portlandit oder C-S-H-Phasen
Sonstiges	Ettringit bildet sich auch während der Zementhydratation durch die Reaktion des C_3A mit dem Abbindeeregler Gips	

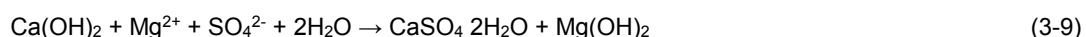
3.2.2.3.1. Gipstreiben

Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) entsteht auf unterschiedliche Weise, je nach Zusammensetzung der angreifenden wässrigen Lösung, durch die äußere Einwirkung von SO_4^{2-} -Ionen auf die Zementphasen (Stark & Wicht 2013):

- a) Die Einwirkung einer NaSO_4 -Lösung auf die silikatischen Klinkerphasen Alit (C_3S , Tricalciumsilikat) und Belit (C_2S , Dicalciumsilikat) führt zwar zur Gipsbildung, aber nicht zu einer Dehnung:



- b) Bei einer magnesiumreichen Sulfatlösung kann es sowohl zur Dehnung als auch zur Gefügeschädigung kommen. Dies kann sowohl durch die Bildung von Gips aus Portlandit, als auch durch die Ausfällung von Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) zurückzuführen sein:

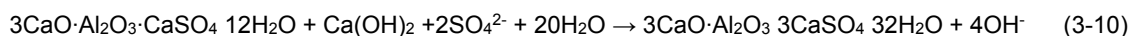


Durch die Bildung von Brucit auf der Zementoberfläche kann die Sulfatdiffusion verlangsamt sein (Verein Deutscher Zementwerke, 2002).

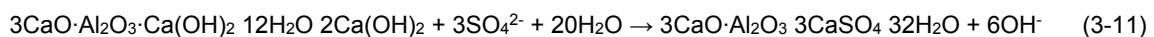
3.2.2.3.2. Ettringittreiben

Ettringit bildet sich bereits während der Zementhydratation durch die Reaktion der Klinkerphase Tricalciumaluminat ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A) mit dem Abbinderegler Gips oder Anhydrit in Gegenwart des Anmachwassers. Die Ettringitbildung läuft bevorzugt bei niedrigen Temperaturen ab. Für die Bildung von Ettringit während eines Sulfatangriffes bestehen mehrere Möglichkeiten (Stark & Wicht 2013):

a) Bildung aus Monosulfat ($\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CS}\cdot\text{H}_{12}$):



b) Bildung aus Ca-Al-Hydrat (C_3A), z. B.:



Die Ettringitbildung durch einen äußeren Sulfatangriff ist mit einer deutlichen Volumenzunahme, die zur Zerstörung des Zementgefüges führt, verbunden. Beim Übergang vom C_3A ($270,134 \text{ g/mol}$, $\rho = 3,04 \text{ g/cm}^3$) zu Ettringit ($1254,458 \text{ g/mol}$, $\rho = 3,04 \text{ g/cm}^3$) erhöht sich das Volumen von $89 \text{ cm}^3/\text{mol}$ auf einen Wert von $717 \text{ cm}^3/\text{mol}$ (nach Benedix 2011, vgl. Abbildung 3-39). Die Volumenzunahme beträgt somit etwa das Achtfache. Die Bildung von Ettringit aus den Calciumaluminathydratphasen wird als die Hauptursache für die Schadensbildung im Beton angesehen (Stark & Wicht 2013).

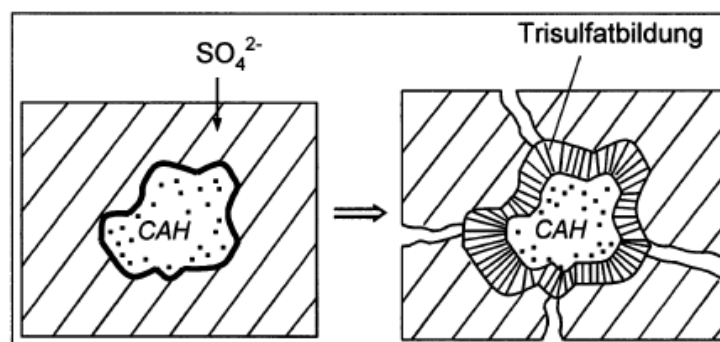
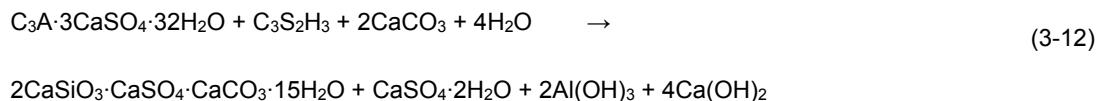


Abbildung 3-39: Schematische Darstellung des Sulfattreibens durch Bildung von Ettringit (Trisulfat) aus einer Calciumaluminathydratphase (CAH) (aus Benedix 2011)

3.2.2.3.3. Bildung von Thaumazit

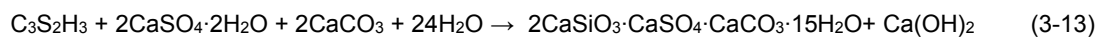
Thaumazit ist strukturell mit Ettringit verwandt. Gegenüber Ettringit ist im Thaumazit das Aluminium durch Silizium ersetzt und Carbonat teilweise auf den Plätzen des Sulfates substituiert. Thaumazit entsteht durch die Reaktion der CSH-Phasen mit Sulfaten in Anwesenheit einer Carbonatquelle, wodurch die festigkeitsbildenden CSH-Phasen ganz oder teilweise aufgelöst werden. Der Beton/Zement verliert seine Festigkeit (Benedix 2011). Für die Entstehung von Thaumazit gibt es zwei mögliche Reaktionswege (Stark & Wicht 2013):

- a) Substitution von Ionen im primär gebildeten Ettringit, sodass eine langsame Umkristallisation stattfindet:



Das Silizium aus den CSH-Phasen wird auf den Plätzen des Aluminiums eingebaut. Gleichzeitig wird Sulfat durch Carbonat ersetzt. Das freigewordene Aluminium kann wiederum mit Portlandit und Sulfat Ettringit bilden, wodurch es zusätzlich zur Thaumasitbildung noch zu einer Treiberscheinung kommen kann.

- b) Direkte Reaktion der CSH-Phasen mit Sulfat und Carbonat zu Thaumasit:



Hier finden keine Substitutionen im Kristallgitter statt. Thaumasit tritt als Ausfällungsprodukt aus einer übersättigten Lösung auf.

3.2.2.3.4. Einfluss von Kationen

Die schädigende Wirkung eines äußeren Sulfatangriffes auf Zement ist von der Art der vorliegenden Sulfate abhängig.

Den geringsten Angriffsgrad weist eine **Calciumsulfatlösung** auf (Stark & Wicht 2013). Dies beruht auf der begrenzten Löslichkeit von etwa 2000 mg/l bei Raumtemperatur. Als Reaktionspartner einer Calciumsulfatlösung kommen nur Aluminathydrate oder Monosulfat, die zu Ettringit reagieren, in Frage (Verein Deutscher Zementwerke, 2002).

Die Löslichkeit von **Magnesiumsulfat** in Wasser ist mit 300 g/l relativ hoch (Raumtemperatur). Bei der Einwirkung von magnesiumsulfathaltigen Lösungen kommt es u. a. zu einer Umsetzung von Portlandit mit Magnesiumsulfat zu Gips und Brucit. Magnesiumsulfat kann mit den im Zementstein enthaltenen C_3A und C_4AF -Hydraten wie folgt reagieren (Stark & Wicht 2013):



Bei einer Basizitätserniedrigung durch die Umsetzung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in das nahezu unlösliche $\text{Mg}(\text{OH})_2$ wird der Zerfall der CSH-Phasen eingeleitet:



Daraus bildet sich ein unlösliches, gelartiges Magnesiumsilikat. Der Angriff einer Magnesiumsulfatlösung bewirkt somit eine beschleunigte Schwächung des Gefüges, die mit Festigkeitseinbußen, Treiberscheinungen und verstärkter Sulfatdiffusion einhergeht (Verein Deutscher Zementwerke, 2002).

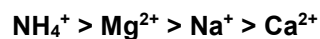
Durch die Bildung von Gips und Brucit kann es zu einer Abdichtung der Oberfläche kommen, solange es durch die Volumenzunahme nicht zu einer Rissbildung kommt. Dadurch wird das Eindringen von Sulfationen verlangsamt. Nach Verbrauch des Portlandzements werden die CSH-Phasen umgesetzt und es treten Festigkeitsverluste auf.

Beim Angriff von **ammoniumsulfathaltigen** Lösungen (Löslichkeit: 754 g/l) entstehen die gleichen Reaktionsprodukte wie bei magnesiumsulfathaltigen Lösungen. Bei Verringerung der Basizität des Zementsteins kommt es zur Auslaugung des Calciums und zur Auflockerung des Zementsteingefüges:



Für eine Reaktion mit einer **Natriumsulfatlösung** (Löslichkeit: 170 g/l) stehen im Zementstein Calciumhydroxid, Aluminathydrat und Monosulfathydrat zur Verfügung, die zu Monosulfat, Ettringit oder Gips reagieren können (Verein Deutscher Zementwerke, 2002).

Nach Stark & Wicht (2013) nimmt die Wirkung der Kationen mit folgender Reihenfolge ab:



Eine Übersicht über die vorwiegenden Reaktionen von angreifenden Sulfaten mit Bestandteilen des Zements und die dabei entstehenden Reaktionsprodukte gibt Tabelle 3-14.

In natürlicher Umgebung treten jedoch mehrere Sulfatspezies nebeneinander auf, weshalb die chemischen Reaktionen außerordentlich komplex ablaufen können. Zudem bewirkt die Anwesenheit anderer gelöster Salze eine Veränderung der Aktivitätskoeffizienten aller Ionenspezies.

Tabelle 3-14: Angreifende Sulfatlösungen und Reaktionen mit Bestandteilen im Zementstein und daraus möglich folgenden Reaktionsprodukten (Verein Deutscher Zementwerke, 2002)

Angreifendes Medium	Reaktionspartner (Zementstein)	Reaktionsprodukt
MgSO ₄	Ca(OH) ₂ 3CaO·2SiO ₂ ·nH ₂ O 4CaO·Al ₂ O ₃ ·19H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O Mg(OH) ₂ 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O
NaSO ₄	Ca(OH) ₂ 4CaO·Al ₂ O ₃ ·19H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O
CaSO ₄	4CaO·Al ₂ O ₃ ·19H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O	3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O

3.2.2.4. Säureangriff

Viele chemische Verbindungen können mit den Bestandteilen des Zementsteins auf unterschiedliche Art reagieren, wobei zwischen lösendem und treibendem Angriff unterschieden wird (Verein Deutscher Zementwerke 2002).

Der chemisch lösende Angriff findet u.a. durch saure Lösungen statt, die zu chemischen Reaktionen an der Oberfläche des Hinterfüllmaterials führen. Dadurch bilden sich aus den schwerlöslichen Verbindungen im Zement leicht lösliche Reaktionsprodukte, sodass der Zementstein von der Oberfläche her angegriffen und aufgelöst wird, was seine Festigkeit deutlich verringert (Verein Deutscher Zementwerke 2002; Stark & Wicht 2013). Die Geschwindigkeit dieses Angriffs nimmt mit der Konzentration der Säure und ihrer Temperatur zu (Thienel 2011). Von besonderer Bedeutung ist hier der Angriff CO₂-haltiger Wässer auf die Hinterfüllmaterialien, da das gut lösliche CO₂ mit Wasser Kohlensäure H₂CO₃ bildet, die ihrerseits mit den Calcium-Verbindungen reagiert. Dabei reagiert sie zunächst mit Calciumhydroxid Ca(OH)₂ und bildet so das wasserunlösliche Calciumcarbonat CaCO₃. Dieses wird anschließend mit weiterer Kohlensäure zu gelöstem Calciumhydrogencarbonat Ca(HCO₃)₂ umgesetzt, wodurch Kalk aus dem Hinterfüllmaterial herausgelöst wird (Stark & Wicht 2013). Die hierbei ablaufenden Reaktionen lauten:



Die Kalkverbindungen des Hinterfüllmaterials werden jedoch nicht durch das gesamte im Wasser enthaltene CO₂ angegriffen und aufgelöst. Diejenigen Kohlendioxidanteile, die mit den Calcium-Verbindungen reagieren können, werden als „kalklösende Kohlensäure“ bezeichnet. Diese kommt häufig in weichen Grundwässern sowie in Mineralwässern oder Oberflächen- und Quellwässern, die durch organische Zersetzung mit CO₂ angereichert sind, vor (Grübl et al. 2001).

Bei einem kalklösenden Säureangriff werden die Hydratphasen an der Zementoberfläche zersetzt, wobei hier v.a. die Calciumhydratphasen (z.B. Calciumhydroxid Ca(OH)₂, Calciumsilikathydrat CSH, Calciumaluminatferitthydrat C(A,F)H) angegriffen werden, was durch den starken Anstieg der Calcium-Konzentrationen in allen Wässern gezeigt wird (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Dabei ist Calciumhydroxid dasjenige Hydratationsprodukt im Zementstein, welches am leichtesten löslich ist (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Dieses, auch bekannt als das Mineral Portlandit, entsteht bei der Hydratation von Tricalciumsilikat und wird als Zusatzstoff dem Zement zugegeben, um seine Festigkeit zu erhöhen (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Bei 20 °C beträgt seine Löslichkeit 1,7 g/l und reagiert dabei in Lösung sehr stark alkalisch (Gestis-Stoffdatenbank). Weiterhin werden aber auch die leicht löslichen Natrium- und Kaliumhydrate der Hinterfüllbaustoffe bei dem Säureangriff zersetzt.

Die sauren Wässer greifen die Oberflächen der Hinterfüllung an, lösen ihre Bestandteile auf und verursachen damit eine von außen nach innen fortschreitende Auflösung des Gefüges. Hierbei findet zuerst eine relativ rasch ablaufende Reaktion der angreifenden Wässer mit den Calciumhydraten statt, die sich im Laufe der Zeit abschwächt. Durch diesen fortschreitenden, chemischen Angriff kommt es zu einer Zonenbildung im Zementstein (Grube & Rechenberg 1987; Franke 1996). Die nachfolgende Abbildung zeigt diesen Angriffsmechanismus durch die kalklösende Kohlensäure.

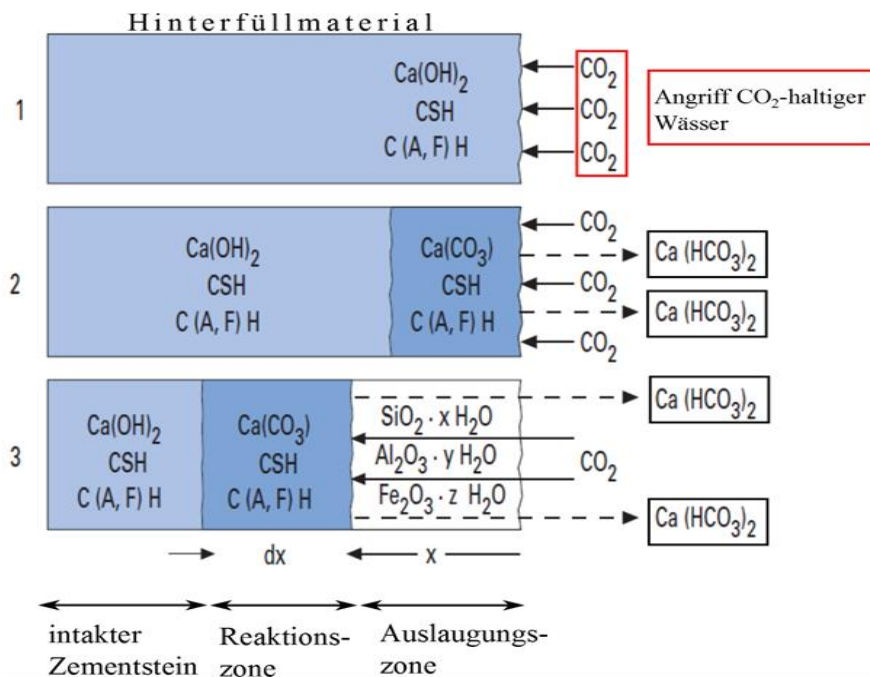


Abbildung 3-40: Wirkung kalkangreifender Kohlensäure auf Zementstein (Modell für drei Zeitstufen in Folge, (aus Verein Deutscher Zementwerke 2002)

Zu Beginn des Säureangriffs (Zeitstufe 1) greift die Lösung die noch vollständig intakte Zementsteinoberfläche an. Als Folge davon bildet sich eine Reaktionszone (Zeitstufe 2) aus, in der sich das Calciumhydroxid Ca(OH)_2 in Calciumcarbonat CaCO_3 umwandelt. Durch die Auflösung dieses Calciumcarbonats findet der erste Abtransport von Calcium aus dem Zement als gelöstes Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca(HCO}_3)_2$ statt (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Mit fortschreitender Zeit wandert die Reaktionszone weiter ins Innere (Zeitstufe 3) und hinterlässt die sogenannte Auslaugungszone aus unlöslichen Reaktionsprodukten des Zementsteins (Hydroxide, Kieselsäure) (Verein Deutscher Zementwerke 2002; Locher & Sprung 1975). Die Breite der Auslaugungszone hängt von der Säurekonzentration und der Einwirkzeit ab (Franke 1996). Für den weiteren chemischen Angriff müssen die Ionen durch diese Auslaugungszone hindurch diffundieren. Durch den größer gewordenen Diffusionsweg werden die Geschwindigkeit des Säureangriffs und der damit erfolgende Schadensfortschritt verlangsamt und reduziert.

3.2.3. Material und Methoden

3.2.3.1. Untersuchte Hinterfüllmaterialien

Die VDI 4640 definiert die Anforderung an die Hinterfüllung von Erdwärmesonden mit der Sicherstellung des Wärmetransports vom Gestein an das Wärmeträgermedium, dem Schutz der Erdwärmesondenrohre sowie der Bohrlochabdichtung, um Schadstoffeinträge und den Kurzschluss von Grundwasserleitern zu unterbinden. Die Hinterfüllung muss nach dem Aushärten eine dichte und dauerhafte, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der EWS in das umgebende Gestein gewährleisten. Bei problematischen äußeren Standortbedingungen wie zementaggressiven Wässern scheinen nicht alle in der Vergangenheit verwendeten Hinterfüllbaustoffe diese Anforderungen erfüllen zu können.

Ziel dieses Arbeitspakets war es, den Angriff von zementaggressiven Wässern auf die Dauerhaftigkeit der Hinterfüllmaterialien zu untersuchen. Um ein möglichst breites Spektrum der gängigen auf dem Markt befindlichen Hinterfüllmaterialien abzudecken, wurden drei unterschiedliche Baustoffe sowie eine Baustellenmischung (Eigenmischung) ausgewählt. Hierbei wurden ein nicht thermisch verbesserter Standardverfüllbaustoff (Baustoff 01), ein auf Quarzbasis thermisch verbesserter Verfüllbaustoff (Baustoff 07), sowie ein mit anderen Zuschlagstoffen thermisch verbesserter Verfüllbaustoff (Baustoff 13) festgelegt. Die Rezeptur der Eigenmischung (Baustoff 16) wurde in Anlehnung an die VDI 4640 zusammengestellt. Hierbei wurden 10 Gew.-% Bentonit, 10 Gew.-% Zement und 30 Gew.-% Sand bei einem W/F-Wert von 1 gemischt. Bei der Zusammensetzung der Eigenmischung wurde darauf geachtet, dass Baustoffe zum Einsatz kamen, die auch in früheren Zeiten beim Bau von Erdwärmesondenanlagen häufig eingesetzt wurden. Da das Hauptaugenmerk der Untersuchungen auf dem verwendeten Zement lag, wurde bei der Wahl des Sandes auf einen sich weitgehend inert verhaltenden Quarzsand zurückgegriffen. Nähere Angaben zu den untersuchten Verfüllmaterialien sind in Tabelle 3-15 aufgelistet.

Da die Versuche innerhalb des Projektes über einen Mindestzeitraum von zwei Jahren durchgeführt werden sollten, stellte sich zu Projektbeginn die Frage, ob für jeden Versuch neues Probenmaterial verwendet werden sollte oder ob es aus einer Charge, die über die Projektlaufzeit entsprechend gelagert wird, entnommen wird. Beide Vorgehensweisen haben hierbei ihre Vor- und Nachteile, da zum einen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei der Verwendung von Probenmaterial aus verschiedenen Chargen aufgrund von Schwankungen in der Rohstoffzusammensetzung nicht zwangsläufig gegeben ist und zum anderen bei der längeren Lagerung des Probenmaterial es zu Alterungsprozessen kommen kann. In einer Runde aus allen Projektpartnern sowie den Baustoffherstellern wurde festgelegt, dass alle Laborversuche mit Material aus einer Charge durchzuführen sind.

Tabelle 3-15: Untersuchte Hinterfüllmaterialien

Baustoffgruppe	Interne Baustoffnummer	Zusammensetzung
Thermisch verbesserter Standardverfüllbaustoff	01	-
Auf Quarzbasis thermisch verbesserter Verfüllbaustoff	07	-
Mit anderen Zuschlagstoffen thermisch verbesserter Verfüllbaustoff	13	-
Eigenmischung	16	10 Gew.% IBECO Aktiv Bentonit B1 10 Gew.% Portlandzement CEM-I-32,5R (Heidelberg Cement) 30 Gew.% Dorsilit Quarzsand 0,1-0,8 mm (Dorfner)

3.2.3.2. Verwendete Wässer

Im Rahmen des Projekts wurde zum einen der Angriff von sulfathaltigen Wässern als auch der Säureangriff auf zementhaltige Hinterfüllmaterialien untersucht. Hierzu wurden die zu untersuchenden Proben in unterschiedlich zusammengesetzten Wässern in verschiedenen Versuchen ausgesetzt. Um das Maß des Angriffs beurteilen zu können, wurden zusätzlich Versuche mit Karlsruher Leitungswasser durchgeführt. Aufgrund des umfangreichen Untersuchungsprogramms, der begrenzten Probestellen in den Versuchseinrichtungen, der relativ langen Versuchszeiten und der Projektlaufzeit von 2 Jahren, konnten nur vereinzelt Parallelversuche durchgeführt werden.

In der Betontechnologie werden in der DIN 4030-1 Verfahren und Kriterien zur Beurteilung des Angriffsvermögens von Wässern vorwiegend natürlicher Zusammensetzung, von Böden und von Gasen, die betonangreifende Stoffe enthalten können und von außen chemisch auf erhärtenden Beton nach DIN EN 2006-1 und DIN 1045-2 einwirken, geregelt. Hier werden Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser festgelegt. Neben den Vorgaben der DIN 4030-1 wurden zunächst für den lokalen Bezug zusätzlich auch Recherchen über die Höhe der Sulfatgehalte von natürlichen Grund- und Mineralwässern in Baden-Württemberg vorgenommen. In Carlé (1975) sind die hydrochemischen Eigenschaften der Mineralquellen von Baden-Württemberg beschrieben. Demnach treten im Oberen und Mittleren Muschelkalk stark angreifende Wässer mit Sulfatgehalten zwischen 3.500 – 4.000 mg/l auf.

Tabelle 3-16: Grenzwerte für die Expositionsclassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser (nach DIN 4030-1)

Chemisches Merkmal	Referenzprüfverfahren nach	XA1	XA2	XA3
Grundwasser				
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	DIN EN 196-2	≥200 und ≤ 600	>600 und ≤ 3.000	>3.000 und ≤6.000
pH-Wert	ISO 4316	≤6,5 und ≥5,5	<5,5 und ≥4,5	<4,5 und ≥4,0
CO ₂ [mg/l] an-greifend	DIN EN 13577; 2007	≥15 und ≤40	>40 und ≤100	>100 bis zur Sättigung
NH ₄ ⁺ [mg/l]	ISO 7150-1; 1984	≥15 und ≤30	>30 und ≤60	>60 und ≤100
Mg ²⁺ [mg/l]	DIN EN ISO 7980	≥300 und ≤1.000	>1.000 und ≤3.000	>3.000 bis zur Sättigung
Boden				
SO ₄ ²⁻ [mg/kg ³] ^a insgesamt	DIN EN 196-2 ^b	≥2.000 und ≤3.000 ^c	>3.000 ^c und ≤12.000	>12.000 und ≤24.000
Säuregrad	DIN 4030-2	>200 Bauman-Gully	In der Praxis nicht anzutreffen	
^a Tonböden mit einer Durchlässigkeit von weniger als 10 ⁻⁵ m/s dürfen in eine niedrigere Klasse eingestuft werden. ^b Das Prüfverfahren beschreibt die Auslaugung von SO ₄ ²⁻ durch Salzsäure; Wasserauslaugung darf stattdessen angewandt werden, wenn am Ort der Verwendung des Betons Erfahrung hierfür vorhanden ist. ^c Falls die Gefahr der Anhäufung von Sulfationen im Beton - zurückzuführen auf wechselndes Trocknen und Durchfeuchten oder kapillares Saugen - besteht, ist der Grenzwert von 3.000 mg/kg auf 2.000 mg/kg zu vermindern.				

Im Keuper und hier speziell im Gipskeuper liegen zum Teil sogar Werte von 4.900 mg/l vor. Vereinzelt gibt es auch im Mittleren Muschelkalk Mineralwasservorkommen mit Sulfatgehalten von 8.000 - 18.000 mg/kg_(Wasser) (CARLÉ 1975). Häufig ist in diesen Wässern auch der CO₂-Gehalt erhöht. Im Keuper bei Bad Friedrichshall wurden Sulfatgehalte von bis zu 80.000 mg/kg_(Wasser) gemessen. Anzumerken ist, dass oftmals in den Wässern mit hohen Sulfatgehalten auch hohe Chloridgehalte vorliegen. Bei Rottenburg liegen zudem hohe H₂S-Gehalte von 10,8 mg/l vor.

Zur Festlegung der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Wässer wurden zusätzlich die Daten aus dem Jahresdatenkatalog Grundwasser der LUBW (<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/68854/>) herangezogen. Für Baden-Württemberg konnten hieraus 2.096 Grundwassermessstellen ermittelt werden, von denen für den Zeitraum vom Januar 2000 bis Dezember 2012 insgesamt 18.419 Grundwasseranalysen vorliegen, die in ihrer chemischen Zusammensetzung Sulfat aufweisen. Von diesen 2.096 Grundwassermessstellen weisen 31 Messstellen Sulfatgehalte >1.000 mg/l auf. Das sind ca. 1,48 %, d.h. in 98,52 % der Messstellen sind die Sulfatgehalte geringer. In 25 dieser Messstellen liegen die Sulfatgehalte zwischen 1.000 - 1.500 mg/l, was 1,2 % entspricht. Insgesamt sind also nur bei ca. 0,28 % der Grundwassermessstellen in Baden-Württemberg die Sulfatgehalte über 1.500 mg/l.

Hinsichtlich der Anhydrit/Gipsproblematik gilt ferner zu beachten, dass bei Raumtemperatur sich 2,036 g CaSO₄ in einem Liter Wasser lösen, was zu einer gesättigten Lösung mit einer Sulfatkonzentration von 1.412 mg/l führt. Bei Anwesenheit von Fremdionen liegt die Konzentration der gesättigten Lösung bei ca. 1.500 mg/l (Stark & Wicht 2013) und damit im Bereich der Wässer S1-S3 (Tabelle 3-17).

Die derzeit in anderen Studien durchgeführten Versuche zum Sulfatangriff (siehe Kapitel 3.2.3.9) wurden mit weitaus höheren Sulfatkonzentrationen durchgeführt, die jedoch weit über den Werten natürlicher Grundwässer liegen. Experimentelle Untersuchungen zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel durch Mulenga (2002) haben jedoch gezeigt, dass bereits bei geringen Sulfatkonzentrationen als 1.500 mg/l Thaumasil gebildet werden kann. Darüber hinaus ist zur Zeit noch nicht geklärt, ob sehr hohe Sulfatkonzentrationen (5-11 mal so hoch wie bei einer tatsächlichen Exposition) lediglich einen zeitraffenden Effekt oder zusätzlich eine Verschiebung der Schadmechanismen mit sich bringen (Stark & Wicht 2013).

Auf der Basis der vorliegenden Grundwasseranalysen, der Wasserlöslichkeit der Salze sowie der ablaufenden Reaktionen wurden für die Untersuchungen der Sulfatbeständigkeit zunächst drei verschiedene sulfathaltige Wassertypen festgelegt (Tabelle 3-17). Die Versuchswässer werden wegen der Reproduzierbarkeit künstlich im Labor hergestellt. In der unten aufgestellten Tabelle 3-17 wurden die Anionen festgelegt und die Kationen entsprechend der Salze ausgerechnet. Mit diesen festgelegten Werten werden 99% der in den vorhandenen GW-Messstellen gemessenen Sulfatgehalte abgedeckt (inkl. der Messwerte in Stufen).

Tabelle 3-17: Sulfathaltige Wassertypen für die Durchströmungs- und Auslagerungsversuche

Ionen	Typ S1 (Na/K) [g/l]	Typ S2 (Na/K/Mg/Ca) [g/l]	Typ S3 (Mg/Ca) [g/l]
SO ₄ ²⁻	1,500	1,500	1,500
CO ₃ ²⁻	0,300	0,038	Nicht möglich
HCO ₃ ⁻	0,150	0,263	0,000
Cl ⁻	0,050	0,050	0,050
Na ⁺	0,750	0,115	0,000
K ⁺	0,391	0,049	0,000
Mg ²⁺	0,000	0,190	0,380
Ca ²⁺	0,000	0,327	0,028

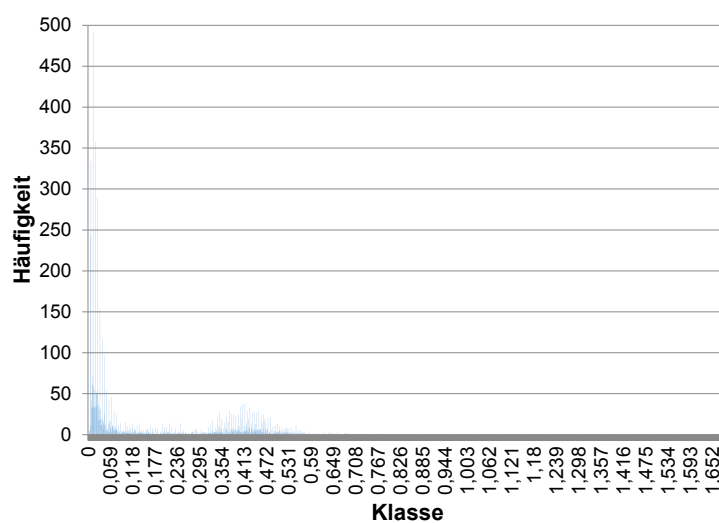
Bei den in Tabelle 3-17 aufgeführten Wassertypen handelt es sich nach DIN 4030-1 um „mäßig angreifende“ Wässer, da wie oben schon erwähnt, stärker angreifende Wässer gemäß Messstellennetz der LUBW in Baden-Württemberg nur sehr selten vorkommen. Die Auswahl der drei unterschiedlichen Wässer in Tabelle 3-17 wurde zudem so ausgewählt, dass eine möglichst große Bandbreite von unterschiedlichen Reaktionen in den Hinterfüllmassen detektiert werden kann. In den meisten handelsüblichen Hinterfüllmassen können vor allem die Zement- und Tonmineralanteile als reaktiv eingestuft werden. Die Zementanteile, die je nach Hinterfüllmasse unterschiedlich in Menge und Art sein können, bedingen hohe pH-Werte in den Hinterfüllmassen. Hohe pH-Werte

von 10 (bzw. 8) können beispielsweise bei der Durchströmung Ausfällungen von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und $\text{Mg}(\text{OH})_2$ verursachen. Ein solches Szenario kann erwartet werden, wenn Leitungswasser (Referenz) zur Durchströmung der Hinterfüllmassen verwendet wird. Mit der Zugabe von Kohlensäure und anderen Säuren kann der pH-Wert der Reaktionsflüssigkeit reduziert werden (Typ S1 und S2) und somit Einfluss auf das Löslichkeits- und Ausfällungsverhalten wichtiger Mineralphasen genommen werden. Die Tonanteile in den Hinterfüllmassen können sich zudem sensitiv gegenüber dem Einfluss von Erdalkalien verhalten. So kann es z.B. zu einem Kaliumeinbau in den bitrigonalen Lücken der Tonminerale und einer damit verbundenen Volumenreduktion kommen. Hinzu kommt, dass bei höherer Konzentration der einzelnen Salze Probleme bezüglich der Löslichkeit auftreten (so würde bei Wasser des Typs 3 z. B. eine Zugabe von Hydrogencarbonat Ausfällungen von festen Kalkphasen verursachen). Einzelne ablaufende Reaktionen können dann nicht mehr unterschieden werden (Lösungen/Fällungen/K-Einbau, usw.).

Zur Festlegung der Wässer zur Untersuchung des Säureangriffs wurde ebenfalls auf den Jahreskatalog Grundwasser der LUBW zurückgegriffen. Die für diese Arbeit wichtigen Informationen wie der pH-Wert, der Sulfatgehalt, die Säurekapazitäten sowie der Natrium-, Kalium-, Magnesium- und Calciumgehalt, wurden eingehend betrachtet. Da für diese Arbeit nur die sauren Grundwässer von Bedeutung waren, wurden aus der erstellten Auflistung in einem ersten Schritt alle Messungen mit den dazugehörigen Messstellen herausgesucht, die einen pH-Wert von $\text{pH} < 7$ aufweisen. Diese Auswahl ergab für Baden-Württemberg an 1.123 Messstellen insgesamt 13.475 Messungen mit einem pH-Wert von $4,25 \leq \text{pH} \leq 6,99$. In einem zweiten Schritt wurden diese Messungen auf ihre HCO_3^- -Konzentration hin betrachtet. Hierzu wurde an 846 Messstellen bei 5.920 Grundwassermessungen aus der gegebenen Säurekapazität nach Hölting & Coldewey (2013), die HCO_3^- -Konzentration berechnet. Für diese Messungen ließ sich mit Hilfe eines Histogramms die Häufigkeitsverteilung der HCO_3^- -Konzentration darstellen (Abbildung 3-42). Daraus war ersichtlich, dass an insgesamt 298 Messstellen, bei 597 Messungen, relevante HCO_3^- -Konzentrationen im Bereich zwischen 0,3 g/l und 0,4 g/l vorliegen. Um bei den Laboruntersuchungen möglichst realitätsnahe Wasserzusammensetzungen zu verwenden, wurden aus den 597 Messungen häufig vorkommende Werte für die Ionenkonzentrationen herausgesucht. Mit diesen Annahmen und der Grundwasseranalyse wurden für die Untersuchung des Säureangriffs drei Wassertypen Typ C1-C3 festgelegt, deren chemische Zusammensetzungen in Tabelle 3-18 aufgeführt sind. Der pH-Wert der eingesetzten Wässer wurde unter Verwendung von 9%iger HCl auf 5 eingestellt. Damit liegen die verwendeten Wässer nach Tabelle 3-16 im Bereich der Expositionsklasse XA2 (DIN 4030-1, 2008).

Tabelle 3-18: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Wässer zur Untersuchung des Säureangriffs in den Umströmungsversuchen

Ionen	Typ C1 (Na/K) [g/l]	Typ C2 (Na/K/Ca/Mg) [g/l]	Typ C3 (Na/Ca) [g/l]
SO_4^{2-}	0,084	0,084	0,084
Na^+	0,04	0,139	0,139
K^+	0,391	0,391	0
Mg^{2+}	0	0,021	0
Ca^{2+}	0	0,014	0,035

Abbildung 3-41: Häufigkeitsverteilung der Hydrogencarbonat-Konzentration des Grundwassers in Baden-Württemberg mit $\text{pH} < 7$

Bei der Durchführung aller Versuche wurde als Referenzwasser Karlsruher Leitungswasser verwendet. In Tabelle 3-19 sind die physikochemischen Parameter des Leitungswassers aufgelistet. Aufgrund von Schwankungen der chemischen Zusammensetzung des Leitungswassers, wurden alle für die Versuche relevanten Parameter vor jedem Versuch separat ermittelt und in der jeweiligen Auswertung mitberücksichtigt (siehe Ergebnisse).

Tabelle 3-19: Physikochemische Parameter des Karlsruher Leitungswassers (Stadtwerke Karlsruhe 2014)

Parameter	Einheit	Messwert
pH-Wert	-	7,27
Redoxpotential	mV	217
Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	663
Natrium	mg/l	11,7
Kalium	mg/l	1,8
Magnesium	mg/l	9,4
Calcium	mg/l	110
Ammonium	mg/l	<0,01
Gesamthärte	dH	17,6
Sulfat	mg/l	49,6
Chlorid	mg/l	23,5
Hydrogencarbonat	mg/l	322
Carbonathärte	dH	14,8
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	0,65
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	5,33

3.2.3.3. Anmischen der Baustoffe

Damit die Ergebnisse aller Projektpartner vergleichbar sind, wurde zu Projektbeginn das Anmischverfahren für die Laboruntersuchungen zusammen mit den Herstellern festgelegt.

Verwendete Arbeitsmittel:

- Rührwerk IKA RE-166
- Dissolverscheibe R 1302 (\varnothing 80 mm)
- Kunststoffmessbecher 5 l (\varnothing oben 180 mm, \varnothing unten 160 mm, Höhe 270 mm)
- Waage (Ablesegenauigkeit mind. 0,1 g)
- Stoppuhr

Verfahrensbeschreibung:

Die Einwaage wurde so gewählt, dass 2,5 l Suspension fertiggestellt wurde. Zum Herstellen der Suspension wurde zuerst die gemäß Herstellerangaben vorgegebene Menge an Baustoff abgewogen sowie die entsprechende Menge an Karlsruher Leitungswasser unter normalen Laborbedingungen in den oben beschriebenen Kunststoffmessbecher gegeben. Dann wurde der Messbecher unter das IKA-Rührwerk gestellt. Dabei lag der Dissolver ca. 3 cm unterhalb der Wasseroberfläche und der Abstand betrug ca. 1 cm zur hinteren Gefäßwand (Abbildung 3-42 A). Die Drehzahl des Rührwerks wurde auf 650 U/min eingestellt, was einer Umlaufgeschwindigkeit von ~ 163 m/min am äußeren Rand des Dissolvers entspricht. Nach der richtigen Positionierung des Messbechers wurde der Hinterfüllbaustoff gleichmäßig und zügig mittels einer Laborprobenschaufel zugegeben. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass nicht zu viel Probenmenge auf einmal zugeführt wurde, um eine Klümpchenbildung zu vermeiden. Nach der Zugabe wurde der am Rand anhaftende Hinterfüllbaustoff mittels eines Schneebesens oder eines Teigschabers untergerührt und eventuell vorkommende Klümpchen dispergiert. Im Anschluss hieran wurde das Rührwerk gemäß Abbildung 3-42 B positioniert (Dissolverabstand zum Rührbecherboden und zur hinteren Rührbecherwand ca. 1 cm) und bei 650 U/min für 5 Minuten homogenisiert.

Innerhalb der 5-minütigen Rührzeit wurde der Messbecher nach jeweils 1 Minute gemäß Abbildung 3-42 B und C umgestellt, damit eine gleichmäßige Durchmischung des Hinterfüllbaustoffs gewährleistet wurde. Nachdem der Mischvorgang abgeschlossen war, wurde die Suspension sofort entsprechend der durchzuführenden Versuche weiterverarbeitet.

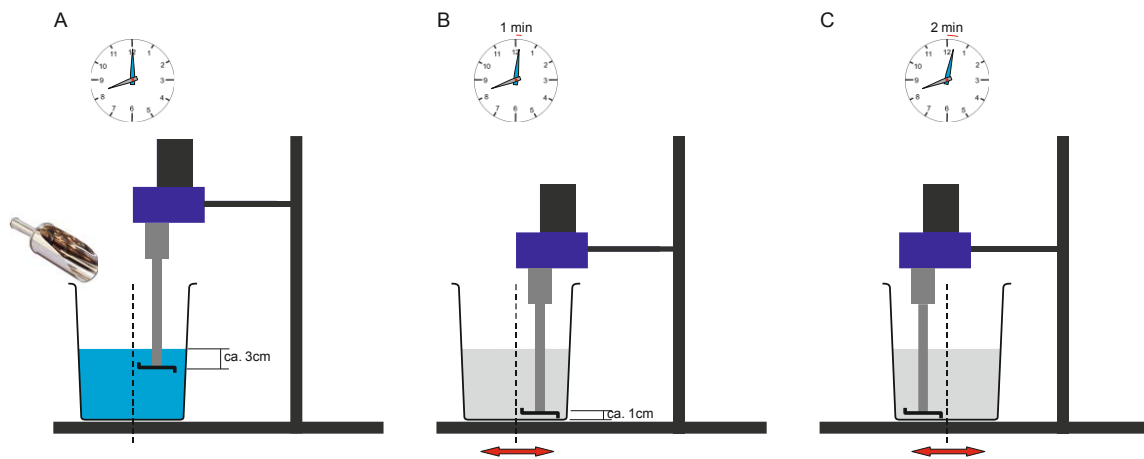


Abbildung 3-42: Positionierung des Dissolvers im Probengefäß

3.2.3.4. Probennahme und Probenlagerung

Die Probennahme erfolgte auf Grundlage der DVWK-Regel 128 (1992) stets unmittelbar im Anschluss an den Versuch. Alle Parameter, die einer schnellen Alterung unterliegen, wie zum Beispiel der pH-Wert, der Eh-Wert, sowie das Carbonat und Hydrogencarbonat usw. wurden schnellstmöglich nach der Probennahme gemessen. Die Lagerung der Proben zwischen Probennahme und Messung erfolgte im Kühlschrank. Feststoffproben, die nicht sofort analysiert werden konnten, wurden getrocknet und unter einer Stickstoffschutzatmosphäre bis zur Messung gelagert, um eine Carbonatisierung zu verhindern.

3.2.3.5. Analytik

3.2.3.5.1. Bestimmung des pH-Wertes

Die Bestimmung der pH-Werte von Wasserproben erfolgte nach DIN EN ISO 10523 (2012) mit einem Messgerät vom Typ pH197-S der Firma WTW. Als Sonde wurde eine InLab 417-pH der Firma Mettler Toledo verwendet. Der Messwert wurde nach Einstellung des Gleichgewichts abgelesen. Die Bestimmung des pH-Werts von Feststoffen erfolgte nach DIN 19682, Teil 13 (2009) mit einem Messgerät pH197-S und einer Suspensionssonde pH120 der Firma Neukum.

3.2.3.5.2. Bestimmung des Redoxpotentials (Eh-Wert)

Die Redoxspannung definiert den Redoxzustand eines Gemisches, d.h. sie beschreibt das Konzentrationsverhältnis von oxidierten zu reduzierten Stoffen in einer Lösung und bezeichnet damit die Fähigkeit Elektronen abzugeben oder aufzunehmen (Wisotzky 2011).

Die Bestimmung des Redoxpotentials (Eh-Werts) der Wasserproben erfolgte nach DIN 38404 T6 (1984) mit dem Messgerät pH197-S der Firma WTW. Als Sonde kam eine InLab 501-Redox der Firma Mettler Toledo zum Einsatz. Die Messdauer für die Redoxpotential Messung betrug 30 min. Das Redoxpotential wurde mit einer Ag/AgCl-Referenz-Elektrode gemessen. Für den Vergleich mit Werten des Standardelektrodenpotentials (Wasserstoffelektrode) gilt folgende Beziehung:

$$U_{\text{Wasserstoff}} = U_{\text{Mess}} + U_{\text{REF}} \quad (3-20)$$

Für die Ag/AgCl-Referenz-Elektrode beträgt $U_{\text{Ref}} + 210 \text{ mV}$ (bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

3.2.3.5.3. Leitfähigkeitsmessung

Die elektrische Leitfähigkeit gibt den Gehalt an dissoziierten Ionen einer Wasserprobe an. Sie ist abhängig von der Konzentration und der Ladung der Ionen sowie von deren Mobilität, die für verschiedene Ionen in Tabelle 3-20 angegeben ist (Atkins 2001; Wisotzky 2011).

Gemäß Tabelle 3-20 haben die hydratisierten H^+ - und OH^- -Ionen die höchsten Ionenbeweglichkeiten und tragen damit wesentlich zur elektrischen Leitfähigkeit wässriger Lösungen bei. Ursache dafür ist, dass nicht die einzelnen Protonen wandern, sondern dass eine Umlagerung von Bindungen in einer Kette von Wassermolekülen stattfindet, die damit den Ladungstransport bewirkt (Abbildung 3-43) (Atkins 2001).

Zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in Wasserproben wurde ein temperaturkompensiertes Konduktometer-Salinometer mit Standard-Leitfähigkeitsmeßzelle (WTW, LF197) und dazugehöriger Elektrode aus aktivierter Kunstkohle (Tetra-Con) verwendet. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit wurde nach DIN EN 27888 (1993) durchgeführt.

Tabelle 3-20: Ionenbeweglichkeit in Wasser bei 298 K (Atkins, 2001)

Ion	Mobilität u [$10^{-8} \text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{V})$]
Ca^{2+}	6,17
Cl^-	7,91
H^+	36,23
HCO_3^-	4,60
K^+	7,62
Mg^{2+}	5,50
Na^+	5,19
OH^-	20,64
SO_4^{2-}	8,29

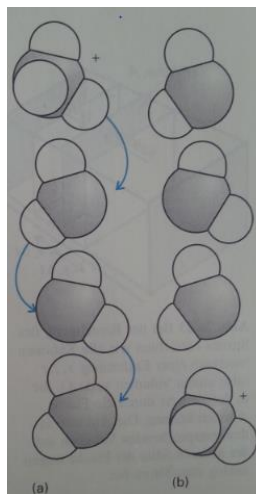


Abbildung 3-43: Der Mechanismus der elektrischen Leitfähigkeit von Hydronium- und Hydroxid-Ionen in Wasser (Atkins, 2001)

3.2.3.5.4. Photometrie

Die Anionen Chlorid und Sulfat wurden mit einem Photometer Nanocolor 500D 919500 der Firma Machery-Nagel gemessen.

Für den Chlorid-Nachweis wurde der Schnelltest Spektroquant der Firma Merck verwendet. Die Nachweisreaktion beruht auf der Bildung eines Quecksilber-Farbkomplexes. Für die Chloridmessung wurde die Wellenlänge 470 nm verwendet.

Sulfat wurde turbidimetrisch (Messung der Trübe) durch Fällung mit Bariumchlorid nach der Methode 9038 der EPA gemessen:

(<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/9038.pdf>). Die Wellenlänge betrug 435 nm.

3.2.3.5.5. Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)

Für die Analyse der Kationen wurde der Atomabsorptionsspektrometer 3030B der Firma Perkin-Elmer eingesetzt. Hierfür wurden verschiedene Methoden verwendet:

- a) Emissionsmodus: Natrium und Kalium (Zugabe von 100 µl HNO₃ und 5 ml CsCl₂ zu 100 ml Probe)
- b) Absorptionsmodus: Calcium und Magnesium (Zugabe von 100 µl HNO₃ zu 100 ml Probe)

3.2.3.5.6. Bestimmung des Carbonat- und Hydrogencarbonatgehalts

Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bestimmt maßgebend die hydrochemischen Eigenschaften von Wässern, indem es die Konzentrationen an Hydrogencarbonat, Carbonat und „kalklösender Kohlensäure“ beeinflusst (Wisotzky 2011). Mit Hilfe des Titrators TitroLine alpha plus und der Software SiTitrsoft 3.0 der Firma Si Analytics wurde der Carbonat- und Hydrogencarbonatgehalt in den Proben bestimmt.

3.2.3.5.7. Rasterelektronenmikroskopie/Energiedispersive Röntgenspektroskopie (REM/EDX)

Die REM/EDX Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Zibat (LEM/KIT) durchgeführt. Hierfür wurden die Geräte Quanta FEG 650 (REM) und Bruker Quantex 400 (EDX) verwendet. Die getrockneten Feststoff-Proben wurden für die Messung als Pulverproben aufgebracht und mit Kohlenstoff bedampft. EDX-Spektren für Objekte $<1 \mu\text{m}$ können nicht aufgenommen werden, da die Streustrahlung aus der Umgebung zu hoch ist.

3.2.3.5.8. Röntgendiffraktometrie (XRD)

Analysen mittels Röntgendiffraktometrie wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern MPA und IMB erstellt. Die Proben wurden mit einem Röntgendiffraktometer von Bruker (D8 Advance) gemessen. Die Auswertung der Röntgendiffraktogramme erfolgte mittels der Software „Diffrac Plus Evaluation“. Für die Herstellung von Pulverpräparaten wurden die zu untersuchenden Proben bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet, von Hand gemörsert und bis zur Analyse unter N_2 -Atmosphäre gelagert (Ettringit ist bis $75 \text{ }^\circ\text{C}$ stabil, bei höheren Temperaturen bildet sich Monosulfat; unter Einfluss von atmosphärischem CO_2 zersetzt sich Ettringit zu Monocarbonat (Carbonatisierung) und Portlandit (Bollmann 2000)).

3.2.3.5.9. Bestimmung des Carbonatgehalts

Die Bestimmung des Carbonatgehalts erfolgte gasvolumetrisch mit Hilfe eines Scheibler-Gasometers nach DIN 18129 (2011). Im Hinblick auf die höheren Gehalte an Calcium- und Magnesiumhydroxiden, wie sie in den untersuchten Proben auftreten, muss aufgrund der Wärmeentwicklung im Verlauf der ablaufenden exothermen Reaktion der Hydroxide mit der verdünnten Salzsäure besonderes Augenmerk gelegt werden. Da keine Temperaturmessung innerhalb des Reaktionsgefäßes möglich war, wurden alle Proben solange beobachtet, bis sich die Temperatur im Reaktionsgefäß an die Raumtemperatur angeglichen hat. Ferner mussten alle Proben unmittelbar nach der Probennahme gemessen werden, da sonst die Hydroxide mit dem Kohlenstoffdioxid der Luft entsprechend folgender Gleichung reagiert (Riedel 1990),



und damit einen zu hohen Carbonatgehalt vorgetäuscht hätten.

3.2.3.5.10. Quecksilberporosimetrie

Zementstein besitzt kein absolut dichtes Gefüge, sondern eine Vielzahl unterschiedlich großer Poren. Die Porenverteilung und v.a. die Porengröße im Zementstein sind entscheidend für seine Dauerhaftigkeit und Festigkeit (Stark & Wicht 2013). Die Abbildung 3-44 zeigt allgemein den im Zementstein vertretenen Porengrößenbereich.

Die größten Poren, die sogenannten Verdichtungsporen (ca. 10^{-4} m bis mehrere Millimeter), entstehen beim Anmischen des Zementes. Die Kapillarporen (10^{-8} m bis 10^{-5} m) entstehen durch überschüssiges Wasser, welches bei der Hydratation nicht gebunden wird, weshalb deren Bildung vom Hydratationsgrad und dem W/F-Wert abhängig ist. Sie stellen denjenigen Porenbereich

dar, der maßgeblich für den Transportmechanismus in den Zementstein hinein bzw. aus ihm heraus verantwortlich ist. Die kleinsten Poren werden als Gelporen ($<10^{-7}$ m) bezeichnet (Verein Deutscher Zementwerke 2002). In dem Porensystem des Zementsteins können Transportvorgänge durch Diffusion, kapillares Saugen oder laminare Strömung stattfinden und so den Angriff auf den Zementstein verstärken (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Daher ist es für die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit des Betons entscheidend, den Porenanteil, und hier besonders den Anteil der Kapillarporen, möglichst gering zu halten, um das Eindringen von betonschädigenden Fremdstoffen wie CO_2 -haltigen Wässern zu vermeiden. Nach Busch & Luckner (1973) ist die hydraulische Leitfähigkeit durch Poren, die kleiner als $3\text{-}8\ \mu\text{m}$ sind, begrenzt.

Die Quecksilberporosimetrie ist eine etablierte, bequeme und schnelle Methode, um die Porengröße und die Porengrößenverteilung von trockenen Proben vor allem im Makro- ($<1\ \text{mm}$) und Mesoporenbereich ($<30\ \text{nm}$) zu ermitteln. Der Vorteil dieser Methode im Vergleich zur Gasadsorption (Haus 1993) ist die relativ unkomplizierte und schnelle Durchführung der Messung über ein weites Porenspektrum.

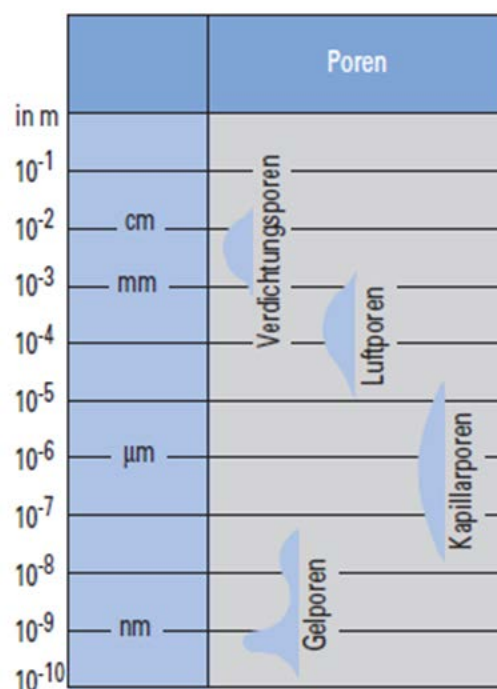


Abbildung 3-44: Größe der Zementsteinporen (aus Verein Deutscher Zementwerke 2002)

Das Grundprinzip der Quecksilberporosimetrie beruht auf der Tatsache, dass der Druck, der nötig ist, um Quecksilber in eine runde Pore hineinzupressen, proportional zu deren Porendurchmesser ist. Bei der Porosimetriemessung wird daher der Druck stufenweise erhöht, und das Quecksilbervolumen ermittelt, das bei der jeweiligen Druckstufe in die Probe gepresst wird. Anhand des Quecksilbervolumens der einzelnen Druckstufen lässt sich mit Hilfe mathematischer Berechnungen die Porengrößenverteilung, die Porenflächenverteilung und das Porenvolumen bestimmen

(Krauss 2000). Eine ausführliche Beschreibung der Grundlagen sowie die Diskussion über limitierende Faktoren der Methode finden sich in Dullien (1992), Haus (1993) und Webb & Orr (1997). Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberintrusion ist in der DIN 66133 (1993) festgelegt.

Da die Proben zur Messung wasserfrei sein müssen und bei der Trocknung keine Gefügeveränderung erfahren dürfen (HAUS 1993), gilt es bei der Probenvorbereitung größte Sorgfalt einzuhalten. Hierzu wurden die Proben in Würfel mit einer Kantenlänge von ca. 5 mm unterteilt und gefriergetrocknet. Die Messungen der so vorbereiteten Proben wurden mit einem Quecksilberporosimeter vom Typ Autopore III Analyzer der Firma Micromeritics Instruments Corporation durchgeführt, mit dem sich Porendurchmesser zwischen 360 μm und 3 nm bestimmen lassen.

3.2.3.5.11. Wärmeleitfähigkeitsmessung

Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Isomet 2104 der Firma Applied Precision bestimmt, das sich des Prinzips des instationären Messverfahrens bedient. Hierbei wird der Messkörper durch eine Linienquelle erhitzt und die Temperaturänderung in unmittelbarer Nähe der Heizquelle in Abhängigkeit der Zeit aufgezeichnet. Bei sehr geringem Abstand zwischen Wärmequelle und Ort der Temperaturmessung sowie größeren Zeitintervallen gilt:

$$\Delta T = \frac{\Phi}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (3-22)$$

wobei λ die Wärmeleitfähigkeit $\lambda = [\text{W}/(\text{mK})]$, ΔT der Temperaturunterschied $\Delta T = [\text{K}]$ zwischen den Zeiten t_1 und t_2 sowie Φ die Heizleistung pro Längeneinheit $\Phi = [\text{W}/\text{m}]$ ist.

Aus der Steigung der Geraden von Temperatur gegen den natürlichen Logarithmus der Zeit kann die Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden (Parrott & Stuckes 1975).

Die Messungen wurden an festen Probenkörpern mit Hilfe von Oberflächensonden durchgeführt. Zur Messung mit der Oberflächensonde waren Probenkörper von mindestens 15 mm Höhe und 60 mm Durchmesser erforderlich, damit die Messung nicht durch Randeﬀekte beeinflusst wurde. Des Weiteren war es wichtig, eine ebene Fläche von ausreichender Größe zu erhalten, auf der die Messsonde vollständig auﬂag, um die Wärmeübertragung zwischen Sonde und Probenmaterial nicht durch Hohlräume zu behindern. Um diese Bedingungen zu gewährleisten, wurden Probenkörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von ca. 70-100 mm hergestellt. Hierzu wurde ein Plexiglasrohr mittels Gewindestangen auf eine glatte PVC-Platte montiert und mit Dichtungskitt abgedichtet. Die PVC-Platte gewährleistet einen Probenkörper mit vollkommen glatter Oberfläche, auf der die Messsonde vollständig plan auﬂiegt. Die verwendeten Hinterfüllmaterialien wurden gemäß der Herstellerangaben und der Mischvorschrift nach Kapitel 3.2.3.3 angemischt und in die Plexiglasrohre vorsichtig überführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass zum einen keine Luftblasen im Probekörper eingeschlossen wurden und zum anderen der Probekörper keinen Erschütterungen ausgesetzt wurde, um Sedimentationseﬀekte zu verhindern. Die Proben wurden bis zur eigentlichen Messung unter 100 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Alle Wärmeleitfähigkeitsmessungen erfolgten bei einer Raumtemperatur von ca. 21 °C.

3.2.3.5.12. Nadelpenetrometer

Beim Nadelpenetrometer-Test wird die Eindringtiefe der Nadel bzw. der Eindringwiderstand des Prüfkörpers gemessen. Dabei dringt eine Nadel senkrecht in den Probekörper ein, wofür das Nadelpenetrometer entsprechend auf das Probenmaterial aufgesetzt werden muss. Bei der Versuchsdurchführung wird die Kraft so lange auf den Probekörper aufgebracht, bis entweder die Nadel eine Eindringtiefe von 10 mm oder die Penetrationskraft 100 N erreicht. Ein Vorteil bei der Verwendung des Nadelpenetrometers liegt in der relativ einfachen Handhabung und der schnellen und direkten Anwendbarkeit auch im Gelände.

Das in Abbildung 3-45 dargestellte Nadelpenetrometer besteht aus einer Schutzhaube (1) und einem Spannfutter (2), welches die Penetrationsnadel (8) fixiert. Mit Hilfe der Skala (3) kann die Eindringtiefe der Nadel, die zwischen 1 mm und 10 mm liegen kann, in 1 mm Schritten abgelesen werden. Mit Hilfe eines Ringes (5) wird die aufgewendete Kraft auf der Kraftskala (4) (von 0 N bis 100 N in Schritten von je 10 N) abgelesen.

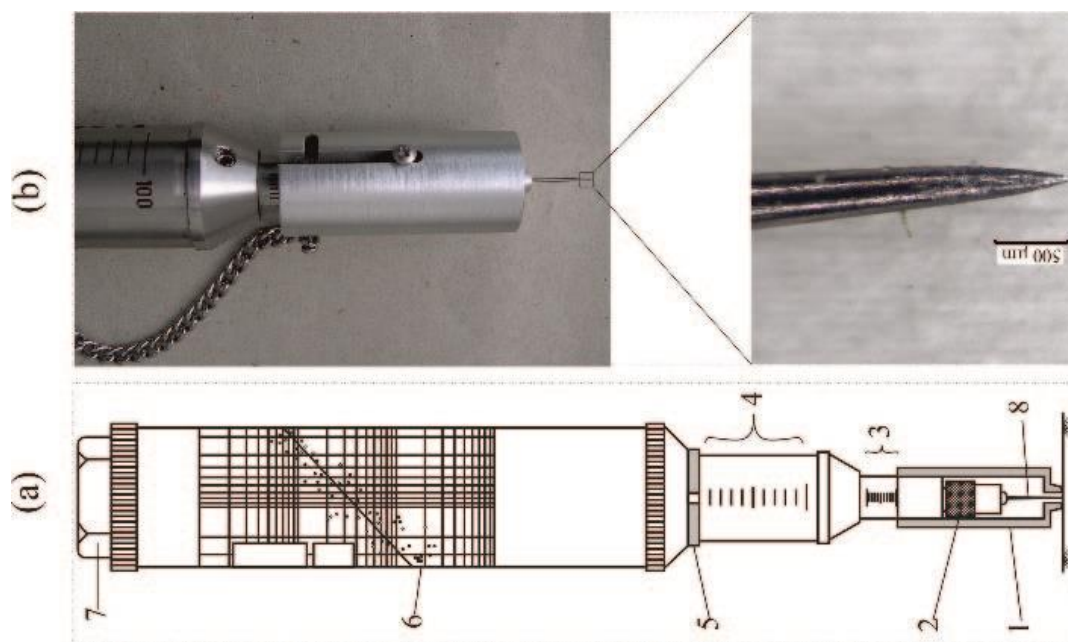


Abbildung 3-45: Nadelpenetrometer Typ S-H-70 mit 1 Schutzhaube, 2 Spannfutter, 3 Penetrationsskala, 4 Kraftskala, 5 Ableser, 7 Abdeckung, 8 Penetrometernadel (nach Ulusay et al. 2013)

Der Nadeleindringwiderstand NPR [N/mm] ergibt sich nach Ulusay & Erguler (2012) aus dem Verhältnis der gemessenen Werte für die Penetrationskraft F [N] und die Eindringtiefe D [mm] wie folgt:

$$NPR = F/D$$

(3-23)

3.2.3.5.13. Biegezug- und Druckfestigkeit

Die Biegezug- und Druckfestigkeit wurde in Anlehnung an die DIN EN 1015-11 (2007) an Prismen mit den Maßen 160 mm x 40 mm x 40 mm von der Materialprüfanstalt Karlsruhe (MPA Karlsruhe) mit dem Messgerät TC4 von Toni Technik durchgeführt. Die Druckstufen wurden hierbei an den Baustoff angepasst (Siehe Kapitel 3.1.4.2.12).

3.2.3.5.14. Längenänderung

In Abbildung 3-46 sind die Messpositionen zur Längenmessung (z. B. zw. A-A', B-B', usw.) der Versuchsprismen skizziert. Die Messung erfolgte mit dem Digitalen Messschieber Digital Caliper 0-200 mm von Horex.

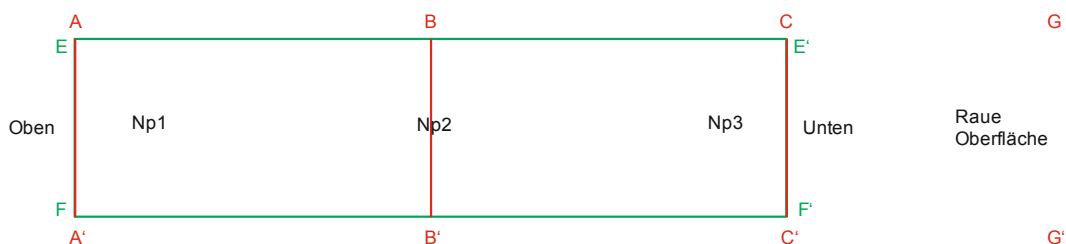


Abbildung 3-46: Skizze der Messstrecken zur Längenmessung der Versuchsprismen (NpX bezeichnet die jeweilige Messpositionen für die Nadelpenetrometermessungen)

3.2.3.6. Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts

Die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit des Probekörpers wurde nach DIN 18130 Teil 1 (1998) durchgeführt.

Bei dem angewendeten Messverfahren handelt es sich um ein Messverfahren mit instationärer Belastung in der Triaxialmesszelle gemäß DIN 18 130, Kap. 7.3, bei dem das hydraulische Gefälle während des Versuches variiert. Die Auswertung erfolgt nach DIN 18 130/T1:

$$k_f = \frac{a \cdot l_0}{A \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3-24)$$

Hierbei ist k_f [m/s] der Durchlässigkeitsbeiwert, a [m²] die Querschnittsfläche des Standrohres, l_0 [m] die Höhe des Probekörpers (durchströmte Länge), A [m²] die Querschnittsfläche des Probekörpers, T [s] die Messzeitspanne, h_1 [m] die Wasserhöhe im Standrohr bei Versuchsbeginn, h_2 [m] die Wasserhöhe im Standrohr bei Versuchsende, wobei h_1 und h_2 auf den Unterwasserspiegel bezogen sind.

Da die Zähigkeit des Wassers von der Temperatur abhängig ist, werden bei gleichem Gefälle die Fließgeschwindigkeit und damit der k_f -Wert von der Temperatur des Wassers beeinflusst. Deswegen werden die aus dem Versuch ermittelten k_f -Werte auf eine Vergleichstemperatur von 10°C (entspricht etwa der durchschnittlichen Grundwassertemperatur) entsprechend umgerechnet (DIN 18 130/T1):

$$k_{f10} = \frac{1,359}{1 \pm 0,0337 \cdot T \pm 0,0022 \cdot T^2} k_{fT} = \alpha \cdot k_{fT} \quad (3-25)$$

Mit k_{f10} [m/s] als den Durchlässigkeitsbeiwert bei 10°C Fluidtemperatur, T [°C] der Wassertemperatur während des Versuches, α [-] als Korrekturbeiwert und k_{fT} [m/s] als den Durchlässigkeitsbeiwert bei der Fluidtemperatur T (siehe Tabelle 3-21).

Tabelle 3-21: Ergebnisse der Durchlässigkeitsmessung normiert auf 10°C Fluidtemperatur

Temperatur [°C]	5	10	15	20	25
α	1,158	1,000	0,874	0,771	0,686

Allgemein ist darauf hinzuweisen, dass bei sehr schwach durchlässigen Proben ein hoher hydraulischer Gradient gewählt werden muss, damit eine Wasserbewegung initiiert wird: Hierbei ist darauf zu achten, dass die Strömung im linearen Bereich liegt. Im Falle der Proben wurden hydraulische Gradienten von $I = 1,6-72,5$ eingestellt. Aufgrund der Zusammensetzung der Proben (Zementgehalt) sollte es bei diesem hydraulischen Gradienten weder zu Veränderungen des Korngefüges (Suffusion, usw.) noch zu einer durchströmungsbedingten Konsolidierung oder Schwellung der Probe kommen. Trotz der z. T. sehr geringen Durchflussraten in den Versuchen mit Hinterfüllbaustoffen kann davon ausgegangen werden, dass eine lineare Durchströmung des Probekörpers stattgefunden hat und somit die Gültigkeit des Fließgesetzes von Darcy gegeben war.

Zur Bestimmung der Durchlässigkeit wurden Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von ca. 70-100 mm hergestellt. Hierzu wurde ein Plexiglasrohr mittels Gewindestangen auf eine glatte PVC-Platte montiert und mit Dichtungskitt abgedichtet. Die PVC-Platte gewährleistet eine vollkommen glatte Oberfläche. Die verwendeten Hinterfüllmaterialien wurden gemäß der Herstellerangaben und der Mischvorschrift aus Kapitel 3.2.3.3 angemischt und in die Plexiglasrohre vorsichtig überführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass zum einen keine Luftblasen im Probekörper eingeschlossen wurden und zum anderen der Probekörper keinen Erschütterungen ausgesetzt wurde, um Sedimentationseffekte zu verhindern. Die Proben wurden bis zur eigentlichen Messung 28 Tage unter 100 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach der Aushärtung wurden die zylindrischen Probekörper in die Triaxialmesszelle (DIN 18 130, Kap. 7.3) eingebaut. Als Suffusionsschutz und zur gleichmäßigen Durchströmung des Probekörpers wurde an beiden Seiten je eine Filterplatte aus Borosilikat angebracht. Zur Abdichtung der Filterplatten und des Probekörpers wurde beides von einem Latexstrumpf ummantelt und in die Messapparatur eingebaut. Um möglichen Umläufigkeiten vorzubeugen, wurde der Umlagerungsdruck (Außendruck) ca. 100 % höher als die Standrohrspiegelhöhe (Innendruck) eingestellt. Die Messungen erfolgten bei Raumtemperatur.

3.2.3.7. Systemdurchlässigkeitsversuch

Ein Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Systemdurchlässigkeit in Anlehnung an die DIN 18130 T1, damit ein einfacher Versuchsaufbau zur Verfügung steht, der von jedem Ingenieurbüro und Hersteller von Baustoffen durchgeführt werden kann. Hierbei ging es primär nicht darum, das System unter Betriebsbedingungen zu testen, bei denen die Sondenrohre mit unterschiedlichen Temperaturlasten beansprucht werden, wie dies in

den Frost-Tau-Untersuchungen von Anbergen et al. (2011), Anbergen et al. (2014) sowie vom ZAE Bayern (2012) durchgeführt wurden. Die Intension lag vielmehr darin, einen Versuchsaufbau zu entwickeln, in dem geklärt werden kann, ob sich die Hinterfüllbaustoffe aufgrund ihrer Eigenschaften prinzipiell eignen ein ausreichend dichtes System aus Erdwärmesonde, Hinterfüllung und anstehendem Gestein zu generieren. Dadurch kann die Qualität des Baustoffs in Verbindung mit Anlagenteilen (nicht des Hinterfüllvorgangs und der Anlage im Betrieb) mit einem quantitativen Wert belegt werden.

Da der Versuch in der Versuchseinrichtung eines Standardtriaxialversuchs gemäß DIN 18130-T1 durchgeführt werden sollte, war das Ziel innerhalb des Forschungsvorhabens einen geeigneten Probenkörper herzustellen, der das System Erdwärmesonde/Hinterfüllung/Gestein abdeckt. Hierdurch waren die Randbedingungen einer zylindrischen Probe mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von ca. 100 mm gegeben, in die 4 PE100 Rohre einzubringen waren. Um den Probekörper gießen zu können, musste ein geeignetes Rohr mit einem Außendurchmesser von 100 mm gefunden werden. Hierzu wurde auf Verbindungsmuffen für PVC-Lüftungsrohre zurückgegriffen, die exakt die geforderten Maße aufweisen. Um den Übergang Gestein/Hinterfüllung zu simulieren, wurden die Verbindungsmuffen mit einem dünnen Film aus Epoxydharz (Epoxydharz L + Härter GL1 von R&G Faserverbundwerkstoffe) versehen und das Rohr mit Dorsilit Quarzsand 0,1-0,8 mm von Dorfner vollständig befüllt. Nachdem das Epoxydharz ausgehärtet war, wurde der Sand aus der Verbindungsmuffe entfernt, sodass lediglich die Innenwand der Muffe mit einer dünnen Schicht aus Sand versehen war, die die Bohrlochwand und damit den Übergang Gestein/Hinterfüllung simuliert. Da der Probekörper einen geringeren Durchmesser als eine herkömmliche Erdwärmesonde aufweist, wurden als Sondenrohre PE 100-Rohre mit einem Außendurchmesser von 25 mm verwendet, um etwa das gleiche Flächenverhältnis Sondenrohre/Hinterfüllung wie in den meisten realisierten Erdwärmesonden zu bekommen. Um die PE 100-Rohre abzudichten, wurden diese ebenfalls mit Epoxydharz verfüllt. Dies musste vor dem Herstellen der Probekörper erfolgen, da der Aushärteprozess des Harzes eine stark exotherme Reaktion ist und dabei Temperaturen von bis zu 80 °C entstehen können. Würden die Rohre erst im fertigen Probekörper mit Epoxydharz befüllt, dann würden sich um die Sondenrohre radiale Risse bilden, die die Durchlässigkeit um mehrere 10er Potenzen erhöhen. Daher wurden die Sondenrohre vor Einbau in die Versuchsform mit Aqua-Fermit Insallationskitt abgedichtet und mit Epoxydharz gefüllt. Die Sondenrohre wurden aufgrund der Wärmeentwicklung auch nicht auf einmal mit dem Harz befüllt, damit sich der Werkstoff temperaturbedingt nicht verändert. Um aus den beschriebenen Einzelkomponenten einen geeigneten Probekörper herstellen zu können, wurde eine Versuchsform entwickelt und hergestellt. Eine schematische Skizze sowie ein Foto hiervon sind in Abbildung 3-47 aufgezeigt. Eine technische Zeichnung zeigt Anhang 1.

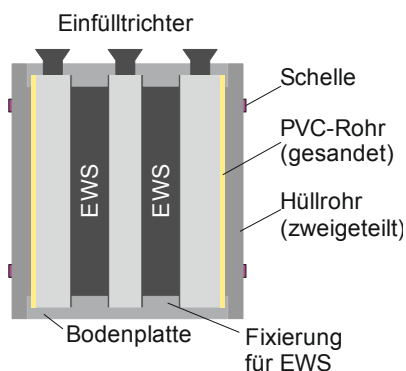


Abbildung 3-47: Schematische Skizze und Foto der Versuchsform zur Probenherstellung von Systemdurchlässigkeitsproben

Zur Herstellung der Probenkörper wurden die verwendeten Hinterfüllmaterialien gemäß der Herstellerangaben und der Mischvorschrift aus Kapitel 3.2.3.3 angemischt und vorsichtig in die Versuchsform überführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass zum einen keine Luftblasen im Probekörper eingeschlossen wurden und zum anderen der Probekörper keinen Erschütterungen ausgesetzt wurde, um Sedimentationseffekte zu verhindern. Die Proben wurden bis zur eigentlichen Messung 28 Tage unter 100 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach der Aushärtung wurde die Versuchsform sehr vorsichtig geöffnet und der Probekörper ausgebaut. Hierbei musste ein besonderes Augenmerk auf die Sondenrohre gelegt werden, damit beim Lösen aus der Form an dieser nicht zu sehr gezogen wurde. Bei den ersten Versuchen hatte sich gezeigt, dass beim Ausbau zu stark an den Sondenrohren gerüttelt worden war, so dass nicht sichtbare Mikrorisse entlang der Sondenrohre entstanden sind, die zu einer zu hohen Systemdurchlässigkeit führten. Durch sehr vorsichtiges Lösen der Sondenrohre konnten dann aber geeignete Probenkörper produziert werden. Die ausgebauten zylindrischen Probekörper wurden in die herkömmlichen Triaxialmesszellen (DIN 18 130, Kap. 7.3) eingebaut (Abbildung 3-48).

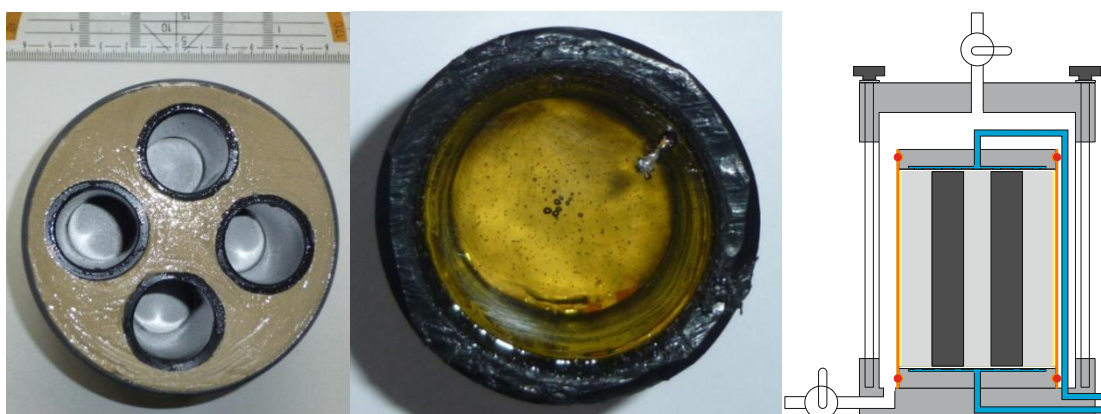


Abbildung 3-48: Probekörper (links), mit Epoxydharz gefülltes Sondenrohr (Mitte), Triaxialzelle mit Probekörper (rechts)

3.2.3.8. Batchversuche

Mit Hilfe von Batchversuchen wurden Wechselwirkungen zwischen ausgewählten Hinterfüllmassen für Erdwärmesonden und sulfathaltigen Lösungen untersucht (Abbildung 3-49). Da für einen möglichen **Sulfatangriff** u. U. eine sehr lange Versuchsdauer nötig wäre, wurden die Proben gemahlen, um eine größere Probenoberfläche und somit höhere Reaktivität zu erhalten. Mögliche Reaktionen können somit beschleunigt werden. Batchversuche sind Kleinmaßstabsversuche, die zur Simulation eines *worst case scenario* dienen. Die Versuche wurden in Anlehnung an DIN 38 414-T4 durchgeführt.

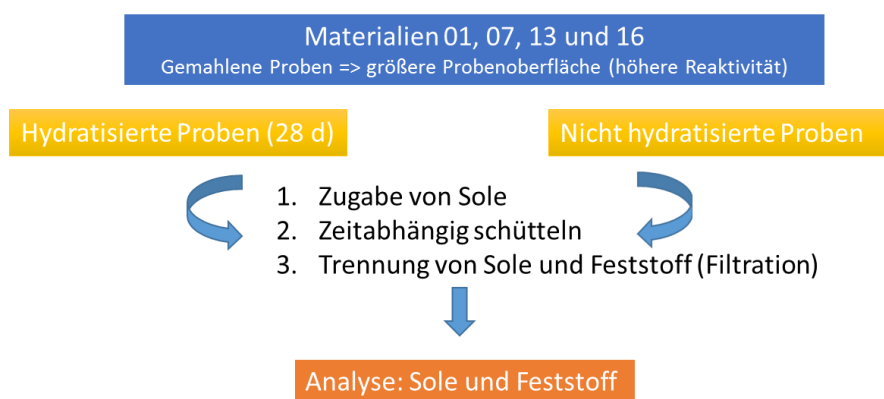


Abbildung 3-49: Prinzip der Batchversuche im Rahmen des EWS-tech Projektes

Untersucht wurden a) nicht hydratisierte Proben und b) hydratisierte Proben. Für die Erstellung der hydratisierten Proben wurden die Zemente 01, 07, 13 und 16 unter Leitungswasser-Atmosphäre 28 d ausgehärtet, getrocknet, mit dem Backenbrecher zerkleinert und für 5 min in der Achatmühle gemahlen und wie die nicht hydratisierten Proben bei 60 °C im Ofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die auf diese Weise vorbereiteten Probenmaterialien wurden in PET-Probenbehälter mit den entsprechenden Wässern eingefüllt und in einem Überkopf-Schüttler (Fa. Heidolph) über den gewünschten Zeitraum bei maximaler Geschwindigkeit geschüttelt. Blindproben mit der entsprechenden Reaktionsflüssigkeit wurden mitgeschüttelt. Eine Übersicht über die Versuchsbedingungen und Untersuchungsmethoden gibt Tabelle 3-22.

Jeweils zu Versuchsbeginn und –ende wurden die elektrochemischen Parameter der Suspension gemessen. Nach Versuchsende wurde die Reaktionslösung zunächst über einen Faltenfilter und anschließend mit einem 0,45 µm Spritzenfilter filtriert und auf Anionen und Kationen analysiert (vgl. Tabelle 3-22). Die Proben wurden erst unmittelbar vor der Analyse angesäuert, da es durch die Aufbewahrung angesäuerter Proben von Material 13 zur Ausfällung von elementarem Schwefel kam (Nachweis mittels wellenlängendisperiver Röntgenfluoreszenzanalyse, H. Kramar, Inst. f. Mineralogie und Geochemie/KIT). Der abfiltrierte Feststoff wurde für rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen bei 60 °C im Ofen getrocknet und unter Stickstoffatmosphäre bis zur Analyse aufbewahrt.

Tabelle 3-22: Batchversuche: Versuchsparameter und Untersuchungsmethoden

VERSUCHSPARAMETER	
Feststoff-Einwaage [g]	40
Flüssigkeitsmenge [ml]	400
Art der Reaktionslösung	Wasser Typ S1, S2, S3, Leitungswasser Karlsruhe
Reaktionszeit [d]	Jeweils 1, 2, 5, 10, 14, 28 und 56
Temperatur	Raumtemperatur
ANALYTIK	
Reaktionslösung	
pH, Redoxpotential, el. Leitfähigkeit	
Anionen: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Photometrie
Kationen: Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)
Feststoff	
	Rasterelektronenmikroskopie (REM)
	Energiedisperisve Röntgenspektroskopie (EDX)
	Röntgendiffraktometrie (XRD)

3.2.3.9. Umströmungsversuche

Da aufgrund der geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Hinterfüllmaterialien die Durchströmungsversuche nur bedingt geeignet sind den Angriff von betonaggressiven Wässern zu untersuchen, wurden die Hinterfüllmaterialien auch in Umströmungsversuchen untersucht. Hierzu gibt es zurzeit keine gültige Norm. In einer Literaturstudie wurden Versuchsaufbauten aus dem Bereich der Betontechnik sowie deren Versuchsbedingungen recherchiert, um Rahmenparameter zu erarbeiten, die die Grundlage für die Planung einer Versuchsanordnung liefern, die soweit wie möglich die Anforderungen für den sicheren und nachhaltigen Betrieb von Erdwärmesondenanlagen in betonaggressiven Wässern abdeckt.

Im DIN-Fachbericht CEN/TR 15697 werden die Verfahren zur Prüfung von Zementmörteln zusammengefasst, diskutiert und bewertet. Hierbei handelt es sich um die bereits genormten Verfahren ASTM C 1012, GOST 4798, Ringversuche der WG12/TG1, die den Status eines Norm-Entwurfs erreicht haben, sowie die hauptsächlich in Deutschland angewendeten Wittekindt-Verfahren, SVA-Verfahren und das Koch & Steinegger-Verfahren. In der Betontechnologie sind die Untersuchungen zum Sulfatangriff an Flachmörtelprismen mit einem W/Z-Wert von 0,6 nach dem Wittekindt-Verfahren bzw. bei einem W/Z-Wert von 0,5 nach dem SVA-Verfahren bei einer hochkonzentrierten Sulfatlösung (aus Natriumsulfat) von 29.800 mg/l und Temperaturbedingungen von 20 °C etabliert. In diesen Untersuchungen wird die Dehnung der Probe beim Wittekindt-Verfahren nach 56 Tagen und beim SVA-Verfahren nach 91 Tagen gemessen. Liegt dabei die Dehnung unterhalb des Bewertungsgrenzwerts von 0,5 mm/m, erfüllt der geprüfte Zement die Voraussetzungen eines hohen Sulfatwiderstands (HS-Zement) (DAfStb 2003). Nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15697 sind diese Methoden jedoch nur sehr bedingt geeignet.

Der Einfluss von niedrigen Temperaturen auf den Sulfatwiderstand von unterschiedlich zusammengesetzten Betonen, sowie welche Ursachen und Mechanismen zu einer schädigenden Thaumassitbildung führen, wurde von Lipus & Puntke (2004) untersucht. Die Versuche in dieser Studie wurden in Anlehnung an das Wittekindt-Verfahren durchgeführt. Santhanam et al. (2002, 2003) untersuchten in Auslagerungsversuchen den Einfluss von Natriumsulfat und Magnesiumsulfat auf unterschiedliche Portlandzementmörtel bei Temperaturen zwischen 4,4 °C und 37,8 °C und konnten hierbei eine zweistufige Expansion des Mörtels in der Natriumlösung sowie deren Mechanismen aufzeigen.

Ein Versuchsaufbau mit rotierenden Probekörpern, Bürsten und automatischer pH-Wertkontrolle für Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand wurde von Lohaus & Petersen (2007) entwickelt. Auslagerungsversuche mit automatischer pH-Wert-gesteuerter Titration unter Verwendung der anorganischen Säuren HCl bzw. H₂SO₄ wurden von Gutberlet et al. (2015) sowie mit Essigsäure und Schwefelsäure von Koenig & Dehn (2015) durchgeführt. Eine Übersicht über verschiedene Prüfmethode ist ebenfalls in Koenig & Dehn (2015) aufgelistet.

Auslagerungsversuche für Hinterfüllmaterialien von Erdwärmesonden gibt es derzeit noch nicht. Daher wurde im Forschungsprojekt ein Versuchsaufbau entwickelt, der den speziellen Rahmenbedingungen bei unterschiedlichen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten gerecht wird. Für die Festlegung der Probekörper war das Untersuchungskonzept entscheidend. Die Probekörper sollten neben einer großen Angriffsfläche leicht messbar und wägbare sein. Darüber hinaus sollten sie so beschaffen sein, dass sie für eine Reihe von weiteren Untersuchungen, wie z.B. der Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 1015-11, Quecksilberporosimetrie usw. geeignet waren. Aufgrund dieser Bedingungen wurde die Versuchsanlage für 12 Prismen mit den Maßen 160 mm x 40 mm x 40 mm ausgelegt. Die 12 Probekörper sollten gleichmäßig von den Wässern umströmt werden. Hierfür wurde für jeden Probekörper eine Umströmungszelle mit den Abmaßen 185 mm x 80 mm x 80 mm aus PVC gefertigt (Abbildung 3-50, Abbildung 3-51, Anhang 2). Die Probekörper stehen in diesen Versuchszellen senkrecht auf kleinen Kegeln, damit sie gleichmäßig von unten nach oben umströmt werden können. Um verschiedene Grundwasserszenarien abbilden zu können, kann das Wasser entweder in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert werden, was den Bedingungen von stagnierendem Grundwasser entspricht, wie es z.B. in geringdurchlässigen Grundwasserstauern vorkommt (Abbildung 3-51). Hierbei wurden in Versuchsreihen ca. 1,2 Liter Wasser zirkuliert, das in festgelegten Beprobungsintervallen ausgetauscht wurde. Als zweite Möglichkeit kann der Probekörper kontinuierlich aus einem Vorratsbehälter mit frischem Wasser umströmt werden, was den Bedingungen eines Grundwasserleiters entspricht (Abbildung 3-51). In den nach dieser Methode durchgeführten Versuchen wurde jede Zelle täglich mit ca. 2 Liter Wasser umströmt. Die Zirkulation der Wässer erfolgte hierbei mittels Peristaltikpumpen. In der Versuchseinrichtung kann der Probekörper auch im Kontakt mit einem reaktiven Granulat (z.B. Gips, Anhydrit, usw.) eingebaut werden, um Bedingungen zu schaffen, die z.B. Gips bzw. Anhydrit führenden Schichten nahekommen. Aufgrund der Projektlaufzeit von zwei Jahren und dem Arbeitsumfang konnten solche Versuche innerhalb der Projektlaufzeit jedoch noch nicht durchgeführt werden.

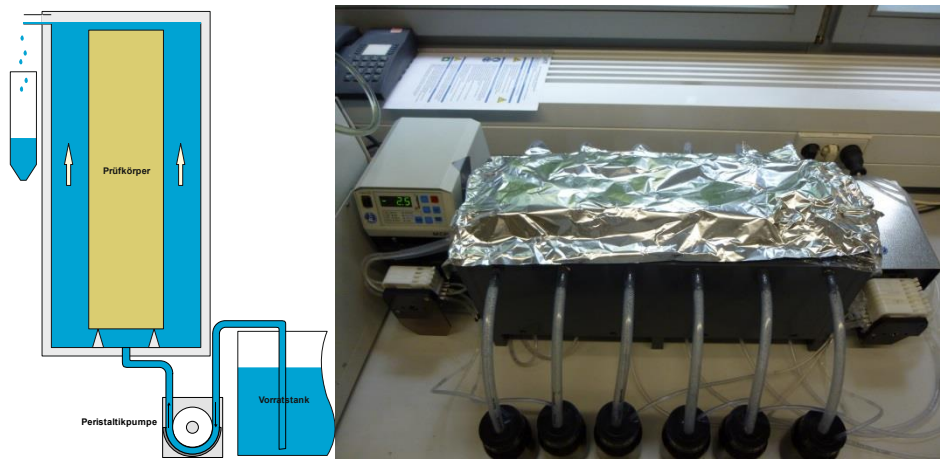


Abbildung 3-50: Schematische Skizze (links) und Foto (rechts) des Umströmungsversuchs

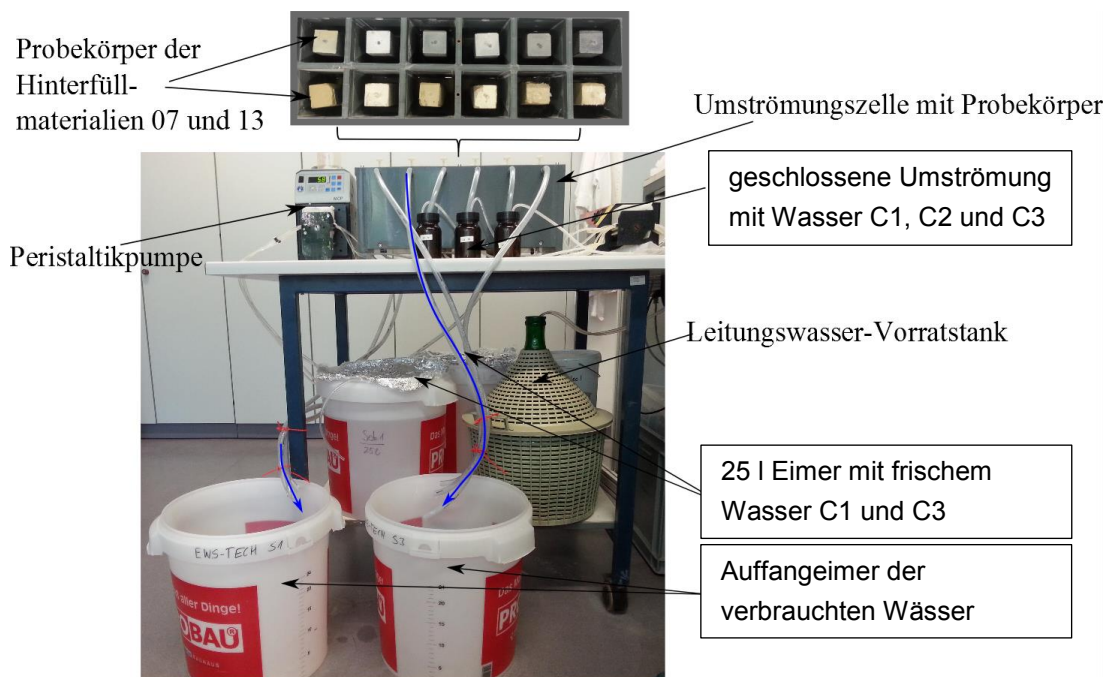


Abbildung 3-51: Umströmungsversuch zum Säureangriff mit unterschiedlichen Umströmungsszenarien

Die Materialuntersuchungen erfolgten an Proben, die 28 Tage bei einer Luftfeuchtigkeit von > 98% vorgelagert wurden. Von den Initialproben und den durchströmten Proben wurden Gewicht, Länge, Biegezug- und Druckfestigkeit, Nadeleindringwiderstand, Quecksilberporosimetrie, XRD und z.T. REM-Aufnahmen gemessen, durchgeführt und angefertigt sowie eine zeitliche Analyse der durchströmten Wässer (pH, Eh, elektrische Leitfähigkeit, Ionen) durchgeführt.

3.2.3.10. Auswertung - Darstellung

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Konzentrationsänderungen der untersuchten wässrigen Lösungen wurde eine normierte Darstellung C/C_0 gewählt.

Hierbei gilt (Ausgangslösung C_0 ; Gleichgewichtslösung C):

- $C/C_0 = 1$ keine Änderung
- $0 < C/C_0 < 1$ Ionengehalt im Vergleich zur Ausgangslösung geringer
 - ⇒ z. B. Mineralausfällungen (Übersättigung)
 - ⇒ Mineralneubildung
- $C/C_0 > 1$ Ionen gehen in Lösung, z.B. durch:
 - ⇒ Prozesse während der Zementhydratation
 - ⇒ Lösung von Mineralen (Untersättigung; äußerer Angriff)
 - ⇒ Austauschreaktion von Tonmineralen

Im Falle, dass $C_0 = 0$ (Reaktionslösung Typ S1 für Ca- und Mg-Konzentration, Typ S3 für Na- und K-Konzentration) wurden die Konzentrationsänderungen für die entsprechenden Kationen/Anionen als Absolutwerte dargestellt.

3.2.3.11. Übersicht der durchgeführten Versuche

Tabelle 3-23 gibt einen Überblick über die im Projekt durchgeführten Versuche. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Versuche und der Analysenverfahren ist den vorangegangenen Kapiteln zu entnehmen.

Tabelle 3-23: Übersicht über die durchgeführten Versuche (LW Leitungswasser, DW destilliertes Wasser, S1 Wasser Typ S1, S2 Wasser Typ S2, S3 Wasser Typ S3, C1 Wasser Typ C1, C2 Wasser Typ C2, C3 Wasser Typ C3, G Zirkulation geschlossen, K Zirkulation kontinuierlich)

Wärmeleitfähigkeitsmessung				
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
LW				
7 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
21 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
DW				
7 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
21 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1

Wärmeleitfähigkeitsmessung				
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
Typ S1				
7 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
21 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
Typ S2				
7 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
21 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
Typ S3				
7 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
21 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 02	Baustoff 03	Baustoff 04	Baustoff 05
LW				
7 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
21 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 06	Baustoff 08	Baustoff 09	Baustoff 11
LW				
7 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
21 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 12	Baustoff 14	Baustoff 15	
LW				
7 d	1	1	1	
14 d	1	1	1	
21 d	1	1	1	
28 d	1	1	1	

Durchströmungsversuche				
Versuch	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
DW	1	1	1	1
LW	1	2	1	1
Typ S1	1	1	1	1
Typ S2	1	1	1	1
Typ S3	1	1	1	1
Systemdurchlässigkeit				
Versuch	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
LW	1	2	1	2
Batchversuche mit nicht hydratisierten Hinterfüllbaustoffen				
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
Typ S1				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1
Typ S2				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1
Typ S3				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1
LW				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1

Batchversuche mit hydratisierten Hinterfüllbaustoffen				
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
Typ S1				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1
Medium/ Versuchsdauer	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
Typ S2				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1
Typ S3				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1
LW				
1 d	1	1	1	1
2 d	1	1	1	1
5 d	1	1	1	1
10 d	1	1	1	1
14 d	1	1	1	1
28 d	1	1	1	1
56 d	1	1	1	1

Umströmungsversuche				
Versuch	Baustoff 01	Baustoff 07	Baustoff 13	Baustoff 16
LW G	1	1	1	1
LW K	-	1	1	-
Typ S1G	2	1	2	1
Typ S1K	-	2	-	-
Typ S2G	2	1	2	1
Typ S3G	1	1	1	1
Typ S3K	-	-	-	2
Typ C1G	-	1	1	-
Typ C1K	-	1	1	-
Typ C2G	-	1	1	-
Typ C3G	-	1	1	-
Typ C3K	-	1	1	-

3.2.4. Ergebnisse

3.2.4.1. Wärmeleitfähigkeitsmessung

Die Wärmeleitfähigkeit wurde an allen 15 zur Verfügung stehenden Hinterfüllmaterialien gemessen. Hierzu wurden die Proben gemäß Kapitel 3.2.3.3 vorbereitet und entsprechend Kapitel 3.2.3.5.11 gemessen. Die Messung erfolgte hierbei nach 7, 14, 21 und 28 Tagen. Die Messgenauigkeit beträgt dabei $\pm 10\%$. In Abbildung 3-52 sind die Messwerte der nicht für die Detailuntersuchungen ausgewählten Baustoffe dargestellt. Es zeigt sich, dass die Messwerte innerhalb der Messzeit weitgehend konstant bleiben. Lediglich der Baustoff 09 zeigt eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit über die Zeit um $0,21\text{ W/mK}$. Bei den Baustoffen 02-06, die geringe Wärmeleitfähigkeiten mit Werten $\leq 1\text{ W/mK}$ aufweisen, handelt es sich um thermisch nicht verbesserte Hinterfüllmaterialien. Demgegenüber sind die übrigen Baustoffe thermisch verbessert. Aus dem Vergleich zwischen den Messwerten und den Herstellerangaben ergibt sich bei den Baustoffen 02, 05, 06, 08, 09 und 12 eine Diskrepanz, die auf eine Alterung des Materials zurückzuführen sein könnte. Da innerhalb des Projekts das Hinterfüllmaterial einer Charge verwendet wurde (siehe Erklärung in Kapitel 3.2.3.1) und die Wärmeleitfähigkeitsmessung aufgrund des Untersuchungsprogramms erst 1-1 ½ Jahre nach Erhalt der Proben erfolgte, sind lagerungsbedingte Veränderungen der Sackware nicht ausgeschlossen. Dies zeigt sich beispielsweise am Baustoff 08, der im Rahmen einer anderen Untersuchung am AGW bei gleicher Probenvorbereitung Messwerte entsprechend der Herstellerangaben erbrachte, die deutlich höher lagen als die Werte im Rahmen dieses Projektes. Die Ergebnisse zeigen ferner, dass nicht alle Hinterfüllbaustoffe gleich stark auf die Lagerung reagieren, was auf die unterschiedliche Zusammensetzung und die ursprüngliche Restfeuchte zurückzuführen ist, da die Baustoffe alle unter den gleichen Bedingungen gleichlange gelagert wurden. Die beim Brennen entstehenden Calciumsilikate sind energiereiche, bei normalen Temperaturen nicht beständige Verbindungen, mit dem Bestreben unter Energieabgabe sich in kalkärmere Verbindungen umzulagern. Dieser metastabile Zustand ist unter trockenen Verhältnissen aufgrund der Unbeweglichkeit der Moleküle und Ionen gegeben, so dass es zu keinen Umlagerungsreaktionen kommt (Benedix 2011). Bei längerer Lagerung nimmt Zement jedoch Feuchtigkeit auf, was zur Klumpenbildung und einer Minderung des Erhärtungsvermögens und zur Festigkeitsminderung führt (Beton 2014). Neben den Zementphasen sind in Hinterfüllmaterialien auch Tonminerale enthalten, die unter feuchten Bedingungen zum Kationenaustausch neigen, insbesondere wenn Alkali- bzw. Erdalkalitionen im Überschuss vorhanden sind (Jasmund 1993). Da die Eigenschaften der Tonminerale direkt an die Kationenbelegung gekoppelt sind (Lagaly 1993), können durch den Austausch auch die Eigenschaften der Hinterfüllung beeinflusst werden.

Die Baustoffe 01, 07, 13 und 16 wurden eingehender untersucht. So wurde neben dem zeitlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit auch die Verwendung unterschiedlicher Wässer geprüft. Hierbei kamen beim Anmischen der Baustoffe neben dem Karlsruher Leitungswasser, destilliertes Wasser sowie die Wässer des Typ S1, S2 und S3 zum Einsatz (Kapitel 3.2.3.2). Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 3-53 dargestellt.

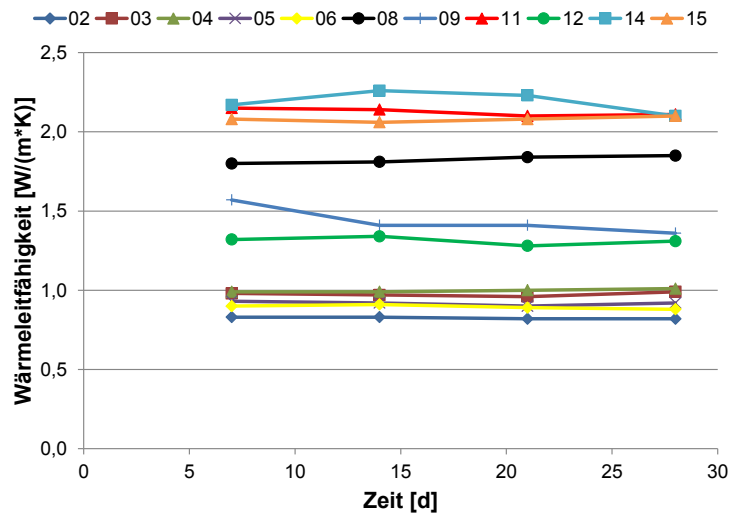


Abbildung 3-52: Zeitabhängige Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Baustoffe bei Raumtemperatur (21 °C)

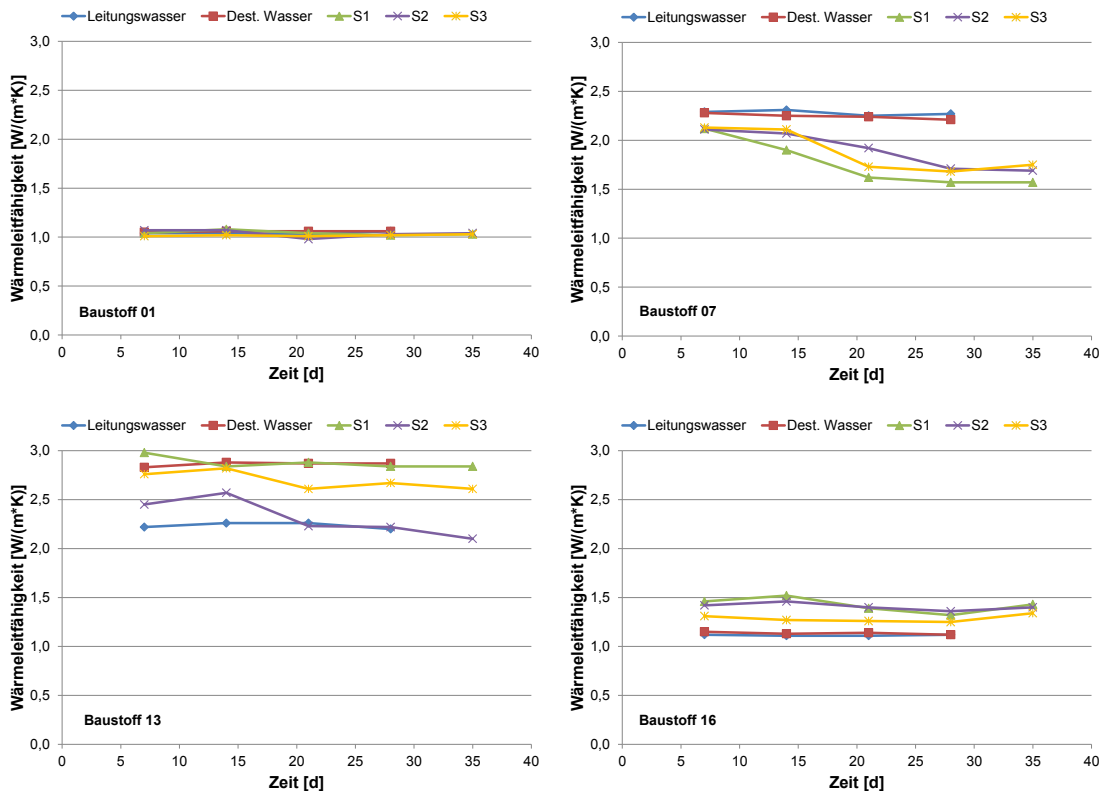


Abbildung 3-53: Zeitabhängige Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von den verwendeten Wässern (oben links Baustoff 01, oben rechts Baustoff 07, unten links Baustoff 13, unten rechts Baustoff 16) bei Raumtemperatur (21 °C)

Die Ergebnisse zeigen, dass die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Baustoffe sich je nach verwendeten Wässern unterschiedlich entwickeln. Die Wärmeleitfähigkeit des thermisch nicht verbesserten Hinterfüllbaustoffs 01 zeigt hierbei keinen zeitlichen Einfluss. Der Wert liegt über die gesamte Versuchszeit unabhängig vom verwendeten Wasser bei ca. 1 W/mK. Der thermisch verbesserte Baustoff 07 hat bei der Verwendung von Leitungswasser und destilliertem Wasser konstante Wärmeleitfähigkeitswerte von ca. 2,3 W/mK. Bei der Verwendung der höher konzentrierten Wässer zeigt sich unabhängig von deren Zusammensetzung bereits beim Initialwert ein etwas geringerer Wert der Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,1 W/mK. Über den zeitlichen Verlauf nimmt dieser Wert dann um etwa 0,5 W/mK ab. Das ebenfalls thermisch verbesserte Hinterfüllmaterial 13 hat bei der Verwendung von destilliertem Wasser eine um 0,6 W/mK höhere Wärmeleitfähigkeit als wenn es mit Leitungswasser abgemischt wurde. Bei der Verwendung des Wassers des Typs S1 entsprechen die Werte etwa denen des destillierten Wassers, während sie bei der Verwendung des Wassers des Typs S3 über die Zeit ca. 0,2 W/mK geringer sind. Die Wärmeleitfähigkeiten des Probekörpers, der mit dem Wasser des Typs S2 angemischt wurde weichen von den übrigen aufgrund leichter Unregelmäßigkeiten in der Messoberfläche ab. Die Wärmeleitfähigkeit der Baustellenmischung, die aus Quarzsand, IBECO Aktiv Bentonit B1 und Portlandzement CEM-I-32,5R besteht, ist bei allen verwendeten Wässern über die Zeit in etwa konstant. Bei der Verwendung von destilliertem Wasser und Leitungswasser liegen die Werte bei ca. 1,1 W/mK, während sie bei der Verwendung von Wässern die Na^+ und K^+ enthalten um etwa 0,3 W/mK höher liegen. Bei der Probe, die mit Wasser des Typs S3 angesetzt wurde, das als Kationen Mg^{2+} und Ca^{2+} enthält, liegen die Messwerte zwischen denen des Leitungswassers und der übrigen Wässer. Die höheren Wärmeleitfähigkeiten von Baustoff 16 bei Verwendung der Wasser des Typs S1-3 lassen sich zum einen durch die höhere Kationenkonzentration gegenüber der des Leitungswassers erklären, die zu einer Verringerung der Ausdehnung der diffusen Doppelschicht während des Anmischvorgangs führt, wodurch auch der Abstand der Silicatschichten geringer wird. Zum anderen hängt die Wärmeleitfähigkeit auch von der Aggregation der Tonteilchen ab. Bei hohen pH-Werten, wie sie in zementhaltigen Systemen üblich sind, werden aufgrund der in diesem Milieu vorherrschenden negativen Kantenladung Flächen-/Flächenkontakte bevorzugt (Lagaly 1993). So kommt es zu bandartigen Aggregationen von Montmorillonitplättchen, was einen besseren Korn zu Kornkontakt und damit einen effektiveren konduktiven Wärmetransport bewirkt. Die etwas geringere Wärmeleitfähigkeit des Probekörpers des Typs S3 kann durch die hohen und bereits zu Beginn des Anmischvorgangs verfügbaren Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Konzentration hervorgerufen werden, da diese unmittelbar nach dem ersten Kontakt mit dem Zement zu $\text{Mg}(\text{OH})_2$ und $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagieren. Darüber hinaus kann es zur Bildung von Gips kommen (Stark & Wicht 2013). Dadurch kann es schon zu Beginn zur Bildung einer kartenhausähnlichen Struktur kommen, die eine etwas höhere Porosität und damit geringere Wärmeleitfähigkeit bedingt. Die unterschiedlichen Wässer können auf das Abbindeverhalten (Abbindzeit, etc.) der Zementphasen Einfluss genommen haben, indem z. B. der Abbindeeregler (Gips, etc.) unterdrückt wurde und die Menge an gebildeten Aluminatphasen sich je nach Wassertyp verändert hat bzw. unterdrückt wurde. Eine weitere Interpretation der Messergebnisse ist aufgrund der fehlenden Information

(Firmengeheimnis) der genauen Zusammensetzung der Baustoffe, wie z. B. die verwendete Zementmenge und Zementart, nicht möglich. Prinzipiell lässt sich aber sagen, dass die Wärmeleitfähigkeit einiger Baustoffe von der chemischen Zusammensetzung des Anmischwassers abhängig ist.

3.2.4.2. Durchströmungsversuche

Die Durchströmungsversuche wurden gemäß Kapitel 3.2.3.6 an den Hinterfüllbaustoffen 01, 07, 13, 16 mit Leitungswasser, destilliertem Wasser sowie den Wässern des Typs S1, S2 und S3 durchgeführt. Aufgrund der langen Versuchszeiten sowie der Anzahl der durchgeführten Versuche, war es nur vereinzelt möglich, Parallelproben zu messen. In Tabelle 3-24 sind die Ergebnisse aller Versuche dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass alle untersuchten Baustoffe sehr schwach durchlässig sind. Werden die Kriterien für den Durchlässigkeitsbeiwert von $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s der LQS EWS (2012) zugrunde gelegt, entsprechen alle Baustoffe diesen Anforderungen. Nach der VDI 4640 Blatt 2 (2015) muss der Baustoff jedoch mindestens $\leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s erfüllen. Wird dieses Kriterium zugrunde gelegt, so erfüllen von den untersuchten Baustoffen lediglich die Baustoffe 07 und 13 die geforderten Werte. Die übrigen Baustoffe erfüllen diese Werte erst nach 50 bis 300 Tagen.

In Abbildung 3-54 ist die zeitliche Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwerts des Baustoffs 01 dargestellt. Es zeigt sich bei allen Probekörpern eine Abnahme der Durchlässigkeit über die Zeit. Dies ist bedingt durch die andauernde Hydratation des Zements. Die Messwerte aller untersuchten Wässer liegen zu Versuchsbeginn im selben Größenordnungsbereich. Erst ab ca. 120 Tagen zeigen die Proben unterschiedliche Entwicklungen der Durchlässigkeit. Dieses Stadium fällt mit der versuchsbedingten manuellen Erhöhung des Unterwasserdrucks zusammen. Durch die Druckerhöhung wird der Probekörper stärker durchströmt und somit stehen auch mehr Ionen zur Reaktion innerhalb der Probe zur Verfügung. Für die mit dem Wasser des Typs S1 (Na, K) angemischte Probe ist die stärkste Reduktion der Durchlässigkeit zu beobachten, die durch die Ausfällung von sekundären Sulfatmineralen verursacht wird (Kapitel 3.2.2.3.4). In den beiden anderen Proben können unter vorherrschenden chemischen Bedingungen zusätzlich $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ausfallen und somit die Durchlässigkeit reduzieren.

Der Baustoff 07 ist schon zu Beginn des Versuchs sehr schwach durchlässig (Tabelle 3-24, Abbildung 3-55). Es zeigt sich, dass mit zunehmender Ionenkonzentration in den Wässern die Durchlässigkeit geringer wird. Durch die Probekörper, die mit den Wässern des Typs S1-3 durchströmt wurden, ist während der gesamten Versuchszeit kein Wasser durchströmt, was wahrscheinlich auf Ausfällungen von Sulfaten und Hydroxiden zurückgeführt werden kann. Um Aussagen hinsichtlich der Durchlässigkeit kurz nach dem Hinterfüllvorgang treffen zu können, wurde vom Baustoff 07 ein Probekörper nach einer Aushärtezeit von nur 7 Tagen untersucht. Es hat sich gezeigt, dass der Durchlässigkeitsbeiwert ebenso $< 1 \cdot 10^{-10}$ m/s ist und somit die Kriterien der VDI 4640 erfüllt sind, aber im Gegensatz zu dem Versuch mit einer Aushärtezeit von 28 Tagen dennoch höhere Werte aufweist, da bei dieser Probe kein Wasser durchströmte.

Die geringste Durchlässigkeit aller untersuchten Baustoffe zeigt die Hinterfüllung 13. Hier konnte lediglich bei der Probe, die mit Wasser des Typs S1 angesetzt wurde, zu Versuchsbeginn ein

sehr schwacher Durchfluss festgestellt werden (Tabelle 3-24, Abbildung 3-56). Die unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Baustoffe decken sich mit deren Porosität. Aus Abbildung 3-58 geht hervor, dass die Porosität ausgehend von Baustoff 16 über 01, 07 zu 13 geringer wird, was mit den ermittelten Durchlässigkeiten korreliert. Die höchste Durchlässigkeit weist die Eigenmischung (Baustoff 16) auf (Abbildung 3-57). Hier ist es wie beim Baustoff 07, dass mit dem Anstieg der Ionenkonzentration in den durchströmten Wässern vom destillierten Wasser über Leitungswasser bis zum Wasser des Typ 1 die Durchlässigkeit sinkt.

Tabelle 3-24: Durchlässigkeitsbeiwerte der untersuchten Hinterfüllbaustoffe (LW Leitungswasser, DW destilliertes Wasser, S1 Wasser Typ S1, S2 Wasser Typ S2, S3 Wasser Typ S3)

Baustoff	Wasser	K_{f10} -Wert [m/s]	l [-]	Laufzeit [d]
01	DW	5,0E-9 - <1,0E-11	1,6 - 3,5	420
01	LW	8,7E-8 - 3,4E-11	3,4 - 33,2	389
01	Typ S1	7,4E-10 - 1,2E-12	6,7 - 33,5	309
01	Typ S2	4,4E-10 - 5,6E-11	6,2 - 29,4	309
01	Typ S3	5,6E-10 - 6,6E-12	8,8 - 33,4	308
07	DW	3,6E-9 - <1,0E-11	2,6 - 72,5	518
07	LW	<1,0E-11	21,4 - 54,0	242
07 ^(7d)	LW	6,8E-11 - 1,4E-13	4,6 - 43,1	456
07	Typ S1	<1,0E-11	9,9 - 47,7	309
07	Typ S2	6,3E-9 - <1,0E-11	4,1 - 38,6	309
07	Typ S3	<1,0E-11	10,2 - 39,8	309
13	DW	<1,0E-11	2,7 - 36,6	432
13	LW	<1,0E-11	2,7 - 26,7	446
13	Typ S1	3,6E-10 - 5,9E-12	8,4 - 41,2	309
13	Typ S2	<1,0E-11	8,5 - 35,4	309
13	Typ S3	<1,0E-11	9,1 - 35,8	309
16	DW	2,6E-8 - 4,4E-10	1,8 - 3,9	420
16	LW	6,0E-8 - 1,6E-11	3,3 - 32,9	315
16	Typ S1	3,2E-10 - 1,5 E-12	11,1 - 52,7	309
16	Typ S2	<1,0E-11	5,5 - 43,6	270
16	Typ S3	<1,0E-11	4,0 - 41,9	309

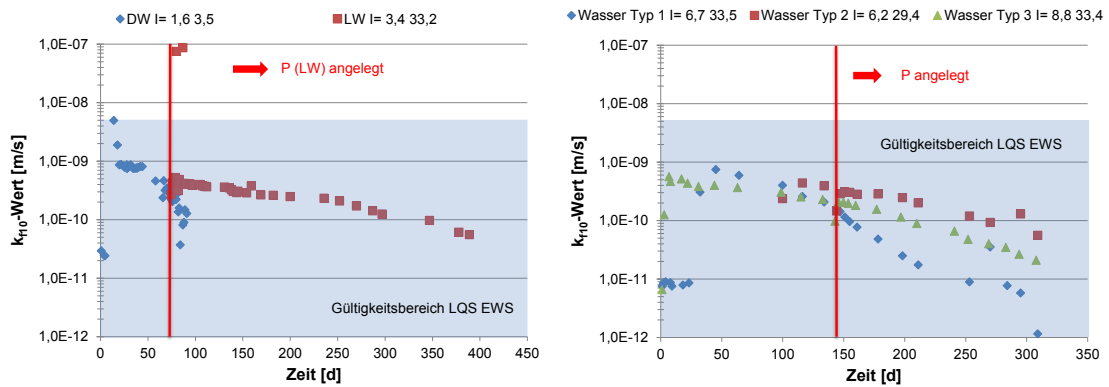


Abbildung 3-54: Entwicklung der Durchlässigkeit des Baustoffs 01 bei Verwendung unterschiedlicher Wässer

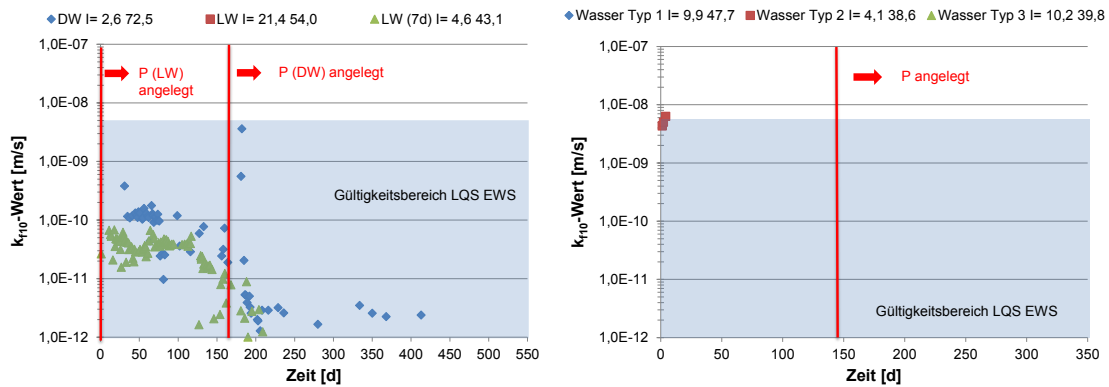


Abbildung 3-55: Entwicklung der Durchlässigkeit des Baustoffs 07 bei Verwendung unterschiedlicher Wässer

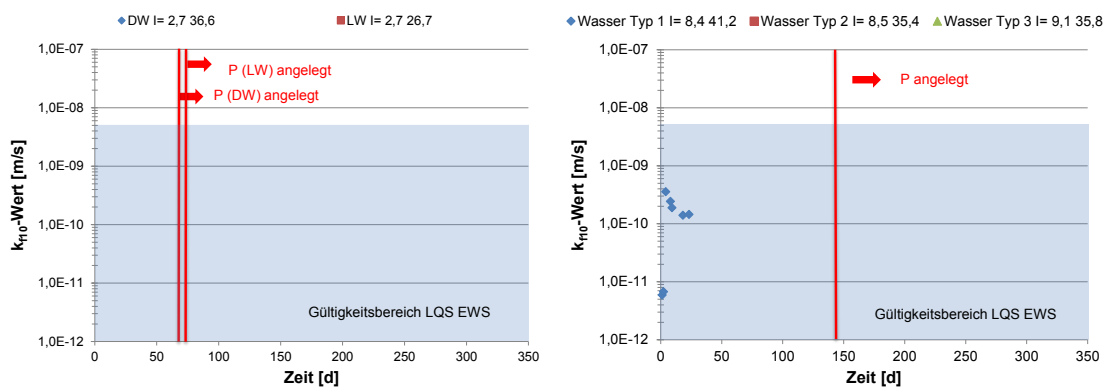


Abbildung 3-56: Entwicklung der Durchlässigkeit des Baustoffs 13 bei Verwendung unterschiedlicher Wässer

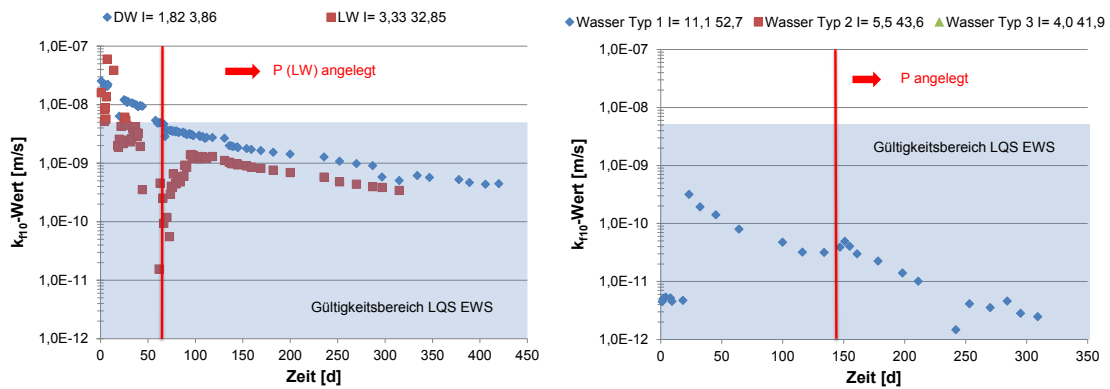


Abbildung 3-57: Entwicklung der Durchlässigkeit des Baustoffs 16 bei Verwendung unterschiedlicher Wasser

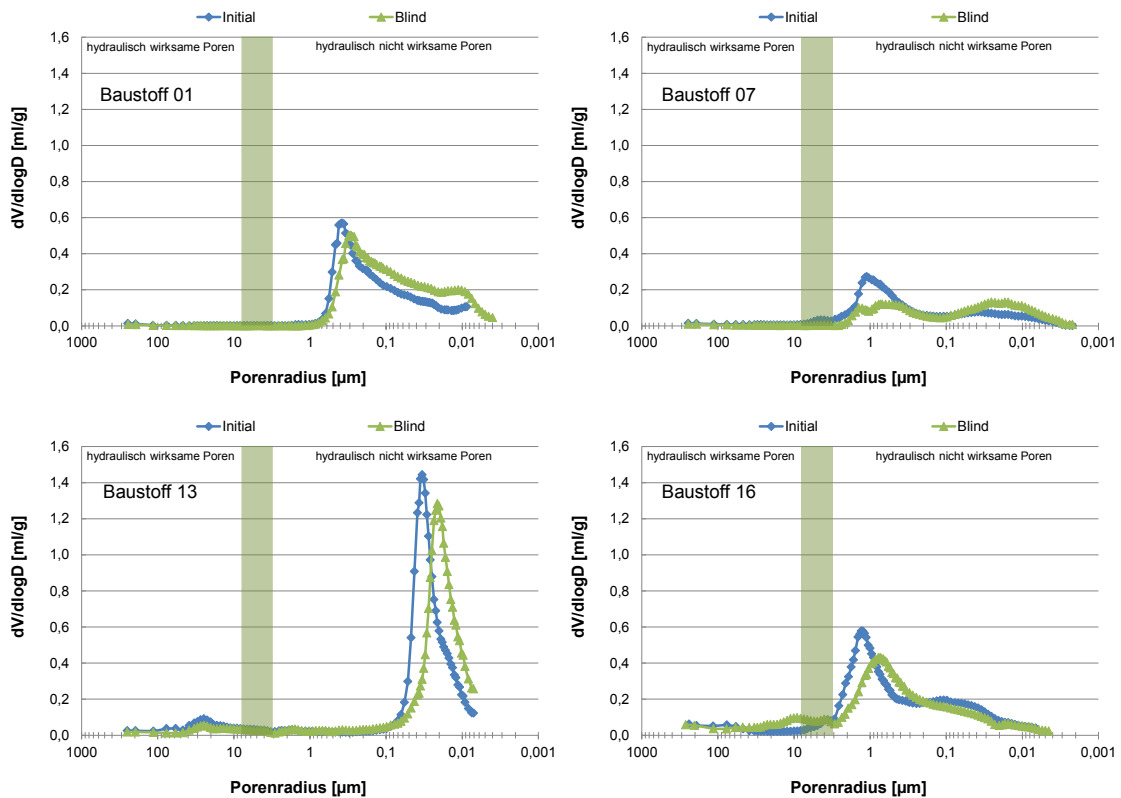


Abbildung 3-58: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 01 (oben links), 07 (oben rechts), 13 (unten links) und 16 (unten rechts)

Aufgrund der sehr schwachen Durchlässigkeit aller Hinterfüllbaustoffe war die durchströmte Wassermenge zu gering, um daran verlässliche chemische Untersuchungen vornehmen zu können. In einigen Fällen floss über die gesamte Versuchszeit kein Wasser durch die Probe (Baustoff 07

und 13; Tabelle 3-24). Da auch nach dem Ausbau der Probenkörper makroskopisch keine Veränderung zu erkennen war, wurde auf eine weitere Untersuchung der Probenkörper verzichtet.

3.2.4.3. Systemdurchlässigkeitsversuche

Bei den Systemdurchlässigkeitsversuchen sollte untersucht werden, ob der Hinterfüllbaustoff unter Laborbedingungen in der Lage ist, ein dichtes System zu ermöglichen, das aus 4 EWS-Rohren, Hinterfüllung sowie einem besandeten PVC-Außenrohr besteht (Kapitel 3.2.3.7). Ziel war es dabei einen Materialkennwert zur Systemdurchlässigkeit zu generieren, der zur Qualitätssicherung beim direkten Vergleich der einzelnen Baustoffe dient, ohne dabei die Betriebsbedingungen von EWS-Anlagen sowie Frost-/Tauwechsel zu berücksichtigen. Die Versuche wurden alle mit Leitungswasser durchgeführt.

Zu Beginn der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Probenherstellung einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Messwerte hat. Besonders das Lösen der Probekörper aus der Gussform erwies sich als diffizil, da hierbei Zugbelastungen auf die EWS-Rohre wirken und es damit zu Relativbewegungen zwischen Hinterfüllung und EWS-Rohr kam mit der Folge von Mikrorissen, die zu einer erhöhten Systemdurchlässigkeit führten. Ein weiteres Problem stellte die Befüllung der Sondenrohre mit Epoxidharz dar. Durch die exotherme Reaktion bei der Aushärtung (über 80 °C) kam es zur radialen Rissbildung um die Sondenrohre herum und damit ebenfalls zu einer erhöhten Systemdurchlässigkeit.

Die Ergebnisse der Systemdurchlässigkeitsuntersuchung sind in Tabelle 3-25 aufgelistet. In Abbildung 3-59 ist die Entwicklung der Systemdurchlässigkeit des Verfüllbaustoffs 01 den Werten der Durchströmungsversuche gegenübergestellt. Die Werte liegen in derselben Größenordnung und werden über die Zeit hin geringer, was durch den fortschreitenden Hydratationsprozess sowie durch Ausfällung von Hydroxiden bedingt wird. Die Durchlässigkeitsbeiwerte und deren Entwicklung liegen bei den Durchströmungsversuchen und den Systemdurchlässigkeitsversuchen für die übrigen Baustoffe 07, 13 und 16 ebenfalls im gleichen Bereich (Abbildung 3-60, Tabelle 3-25). Für den Baustoff 07 ist in Abbildung 3-61 einer der frühen Versuche dargestellt, bei denen das Epoxidharz erst nach dem Vergießen der Probe eingefüllt wurde, mit der Folge der radialen Mikrorissbildung um die EWS-Rohre. In diesem Fall waren die Risse zwar makroskopisch nicht sichtbar, sie machten sich dennoch im Hinblick auf die Systemdurchlässigkeit bemerkbar. Die Durchlässigkeitsbeiwerte sind zu Versuchsbeginn ca. 2 Zehnerpotenzen höher als bei den herkömmlichen Durchströmungsversuchen desselben Hinterfüllmaterials. Bedingt durch die Hydratation sowie durch Ausfällung von Hydroxiden tritt ein Heilungsprozess der Risse ein, wodurch die Systemdurchlässigkeit in diesem Fall nach ca. 50 Tagen den Vorgaben der LQS EWS entspricht. Bei weiteren Versuchen, bei denen die Proben nach der gleichen Methode, wie in diesem Fall beschrieben, gefertigt wurden, waren die Durchflüsse so hoch, dass die Versuche abgebrochen wurden und die Präparationsmethode gemäß Kapitel 3.2.3.7 modifiziert wurde.

Vom Hinterfüllbaustoff 16 wurden zwei Versuche durchgeführt, deren Ergebnis in Abbildung 3-62 gegenübergestellt sind. Es zeigt sich, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte beider Versuche die-

selbe Größenordnung sowie zeitliche Entwicklung aufweisen. Die Werte der Durchlässigkeitsbeiwerte sind bei diesem Baustoff zu Versuchsbeginn aber wie bei den herkömmlichen Durchströmungsversuchen zu hoch und liegen außerhalb des Gültigkeitsbereichs der LQS EWS.

Tabelle 3-25: Systemdurchlässigkeit der untersuchten Hinterfüllbaustoffe (LW Leitungswasser)

Baustoff	Wasser	K_{f10} -Wert [m/s]	I [-]	Laufzeit [d]
01	LW	2,5E-8 – 4,3E-10	4,2 – 8,1	111
07	LW	<1,0E-11	2,5 – 45,2	175
07	LW	3,0E-6 – 2,3E-13	2,4 – 35,4	518
13	LW	<1,0E-11	2,6 - 45,0	175
16	LW	6,3E-8 – 1,2E-9	2,5 – 7,6	175
16	LW	4,6E-8 – 4,0e-9	3,5 – 4,5	111

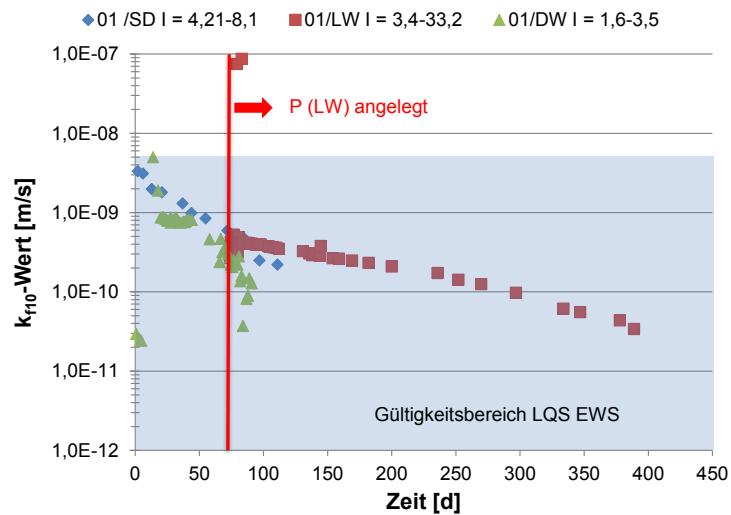


Abbildung 3-59: Entwicklung der Systemdurchlässigkeit (SD) des Baustoffs 01 im Vergleich zur Durchlässigkeit (LW Leitungswasser, DW destilliertes Wasser)

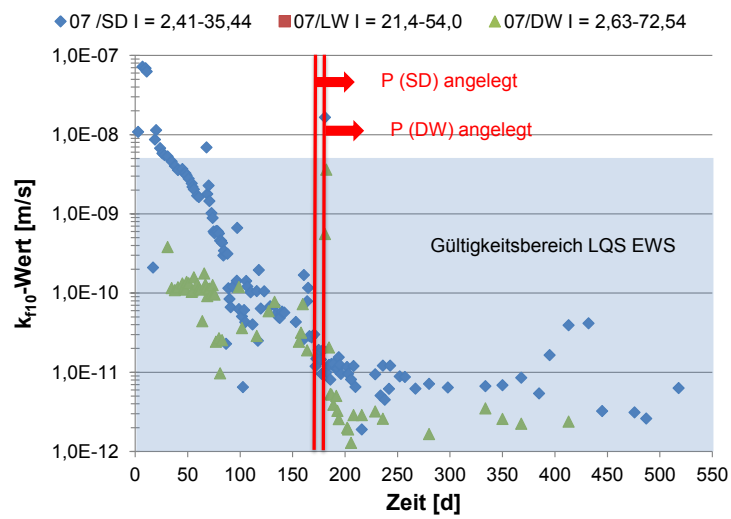


Abbildung 3-60: Entwicklung der Systemdurchlässigkeit (SD) des Baustoffs 07 im Vergleich zur Durchlässigkeit (LW Leitungswasser, DW destilliertes Wasser)

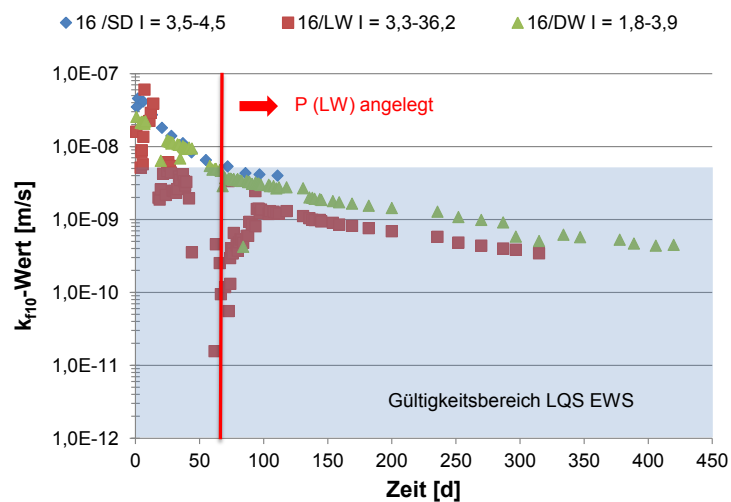


Abbildung 3-61: Entwicklung der Systemdurchlässigkeit (SD) des Baustoffs 16 im Vergleich zur Durchlässigkeit (LW Leitungswasser, DW destilliertes Wasser)

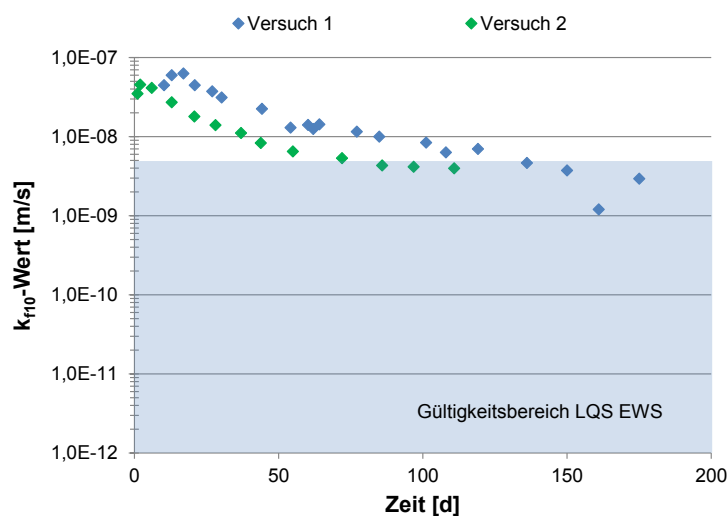


Abbildung 3-62: Entwicklung der Systemdurchlässigkeit (SD) des Baustoffs 16 (A- und B-Probe)

Die Ergebnisse der Systemdurchlässigkeitsversuche zeigen, dass mit der vorgestellten Präparationsmethode und dem vorgestellten Versuchsaufbau reproduzierbare und verlässliche Durchlässigkeitsbeiwerte von Hinterfüllmaterialien in Anlehnung an die DIN 18130 T1 gemessen werden können. Es hat sich allerdings gezeigt, dass bei der Probenherstellung äußerst sorgfältig vorgegangen werden muss. Ferner haben die Versuche gezeigt, dass schon kleinste Risse zwischen Hinterfüllung und Sondenrohr einen erheblichen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit haben. Daraus lässt sich ableiten, dass der Zeitpunkt der Druckprüfung bei der Installation einer Erdwärmesonde entsprechend zu wählen ist, damit es durch die Volumenzunahme der Sondenrohre während der Druckbeaufschlagung zu keiner nachteiligen Rissbildung zwischen Sonde und Hinterfüllung kommt.

3.2.4.4. Batchversuche

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Materialien 01, 07, 13 und 16 hinsichtlich eines möglichen Sulfatangriffes vorgestellt. Die Resultate aus den Batchversuchen mit nicht hydratisierten und hydratisierten Proben werden vergleichend betrachtet. Nach Versuchsende wurden jeweils die wässrige Phase (Batchlösung) und der Feststoff auf Veränderungen (z.B. Neubildung von Sulfatmineralen) durch sulfathaltige Wässer (Typ S1, Typ S2 und Typ S3) und Leitungswasser Karlsruhe (vgl. Tabelle 3-19) untersucht.

3.2.4.4.1. Batchlösung – Chemismus

Die Ergebnisse für die Materialien 01, 07, 13 und 16 (nicht hydratisiert und hydratisiert) aus den Batchversuchen mit Leitungswasser und den Wässern des Typs S1-3 sind in Abbildung 3-66, Abbildung 3-67, Abbildung 3-69, Abbildung 3-70, Abbildung 3-72, Abbildung 3-73, Abbildung 3-75 sowie Abbildung 3-76 dargestellt. Die elektrochemischen Parameter für die jeweiligen Versuche zeigen Abbildung 3-68, Abbildung 3-71, Abbildung 3-74 und Abbildung 3-77. Die Rohdaten aller

Versuche befinden sich auf der beigefügten Daten-CD. Die Reaktionslösungen wurden nach dem jeweiligen Versuchsende auf Veränderungen im Chemismus hin untersucht. Eine zusammenfassende Übersicht über die Zu- bzw. Abnahme von Kationen- und Anionen-Konzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen aller durchgeführten Versuche im Zeitraum von 56 d gibt Tabelle 3-27. Im Folgenden werden anhand der vorliegenden Ergebnisse mögliche ablaufende Reaktionen erläutert. Unter den vorliegenden experimentellen Bedingungen können mehrere Prozesse gleichzeitig ablaufen:

- Einsetzen des Hydratationsprozesses nicht hydratisierter Proben, bzw. Fortführung des Hydratationsprozesses der nach 28 d Hydratationszeit eingesetzten Proben (vgl. Abbildung 3-37 c)
- Äußerer Sulfatangriff durch Kontakt mit sulfathaltigen Wässern

Alle Versuche zeigen, dass unabhängig von Material und Reaktionslösung, **Na⁺, K⁺, Ca²⁺ und Cl⁻**-Ionen in Lösung gehen ($C/C_0 > 1$, vgl. Tabelle 3-27), wobei Ca²⁺-Ionen verstärkt bei den nicht hydratisierten Proben gelöst werden. Ansonsten sind die Verläufe der Anionen- und Kationenkonzentrationen aus beiden Versuchsreihen (hydratisiert und nicht hydratisiert) sehr ähnlich bzw. ergänzen sich. Die Lösung von Ionen sind typische Anzeichen für Hydratationsprozesse im Zement (Abbildung 3-37). Während des Hydratationsprozesses gehen insbesondere K⁺- aber auch Na⁺-Ionen aufgrund der Dissoziation der Alkalisulfate in Lösung. Sie liegen als basisches NaOH bzw. KOH vor und bewirken einen sofortigen Anstieg des pH-Wertes in der Lösung (Stark & Wicht 2013). Je nach Material zeigen die Batchlösungen nach Zugabe der jeweiligen Reaktionslösung einen sofortigen pH-Anstieg auf pH 10 bis pH 12,5. Während der gesamten Versuchsdauer erfolgt eine weitere Verschiebung des pH-Wertes zu basischeren Werten (Abbildung 3-68, Abbildung 3-71, Abbildung 3-74 und Abbildung 3-77). Ebenso ist ein deutlicher Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit in allen Batchlösungen zu beobachten. Aus Abbildung 3-37 c wird ersichtlich, dass der Hydratationsprozess der hydratisierten Batchproben nach 28 d noch nicht abgeschlossen ist und die für die Hydratation typischen ablaufenden Reaktionen in gewissem Umfang weiterhin stattfinden.

Für Versuche mit nicht hydratisierten Proben setzt unmittelbar nach Zugabe der jeweiligen Reaktionslösung die Hydratation des in den jeweiligen Hinterfüllmassen enthaltenen Zementes ein. Hierbei findet eine primäre Bildung von Sulfatmineralen wie Ettringit (Trisulfat), Syngenit (K₂SO₄·CaSO₄·H₂O) und Gips statt (Stark & Wicht 2013). Dies zeigt sich in einer deutlichen Abnahme der Ca²⁺- und SO₄²⁻-Konzentrationen (vgl. Tabelle 3-27), welche bei Versuchen mit nicht hydratisierten Proben innerhalb der ersten 5 Tage Reaktionsdauer für die Wässer des Typs S1-3 meist deutlich zu erkennen ist (Abbildung 3-78, Abbildung 3-79, Abbildung 3-80). Der Verbrauch an Sulfat-Ionen wird durch die Entstehung von Hydroxidionen kompensiert, was eine Erhöhung des pH-Wertes zur Folge hat. Die primäre Ettringit- und Gipsbildung ist nach 28 d Hydratationsdauer jedoch weitestgehend abgeschlossen (Abbildung 3-38). Die Abnahme von Ca²⁺- und SO₄²⁻-Ionen ist auch teilweise bei den bereits hydratisierten Proben zu beobachten (Abbildung 3-78, Abbildung 3-80, Abbildung 3-81). Somit kann davon ausgegangen werden, dass eine Neubildung von Gips oder Ettringit in bereits hydratisierten Proben während der Versuchsdauer von 56 d überwiegend auf die äußere Zufuhr von Sulfat aus den Reaktionslösungen zurückzuführen ist (=

äußerer Sulfatangriff bzw. sekundäre Ettringitbildung). Im Fall der nicht hydratisierten Proben besteht die Wahrscheinlichkeit, dass eine primäre und eine sekundäre Bildung von Sulfatmineralen nicht zu unterscheiden ist.

Nachfolgend werden mögliche Reaktionen, welche zwischen Lösung und Feststoff innerhalb der Versuchsdauer stattfinden können, näher betrachtet. Die Zuordnung einzelner Reaktions-mechanismen ist kaum möglich, da mehrere Prozesse zeitgleich stattfinden können.

Die Ca^{2+} -Konzentrationen in den Batchlösungen unterliegen zum Teil größeren Schwankungen, nehmen aber tendenziell mit zunehmender Versuchsdauer ab. Außer für Versuche mit Reaktionslösung Typ S2 liegen diese jedoch über der eingesetzten Ausgangskonzentration, d.h. Ca^{2+} -Ionen werden aus dem eingesetzten Material gelöst (vgl. Tabelle 3-27). Für Änderungen der Ca^{2+} -Konzentration in der Batchlösung können mehrere Reaktionen verantwortlich sein:

- pH-Wert-Änderungen: Lösungs- bzw. Fällungsprozesse, ab $\text{pH} > 12,4$ nimmt die Ca^{2+} -Konzentration stark ab (Abbildung 3-63)
- Bildung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$, welches durch die Reaktion der Tricalciumsilikatphasen (C_3S -Klinkerphasen) mit Wasser während des Hydratationsprozesses entsteht
- Wird die Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (1700 mg/l bei 20°C) jedoch überschritten, beginnt die Kristallisation von Portlandit und die Ca^{2+} -Konzentration in der Batchlösung nimmt ab (Benedix 2011)
- Portlandit steht wiederum für die Umsetzung zu Gips und Ettringit im Falle eines Sulfatangriffes zur Verfügung (Stark & Wicht 2013)
- Fällung in Form von Sulfatmineralen (Löslichkeit von Gips ~ 2000 mg/l; Ettringit ~ 1000 mg/l)
- Fällung in Form von Carbonat

Die gemessene Ca^{2+} -Konzentration in der Batchlösung ist somit die Ca^{2+} -Menge, welche unter den entsprechenden pH-Bedingungen und Fremdionenkonzentrationen in Lösung bleiben kann. Eine eindeutige Korrelation zwischen der Ca^{2+} -Konzentration in der Batchlösung und dem gemessenen pH-Wert ist aus den vorliegenden Ergebnissen jedoch nicht erkennbar.

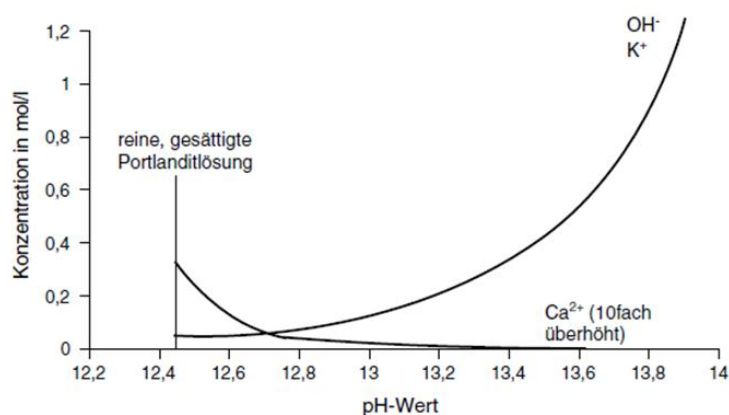


Abbildung 3-63: Abhängigkeit der Ca^{2+} -Konzentration vom pH-Wert (Zugabe von KOH zu einer gesättigten Portlandit-Lösung) (aus Stark & Wicht 2013)

Die SO_4^{2-} -Konzentration liegt in den meisten Fällen bereits nach 1-5 d Versuchsdauer für alle eingesetzten Materialien und Reaktionslösungen deutlich unter derjenigen der Ausgangskonzentration oder ist nicht mehr nachweisbar (z.B. Material 01/Reaktionslösung Typ S2 und S3). Mögliche Erklärungen hierfür können sein:

- Ausfällung von CaSO_4 : Gips kann sich in Abhängigkeit der Sulfatkonzentration bis zu einem pH-Wert von etwa 12,8 aus Portlandit bilden (Abbildung 3-64). Bei einem pH-Wert von 12,45 (reine Portlanditlösung ohne zusätzliche Alkalien bei 25 °C) ist eine Sulfatkonzentration von 1400 mg/l nötig, um Gips auszufällen. Je nach Gehalt an Fremdionen kann die Löslichkeit von Gips bei etwa 1500 mg/l liegen (Stark & Wicht 2013). Je basischer der pH-Wert ist, desto höher ist die erforderliche Sulfatkonzentration zur Fällung von Gips. Bei gleichzeitig hohen Kaliumkonzentrationen kommt es nicht zur Gips- sondern zur Syngenitbildung (Stark & Wicht 2013). In den jeweiligen Batchlösungen mit Wässern des Typs S1-3 sind zumindest zu Beginn der Versuche die Sulfatkonzentrationen (1500 mg/l) ausreichend, um eine Gipsausfällung zu begünstigen (vgl. Abbildung 3-78 - Abbildung 3-81). Das Leitungswasser Karlsruhe enthält keine ausreichende Sulfatkonzentration für die Fällung von Gips.
- Neubildung von Ettringit durch einen äußeren Sulfatangriff: Ettringit bildet sich innerhalb eines pH-Wert Bereiches zwischen 10,5 und 13,2 (Müllauer 2013). Nahezu alle gemessenen pH-Werte der Versuchslösungen liegen innerhalb dieses pH-Bereiches. Bei pH 9,5 – 10,7 wandelt sich Ettringit in Gips und Aluminiumhydroxid um (Müllauer 2013). Bei pH-Werten > 13,4 bildet sich zunehmend Monocarbonat und die Ettringitbildung nimmt ab (Bollmann 2000). Die Neubildung von Ettringit kann über den Chemismus der jeweiligen Reaktionslösungen nach Versuchsende nicht konkret nachgewiesen werden.
- für Material 13: Mit zunehmender Versuchsdauer wurden auffallend negative Redox-Werte gemessen (bis ca. -380 mV (NHE), entspricht -590 mV (Ag/AgCl) (vgl. Abbildung 3-65, rechts). Die Proben entwickeln unter diesen Bedingungen einen ausgeprägten H_2S -Geruch. Sinkende Sulfatkonzentrationen mit fortschreitender Versuchsdauer könnten somit auch ein Hinweis für

die Fällung von geringlöslichen Sulfiden sein (siehe Abbildung 3-65, rechts). Das Eh-pH Diagramm ist nur ein Hinweis auf mögliche Reaktionen. Im vorliegenden Fall sind wesentlich mehr Spezies im Elektrolyt enthalten, weshalb sich die Stabilitätsbereiche verschieben können. Zudem werden keine kinetischen Aspekte betrachtet. Aufgrund von Schwefelausfällungen können die Sulfatmessungen durch Säurezugabe ungenau sein.

Abweichende Ca^{2+} - und SO_4^{2-} -Konzentrationen für nicht hydratisierte Proben der Materialien 01 und 07 werden im Kapitel Zementalterung (3.2.4.5.3) näher erläutert.

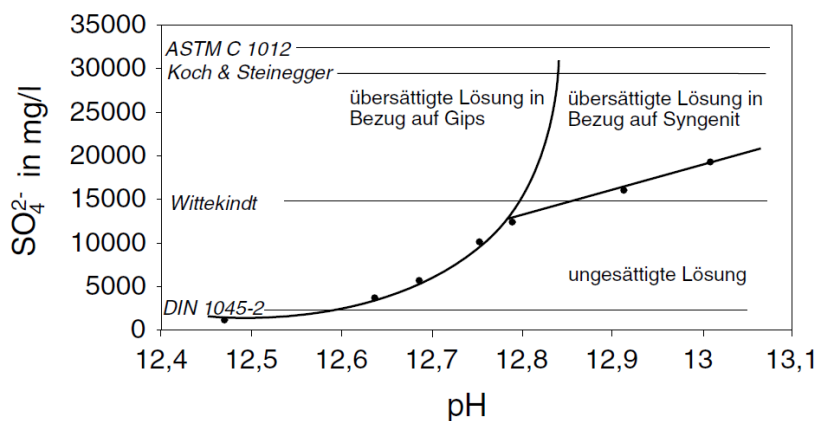


Abbildung 3-64: Für eine Gipsbildung notwendige Sulfatkonzentration in Abhängigkeit des pH-Wertes (Zugabe von K_2SO_4 zu einer Portlanditlösung) (aus Stark & Wicht 2013)

Mg^{2+} ist, bis auf sehr wenige Ausnahmen, nach Versuchsende nicht mehr in der Lösung nachweisbar. Die Fällung in Form eines Sulfates ist unwahrscheinlich, da die Löslichkeit von MgSO_4 in Wasser bei 300 mg/l liegt. Vermutlich wird Mg^{2+} als Hydroxid (Brucit) gefällt, da $\text{Mg}(\text{OH})_2$ mit 9 mg/l eine sehr geringe Löslichkeit in Wasser aufweist. Die gemessenen chemisch-physikalischen Parameter der wässrigen Lösungen liegen im Stabilitätsbereich von $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (siehe Abbildung 3-65). Brucit entsteht durch die Reaktion von Portlandit mit einer magnesiumsulfathaltigen Lösung (Stark & Wicht 2013):

Die elektrochemischen Daten (Abbildung 3-68, Abbildung 3-71, Abbildung 3-74, Abbildung 3-77) zeigen für alle durchgeführten Versuche die gleichen Tendenzen. Die elektrochemischen Parameter der jeweiligen Ausgangslösungen sind Tabelle 3-26 zu entnehmen. Generelle Aussagen sind:

- Sofortiger Anstieg des pH-Wertes nach Zugabe der entsprechenden Reaktionslösung (Hinweis auf Beginn/Fortsetzung des Hydratationsprozesses) und weiterer Anstieg im Versuchsverlauf
- Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit (Ionen gehen in Lösung)
- Die Werte für das Redoxpotential fallen innerhalb des Versuchszeitraumes ab (teilweise kein stetiger, sondern eher chaotischer Verlauf) und liegen nach Versuchsende im negativen Bereich (Messung gegen Ag/AgCl)

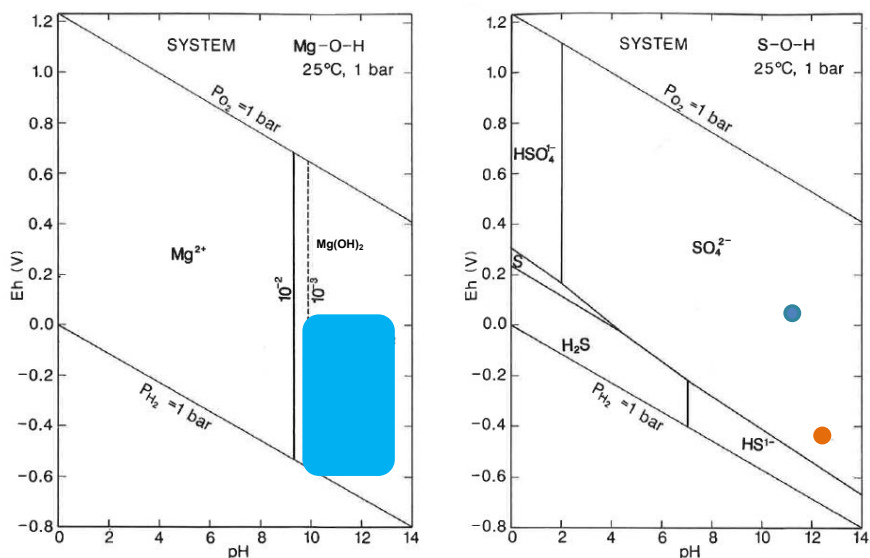


Abbildung 3-65: Eh-pH-Diagramme (Brookins 1988): links: System Mg-O-H, innerhalb des hellblau markierten Bereichs befinden sich die gemessenen Parameter aller Versuche; rechts: System S-O-H (blauer Punkt: markiert den Eh-pH-Wert nach 1 d Reaktionszeit (Material 13 hydratisiert in Lösung Typ S1), orange gefärbter Punkt zeigt den Eh-pH-Wert am Versuchsende nach 56 d an

Tabelle 3-26: Elektrochemische Parameter der Ausgangslösungen (Durchschnitt aus 10 Einzelmessungen)

Ausgangslösung	pH	LF [mS/cm]	Eh [mV] (Ref.:Ag/AgCl)
Leitungswasser KA	7,44	0,710	200
S1	8,48	4,35	157
S2	7,78	2,91	151
S3	6,89	2,38	230

Tabelle 3-27: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Kationen- und Anionen-Konzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen im Zeitraum von 56 d (n. hydr. = nicht hydratisierte Proben; hydr. = 28 d hydratisierte Proben; für $C/C_0 > 10$ wird $\gg 1$ verwendet, n. = nach)

Anion/ Kation	LW C/C ₀		S1 C/C ₀		S2 C/C ₀		S3 C/C ₀	
	n. hydr.	hydr.	n. hydr.	hydr.	n. hydr.	hydr.	n. hydr.	hydr.
Na⁺								
01	> 1	> 1	± 1	± 1	≥ 1	± 1	≫ 1	> 1
07	> 1	> 1	± 1	± 1	> 1	± 1	≫ 1	≫ 1
13	≫ 1	> 1	± 1	≥ 1	> 1	≥ 1	≫ 1	≫ 1
16	≫ 1	≫ 1	> 1	≥ 1	> 1	≥ 1	≫ 1	≫ 1
K⁺								
01	≫ 1	≫ 1	> 1	± 1	> 1	> 1	≫ 1	≫ 1
07	≫ 1	≫ 1	± 1	± 1	> 1	> 1	≫ 1	≫ 1
13	> 1	± 1	± 1	> 1	> 1	> 1	≫ 1	≫ 1
16	≫ 1	± 1	± 1	± 1	> 1	> 1	≫ 1	≫ 1
Ca²⁺								
01	> 1	> 1	≫ 1	≫ 1	> 1	± 1	≫ 1	≫ 1
07	> 1	± 1	≫ 1	≫ 1	n. 14d < 1	≤ 1	≫ 1	> 1
13	≥ 1	> 1	≫ 1	≫ 1	n. 14d < 1	n. 5d < 1	≫ 1	> 1
16	≫ 1	≫ 1	≫ 1	≫ 1	> 1	< 1	> 1	> 1
Mg²⁺								
01	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
07	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
13	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
16	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
SO₄²⁻								
01	n. 1d < 1	< 1	± 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
07	>1/ < 1	≥ 1	< 1	≤ 1	n. 14d < 1	< 1	≤ 1	< 1
13	>1/ < 1	≥ 1	≤ 1	< 1	n. 14d < 1	< 1	≤ 1	< 1
16	< 1	± 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cl⁻								
01	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1
07	≥ 1	> 1	> 1	> 1	≤ 1	> 1	> 1	> 1
13	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1
16	± 1	± 1	> 1	> 1	≥ 1	> 1	± 1	± 1

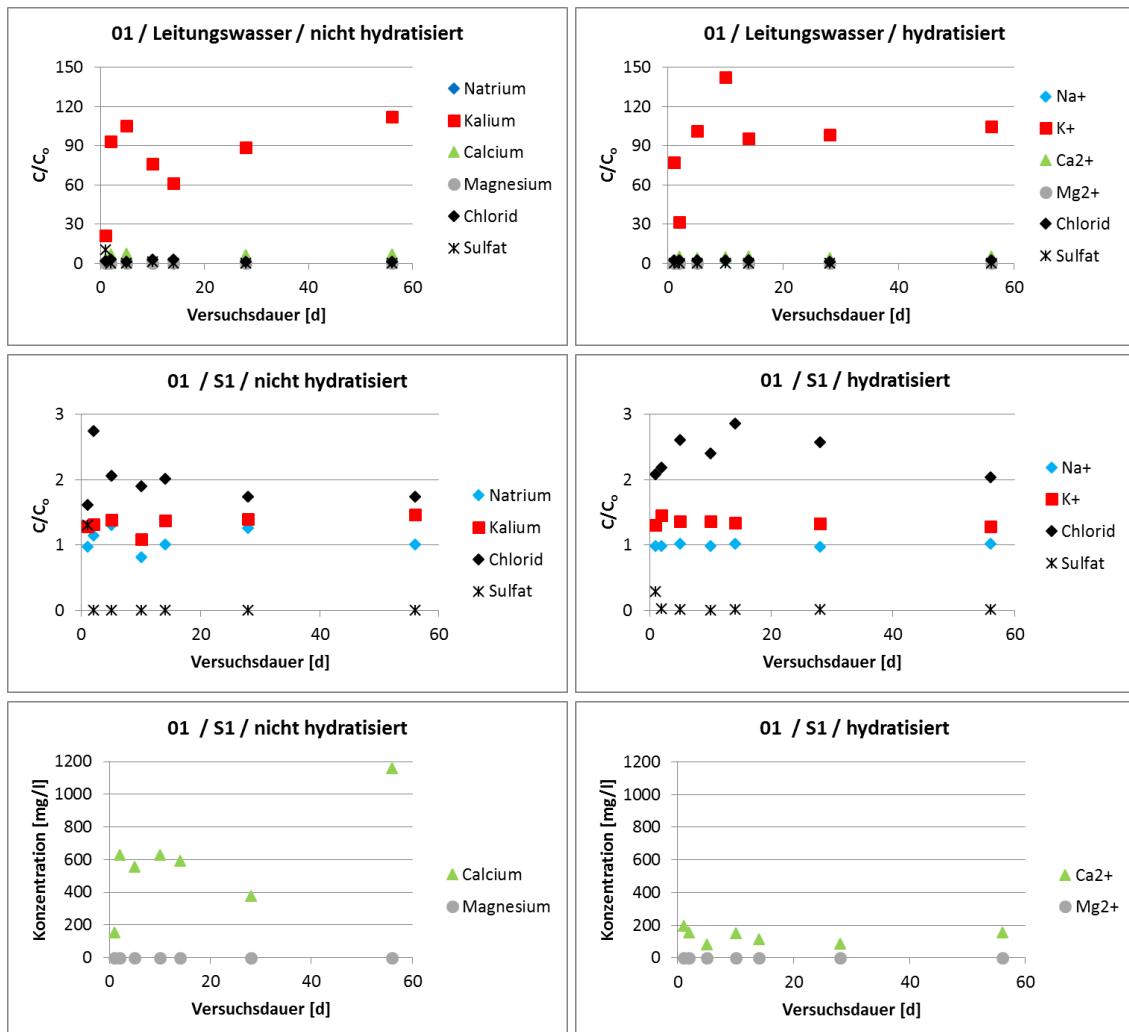


Abbildung 3-66: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 01 für Leitungswasser und Reaktionslösung S1

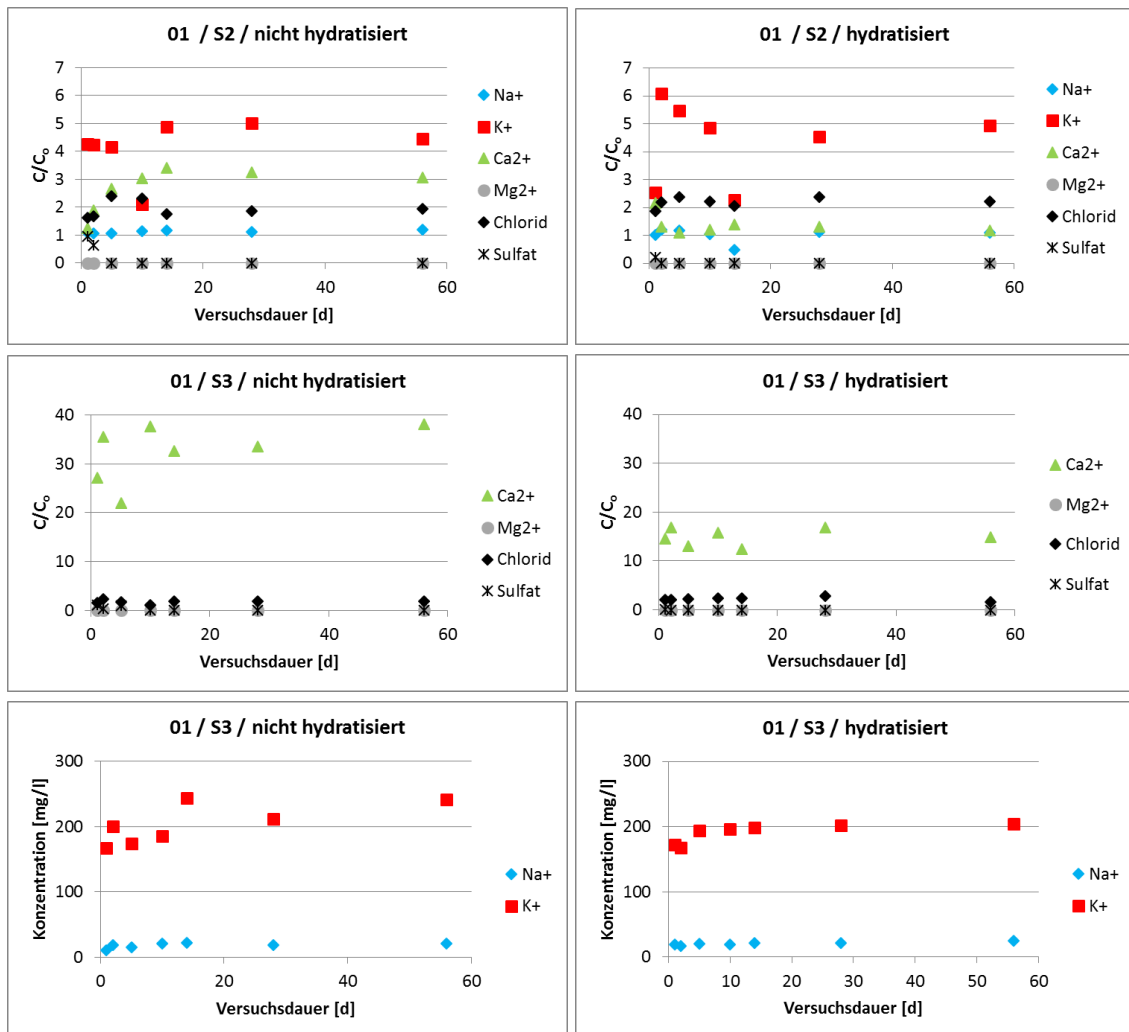


Abbildung 3-67: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 01 für die Reaktionslösungen S2 und S3

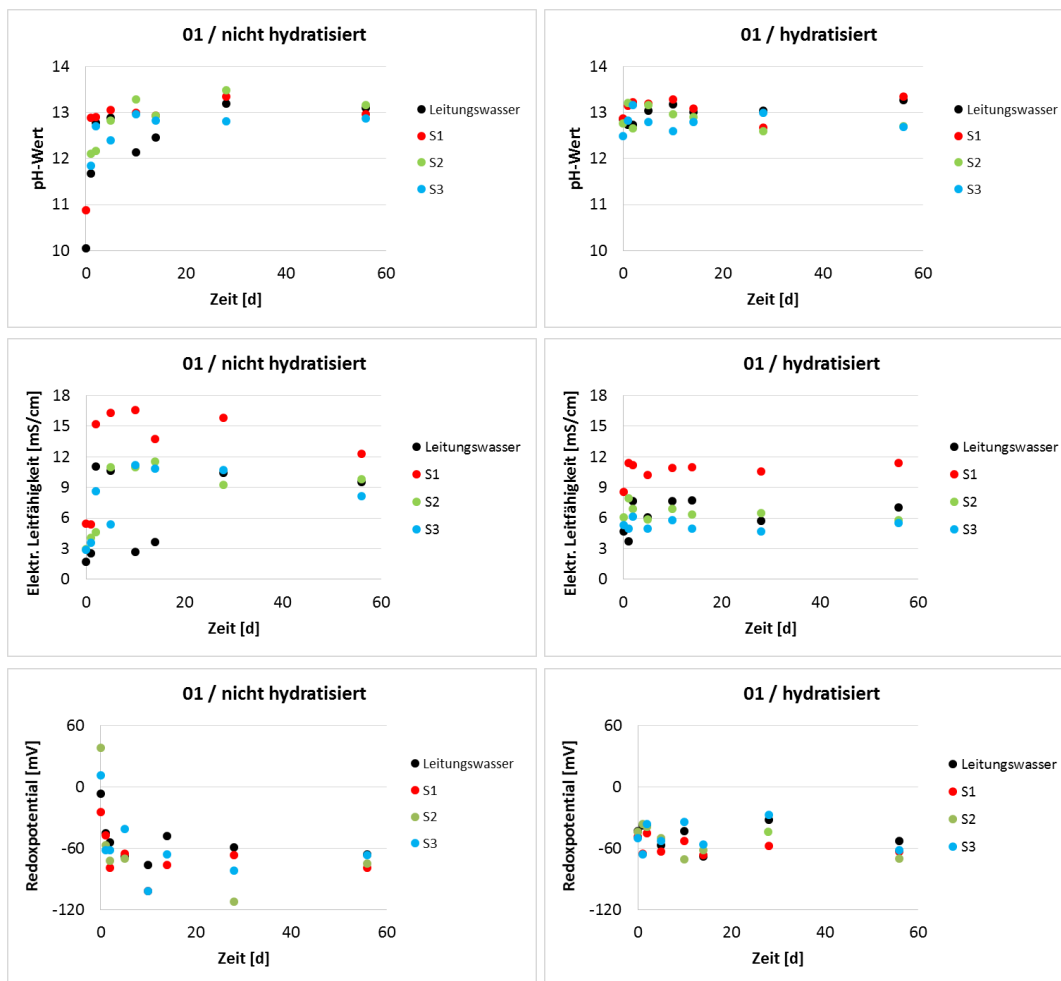


Abbildung 3-68: Vergleich der elektrochemischen Parameter nicht hydratisierter und hydratisierter Proben von Material 01 aus Versuchen mit den entsprechenden Reaktionslösungen

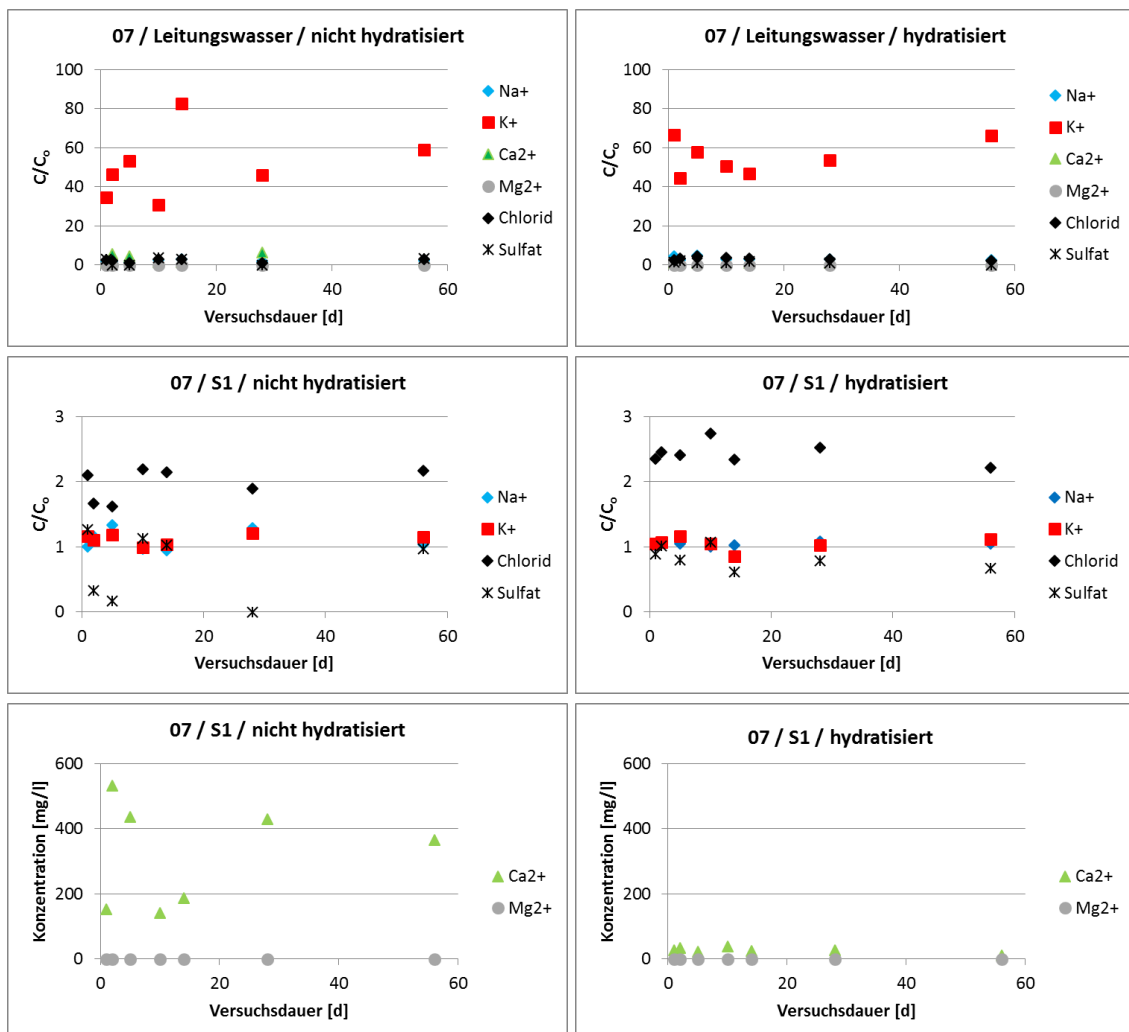


Abbildung 3-69: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 07 für Leitungswasser und Reaktionslösung S1

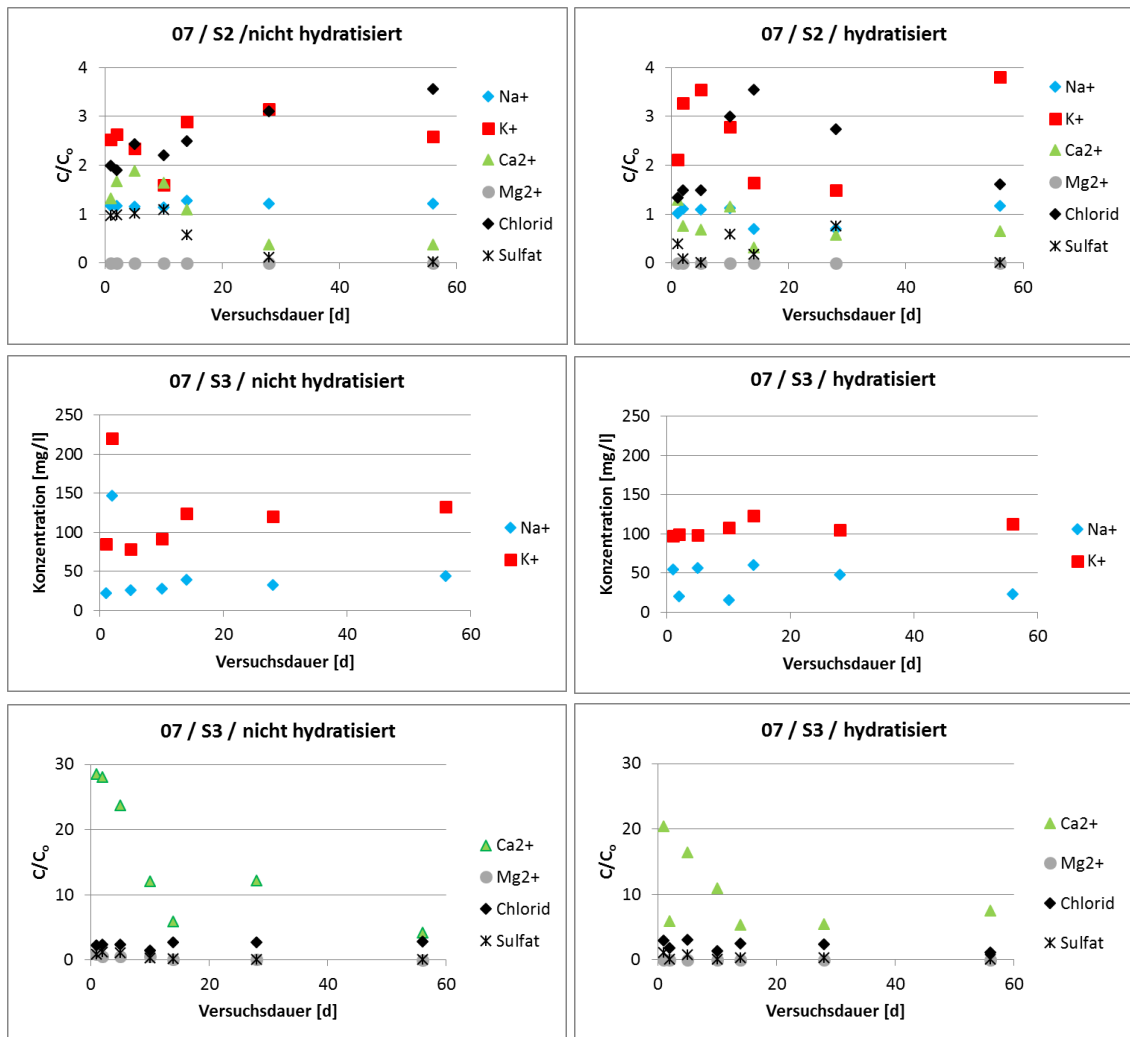


Abbildung 3-70: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 07 für die Reaktionslösungen S2 und S3

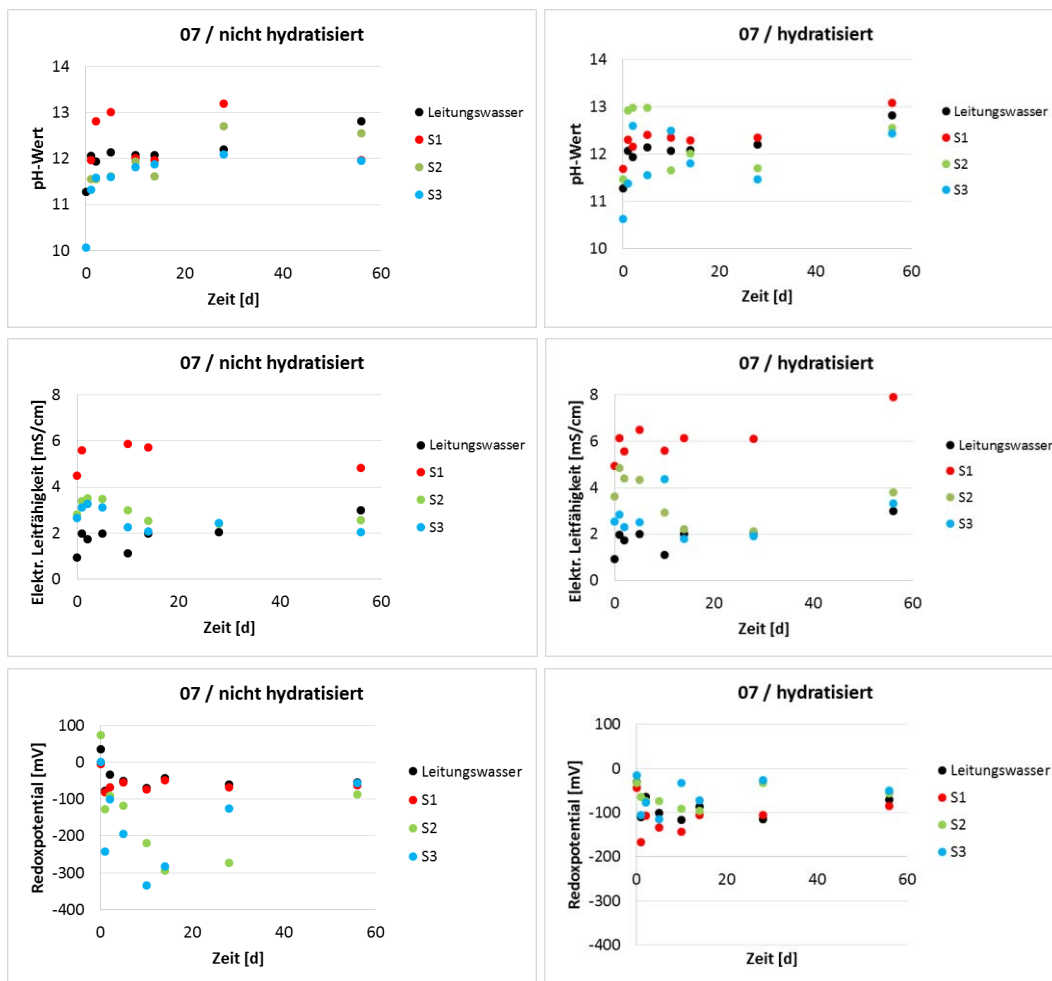


Abbildung 3-71: Vergleich der elektrochemischen Parameter nicht hydratisierter und hydratisierter Proben von Material 07 aus Versuchen mit den entsprechenden Reaktionslösungen

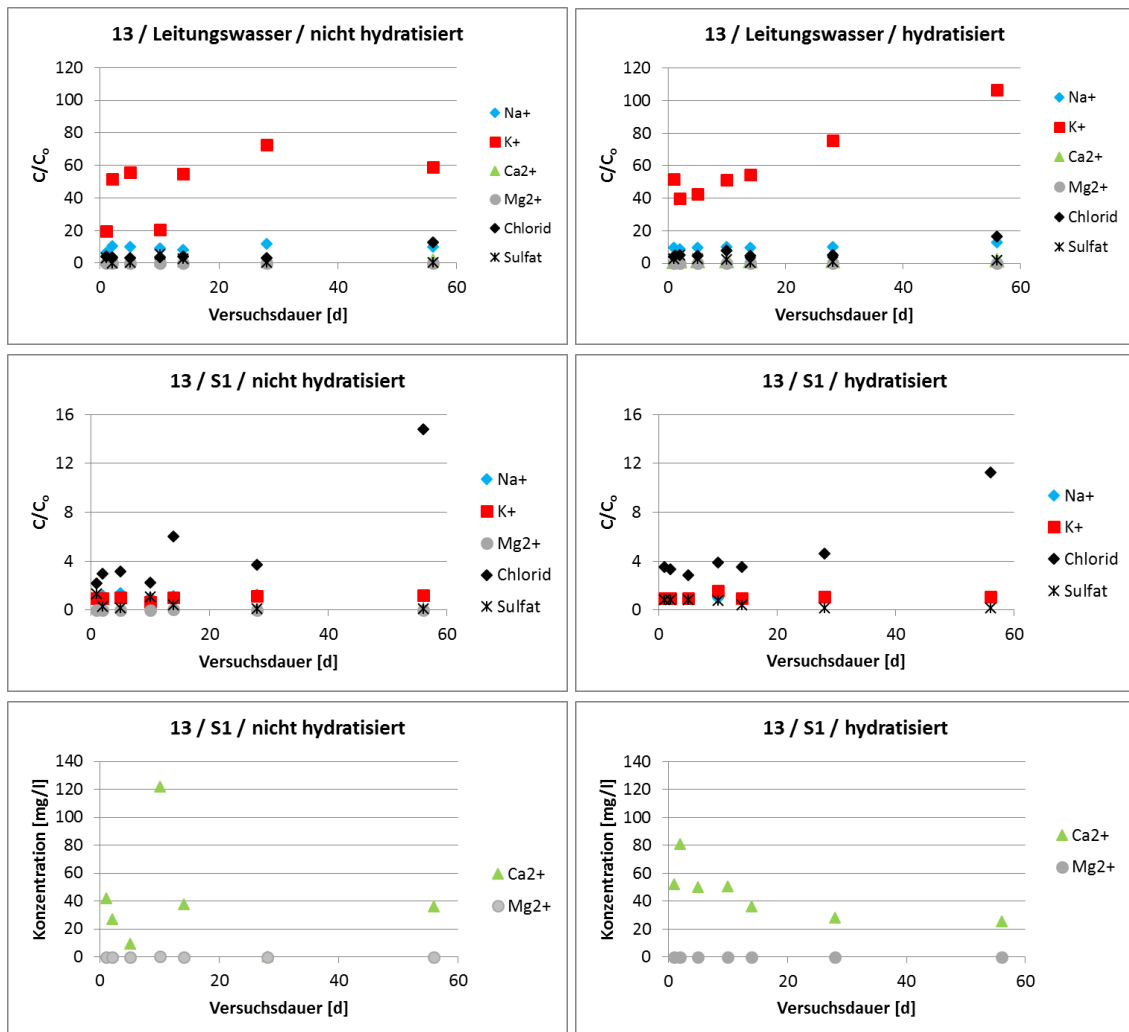


Abbildung 3-72: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 13 für Leitungswasser und Reaktionslösung S1

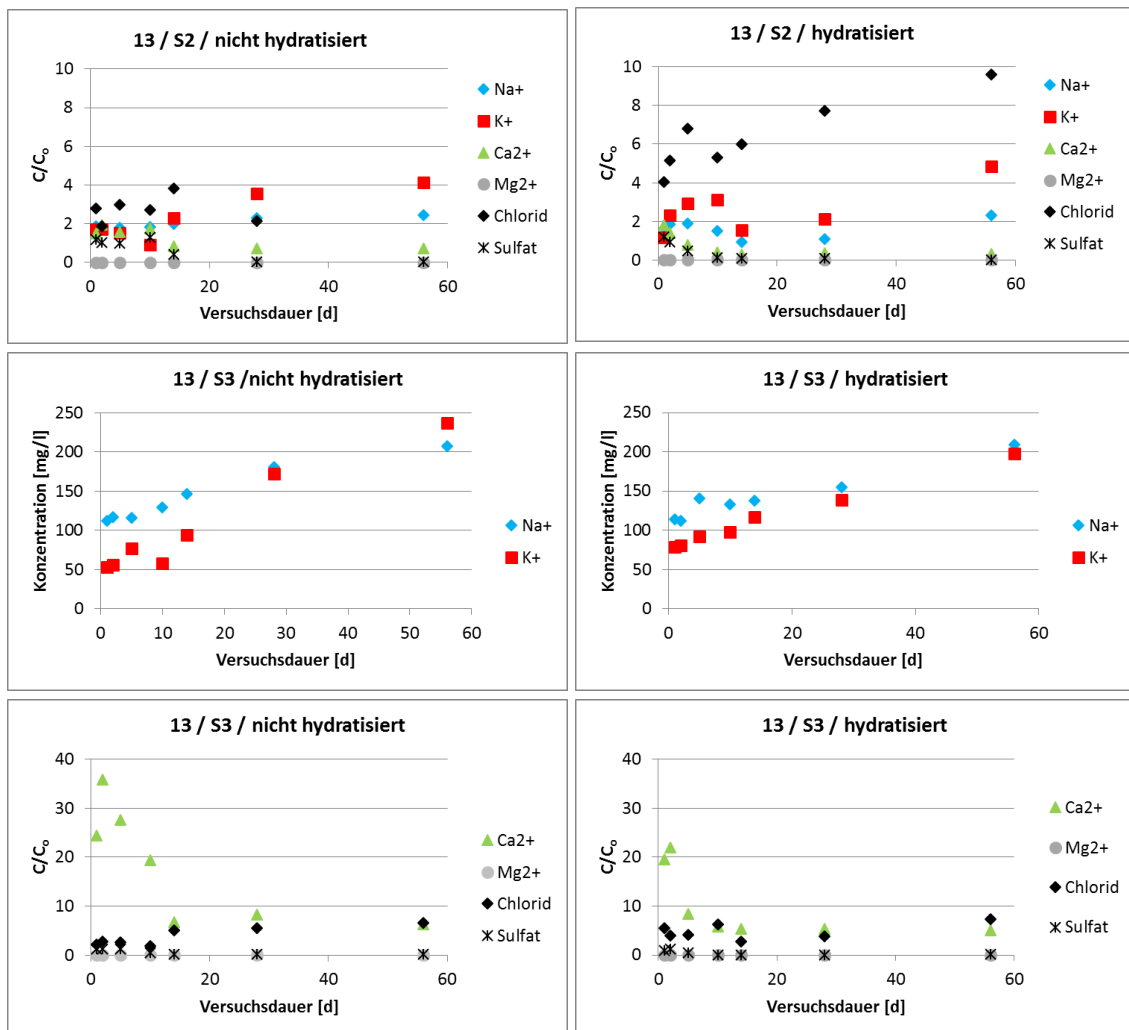


Abbildung 3-73: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 13 für die Reaktionslösungen S2 und S3

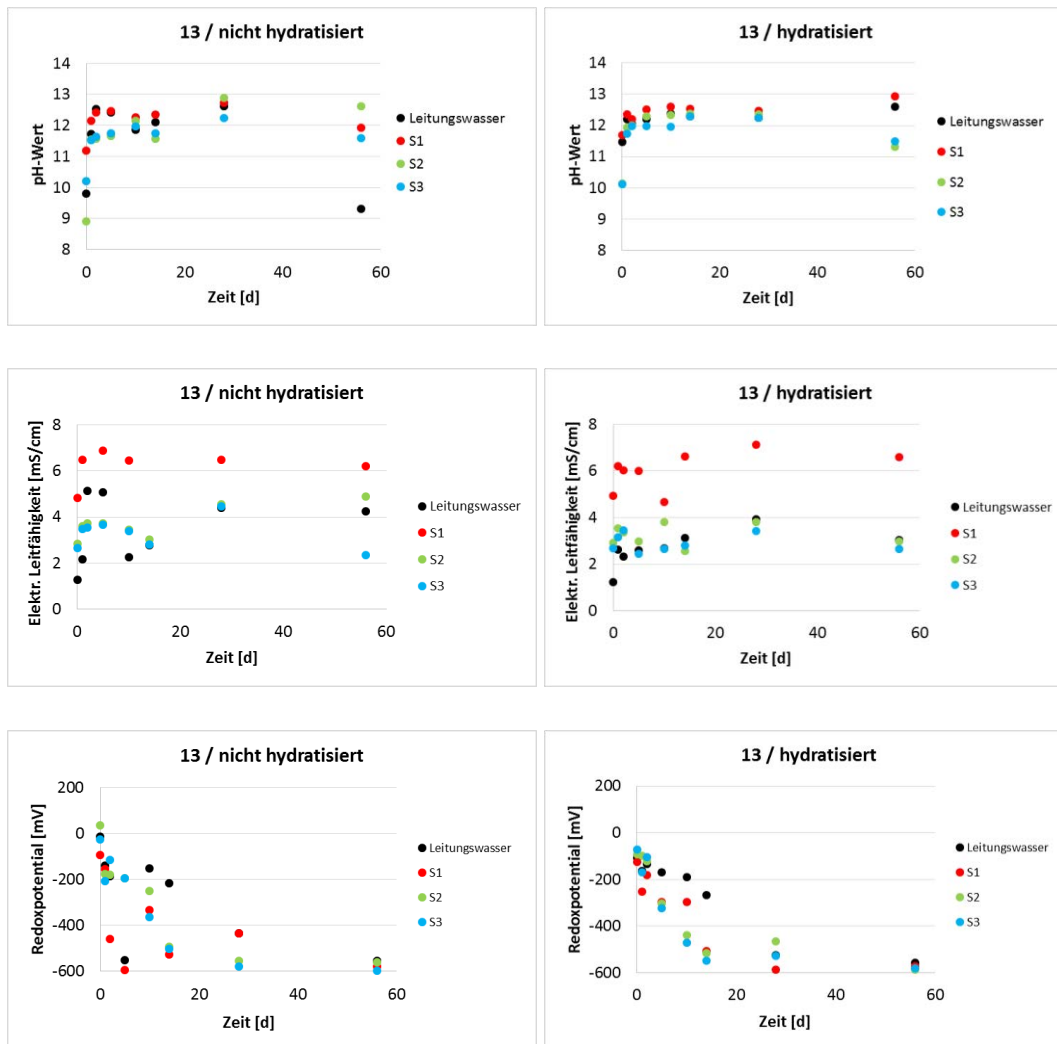


Abbildung 3-74: Vergleich der elektrochemischen Parameter nicht hydratisierter und hydratisierter Proben aus Versuchen mit Material 13 und den entsprechenden Reaktionslösungen

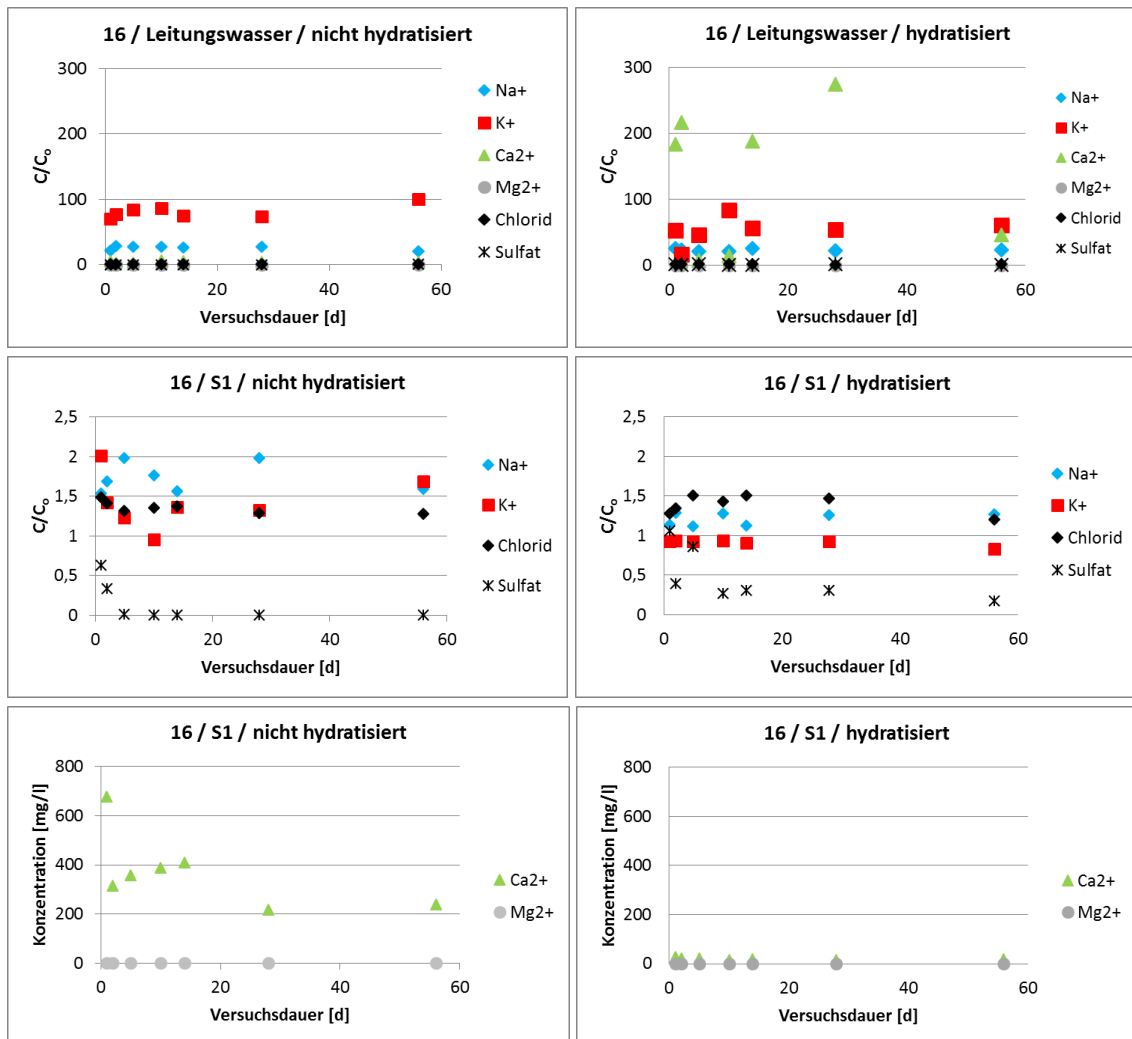


Abbildung 3-75: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 16 für Leitungswasser und Reaktionslösung S1

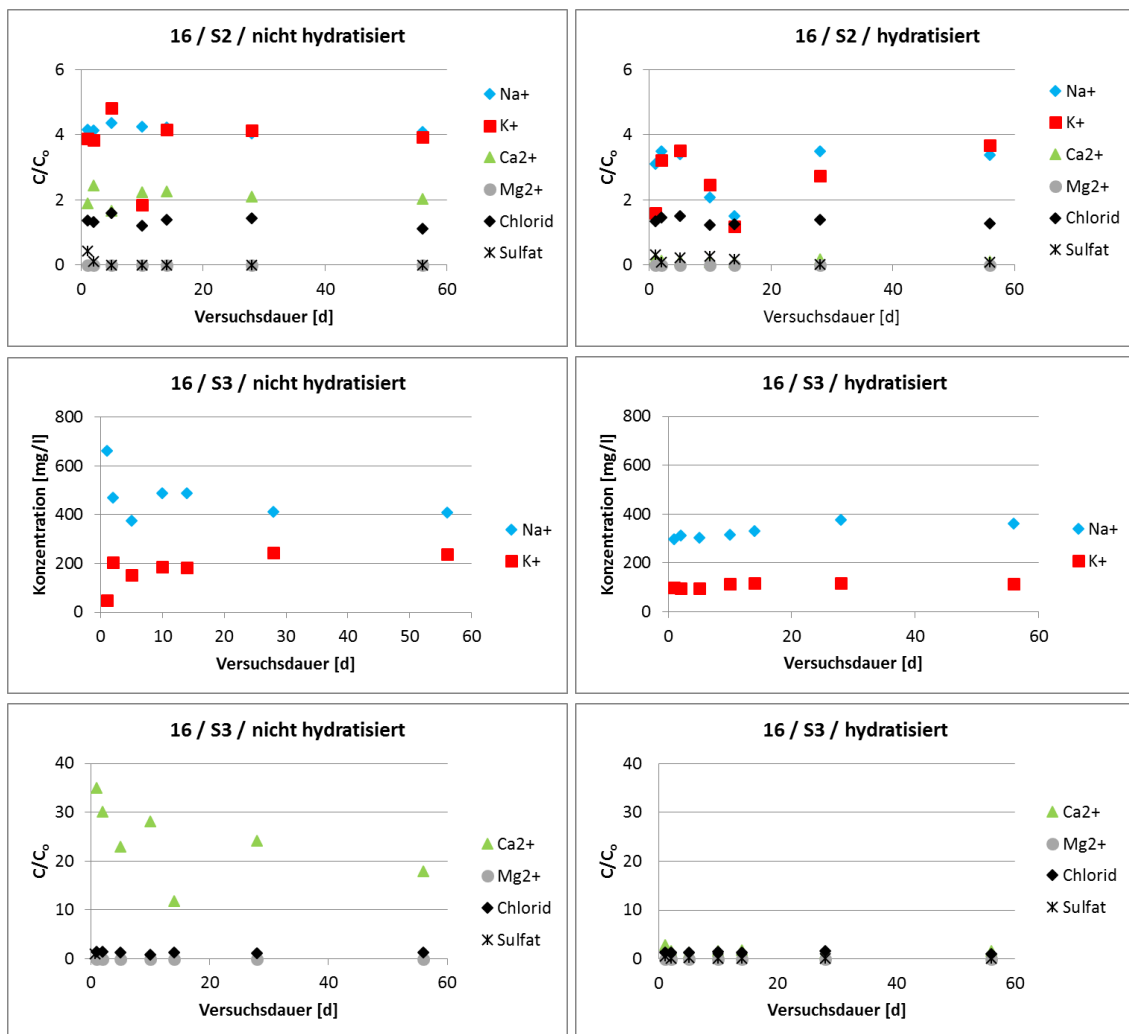


Abbildung 3-76: Vergleich der Änderung der Anionen-/Kationenkonzentrationen von nicht hydratisierten und hydratisierten Proben von Material 16 für die Reaktionslösungen S2 und S3

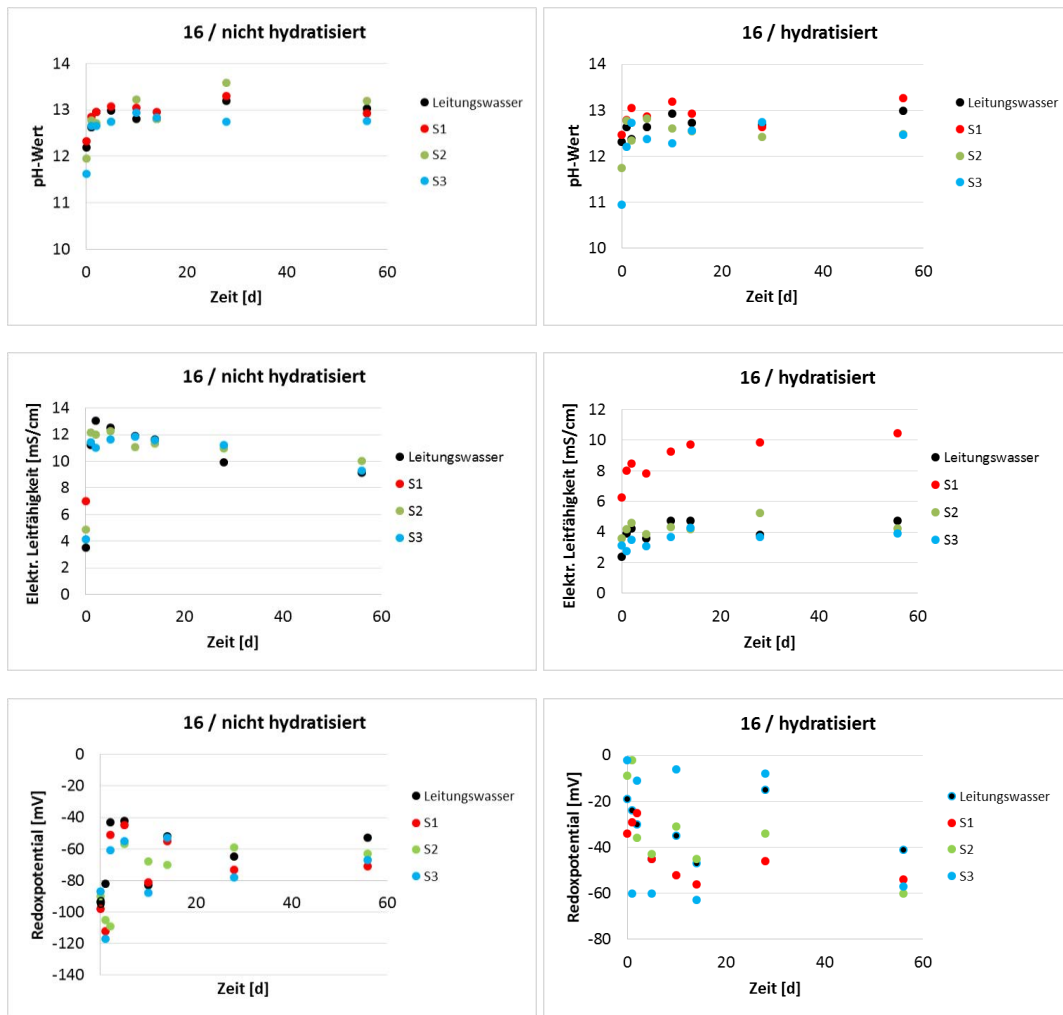


Abbildung 3-77: Vergleich der elektrochemischen Parameter nicht hydratisierter und hydratisierter Proben aus Versuchen mit Material 16 und den entsprechenden Reaktionslösungen

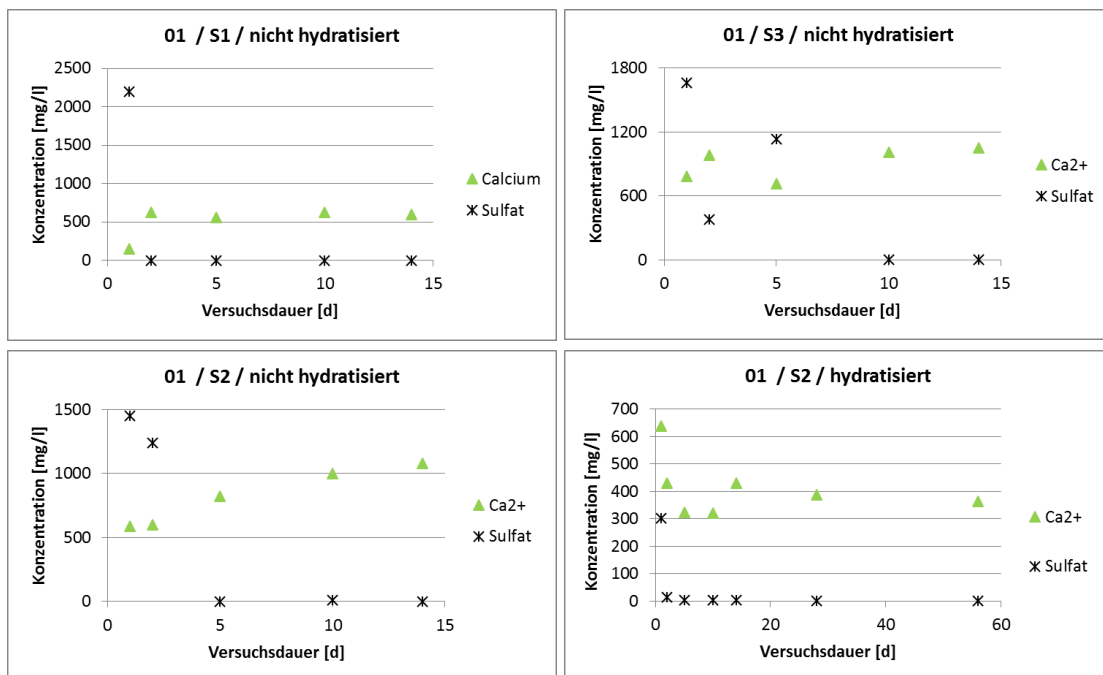


Abbildung 3-78: Korrelation der Ca²⁺- und Sulfationenkonzentration für Material 01; Mögliche Gipsausfällung durch Überschreiten des Löslichkeitsprodukts von etwa 2000 mg/l zu Versuchsbeginn

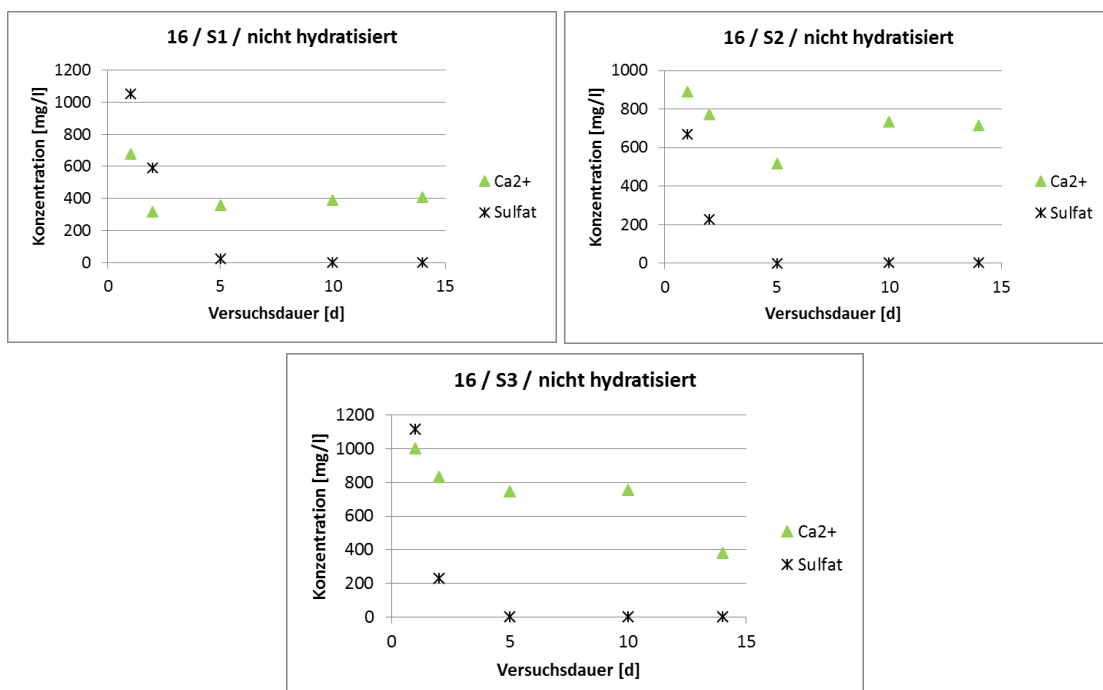


Abbildung 3-79: Korrelation der Ca²⁺- und Sulfationenkonzentration für Material 16; Mögliche Gipsausfällung durch Überschreiten des Löslichkeitsprodukts von etwa 2000 mg/l zu Versuchsbeginn

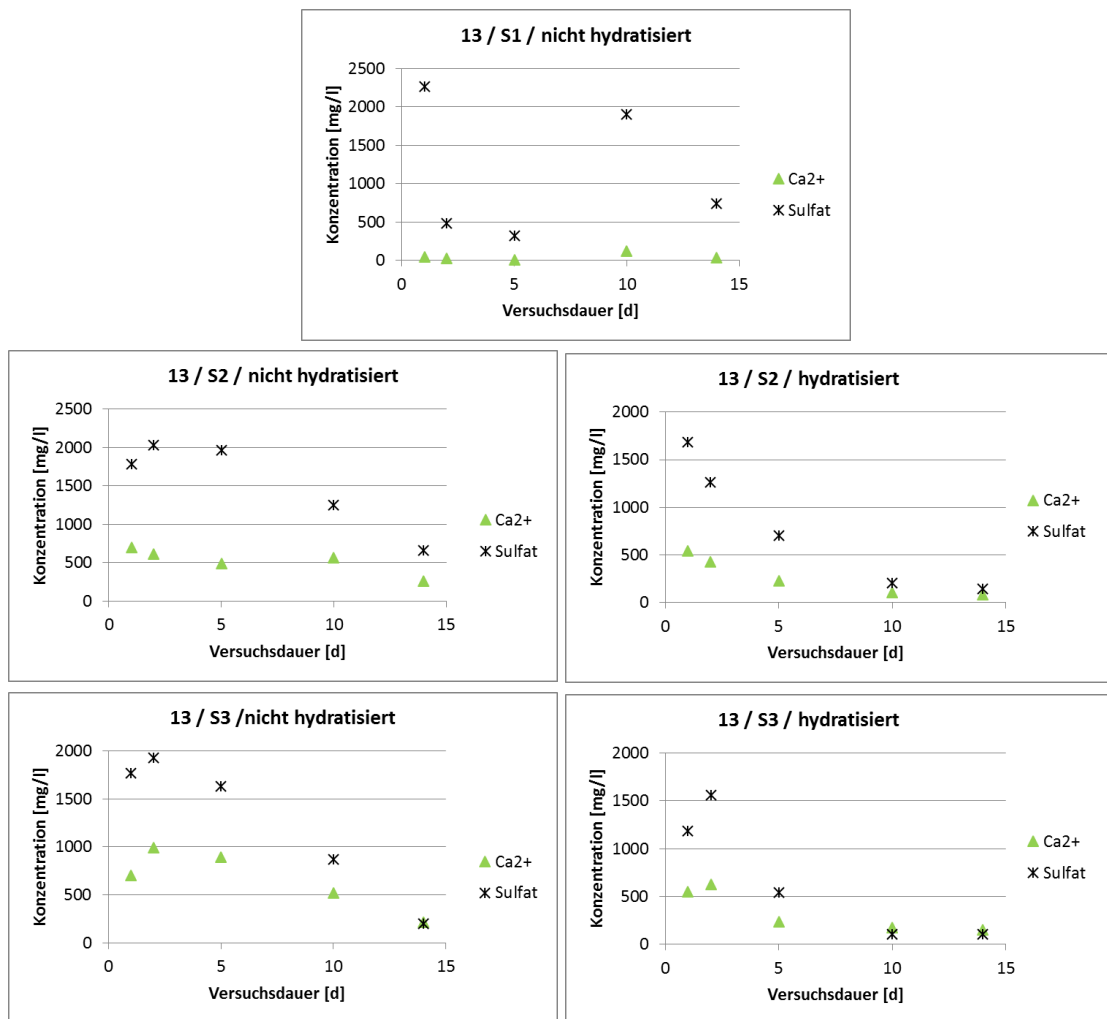


Abbildung 3-80: Korrelation der Ca²⁺- und Sulfationenkonzentration für Material 13; Mögliche Gipsausfällung durch Überschreiten des Löslichkeitsprodukts von etwa 2000 mg/l zu Versuchsbeginn

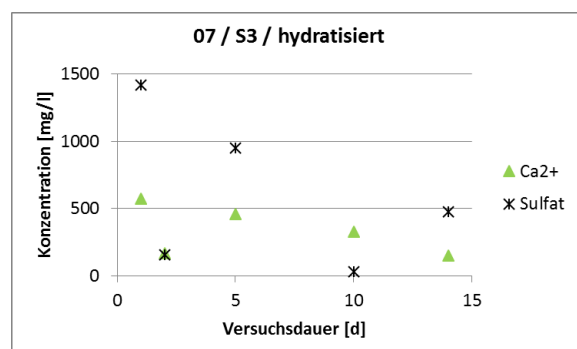


Abbildung 3-81: Korrelation der Ca²⁺- und Sulfationenkonzentration für Material 07; Mögliche Gipsausfällung durch Überschreiten des Löslichkeitsprodukts von etwa 2000 mg/l zu Versuchsbeginn

3.2.4.4.2. XRD (Feststoffproben)

Anzeichen für einen äußeren Sulfatangriff ist die Neubildung von Mineralen wie Ettringit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$), Gips ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Thaumasit ($\text{CaSiO}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaCO}_3\cdot 15\text{H}_2\text{O}$) oder Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (Stark & Wicht 2013). Gips und Ettringit können bereits primär im Zement enthalten sein, aber auch durch einen äußeren Sulfatangriff sekundär gebildet werden. Thaumasit hingegen wird nur durch einen äußeren Sulfatangriff gebildet.

Hinsichtlich der Untersuchung der Neubildung von Sulfatmineralen sind die Röntgendiffraktogramme der Materialien 01, 07, 13 und 16 der nicht hydratisierten Proben in Abbildung 3-82 - Abbildung 3-85 und der hydratisierten Proben in Abbildung 3-86 - Abbildung 3-89 für die jeweiligen Reaktionslösungen vergleichend dargestellt. Die Initialproben wurden, im Gegensatz zur jeweiligen unbehandelten Probe, zur besseren Vergleichbarkeit für etwa 2 min. mit der jeweiligen Reaktionslösung versetzt und getrocknet. Aufgrund der großen Probenanzahl wurden lediglich die Materialien der Versuche mit einer Dauer von 56 d geröntgt. Vollständig ausgewertete Röntgendiffraktogramme befinden sich auf einer separaten Daten-CD.

Die in den Röntgendiffraktogrammen nachgewiesenen Haupt-Mineralphasen der untersuchten unbehandelten Proben zeigt Tabelle 3-28. Im Wesentlichen konnten Calcit und Quarz (Proben 01, 07, 16), untergeordnet Gips sowie durch die Hydratation gebildeten Portlandit festgestellt werden. Für Probe 13 erwies sich der Graphit-Peak als dominant. Die in den Hinterfüllmassen enthaltenen hydratisierten Zementphasen (C-S-H Phasen) sind röntgenamorph und konnten somit nicht erfasst werden.

Tabelle 3-28: Mittels Pulverpräparaten im XRD nachgewiesenen Haupt-Mineralphasen (Ausgangsmaterial, nicht hydratisierte und hydratisierte Proben)

Probe (hydratisiert)	Mineralphasen	Bemerkung
01	Quarz, Calcit	
07	Quarz, Calcit	Gips in sehr geringen Mengen
13	Calcit, Graphit	Graphit überlagert andere Peaks
16	Quarz, Calcit; Orthoklas	Der mit 10% enthaltene Montmorillonit konnte nicht nachgewiesen werden

Nicht hydratisierte Proben

Eine Neubildung von Ettringit oder eine Thaumasitbildung konnte in keiner der untersuchten Proben festgestellt werden. Lediglich Material 01 zeigte nach 56 d Versuchsdauer in allen Reaktionslösungen eine schwache Gipsbildung. Der große Gips-Peak für Leitungswasser erscheint im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen wenig realistisch und wird als Messfehler interpretiert. Gips wird durch die Reaktion mit Portlandit gebildet, welcher während des Hydratationsprozesses entsteht.

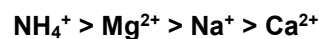
Hydratisierte Proben

Beim Vergleich der Röntgendiffraktogramme fällt auf, dass der, in den unbehandelten Proben 01, 07 und 16 enthaltene Portlandit, nach kurzer Kontaktzeit mit der jeweiligen Reaktionslösung (Initialproben) nicht mehr nachweisbar ist (z.B. Abbildung 3-86). Die Lösung des Portlandits kann auf zwei Reaktionsprozesse hindeuten, welche im vorliegenden Fall auch gleichzeitig ablaufen können:

- Lösung infolge Untersättigung der Batchlösung
- Äußerer Sulfatgriff (Umwandlung zu Ettringit, Gips...)

Die Neubildung von Ettringit konnte für alle untersuchten Materialien, welche mit Wasser des Typs S2 versetzt wurden, nach 56 d Versuchszeit nachgewiesen werden. Für Versuche mit Wasser des Typs S3 zeigen Material 01 und 07 ebenfalls eine Neubildung von Ettringit. Die kleinen Peak-Höhen zeigen, dass die neugebildete Ettringitmenge gering ist. Dies könnte mit der begrenzten Probenmenge und Probenlösung der Batchversuche sowie der Versuchsdauer in Zusammenhang stehen. Da sich Ettringit in Abhängigkeit der Zusammensetzung der jeweiligen Reaktionslösung sekundär neu bildet (Tabelle 3-29), wird davon ausgegangen, dass diese Neubildung einem äußeren Sulfatgriff gleichkommt. Für Leitungswasser und Wasser des Typs S1 konnte keine eindeutige Ettringitbildung festgestellt werden.

Die schädigende Wirkung eines äußeren Sulfatgriffes auf Zement ist neben der Sulfatkonzentration auch von der Art der vorliegenden Sulfate abhängig. Nach Stark & Wicht (2013) nimmt die Wirkung der Kationen mit folgender Reihenfolge ab:



In Tabelle 3-29 sind die für einen Sulfatgriff relevanten Ionen der entsprechenden Reaktionslösungen und deren Konzentrationen dargestellt. Proben, welche eine Neubildung von Ettringit aufweisen, sind den jeweiligen Reaktionslösungen zugeordnet.

Tabelle 3-29: Zusammenhang der chemischen Zusammensetzung der eingesetzten Reaktionslösungen in Bezug auf relevante Kationen/Anionen für einen Sulfatgriff und für eine Neubildung von Ettringit in den hydratisierten Proben

Ionen/ Wasser Typ	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Ettringit Neubildung (Versuchsdauer: 56 d):
LW	112	10	11	56	Nicht nachweisbar
S1	-	-	750	1500	Nicht nachweisbar
S2	327	190	115	1500	01, 07, 13, 16
S3	28	380	-	1500	01, 07

Wie aus Tabelle 3-29 hervorgeht, zeigt das Wasser des Typs S2 mit den hohen Gehalten an Ca²⁺-, Mg²⁺-, Na⁺- und Sulfat das höchste Angriffspotential. Obwohl die Reaktionslösung S1 hohe Na⁺- und Sulfat-Konzentrationen aufweist, ist das Angriffspotential, zumindest innerhalb des gewählten Versuchszeitraumes, gering. Reaktionslösung S3 enthält im Gegensatz zu S1 neben

Sulfat zwei Erdalkalien. Für die Materialien 01 und 07 konnte hier eine Ettringit Neubildung festgestellt werden. Für Versuche mit Karlsruher Leitungswasser konnte aufgrund des geringen Sulfatgehaltes bei keinem der eingesetzten Materialien ein äußerer Sulfatangriff festgestellt werden. Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) konnte in keiner der untersuchten Feststoffproben nachgewiesen werden, obwohl die Vermutung nahe liegt, dass Mg^{2+} in Form von Brucit aus der wässrigen Lösung gefällt wird (vgl. Abbildung 3-65). Ebenso ist auch keine Zunahme an Gips röntgenographisch ermittelbar, welches ebenfalls als Fällungsprodukt vorliegen könnte. Eventuell liegt der Gehalt an beiden Mineralen in den jeweiligen Feststoffproben unterhalb der Nachweisgrenze.

Zur Ermittlung der zeitabhängigen Neubildung von Ettringit wurden hydratisierte Proben der Materialien 01, 07, 13 und 16 mit Wasser des Typs S2 nach einer Versuchsdauer von 28 d röntgenographisch untersucht und vergleichend zu den Ergebnissen der entsprechenden Initialproben und Proben nach 56-tägiger Batchdauer dargestellt (Abbildung 3-90, Abbildung 3-91). Hieraus wird ersichtlich, dass für die meisten Proben der Ettringitpeak nach 56 d deutlicher zu erkennen ist (Material 01 und 07) bzw. erst erkennbar wird (Material 16). Bei Material 13 ist der Ettringitpeak nach 28 d Versuchszeit am deutlichsten zu erkennen.

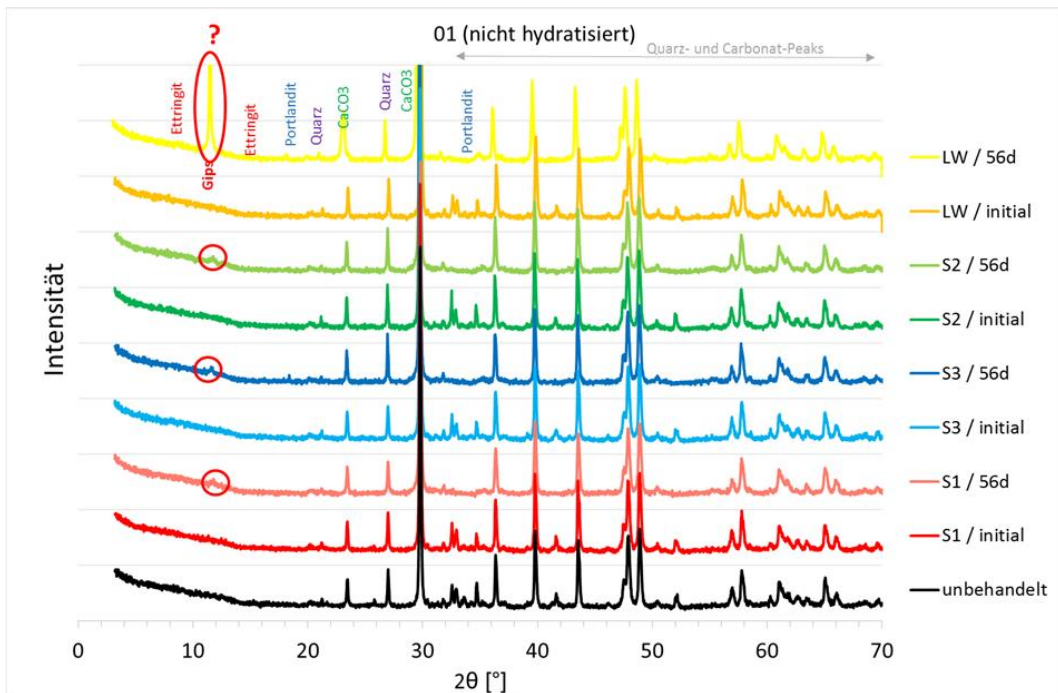


Abbildung 3-82: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 01 (nicht hydratisiert)

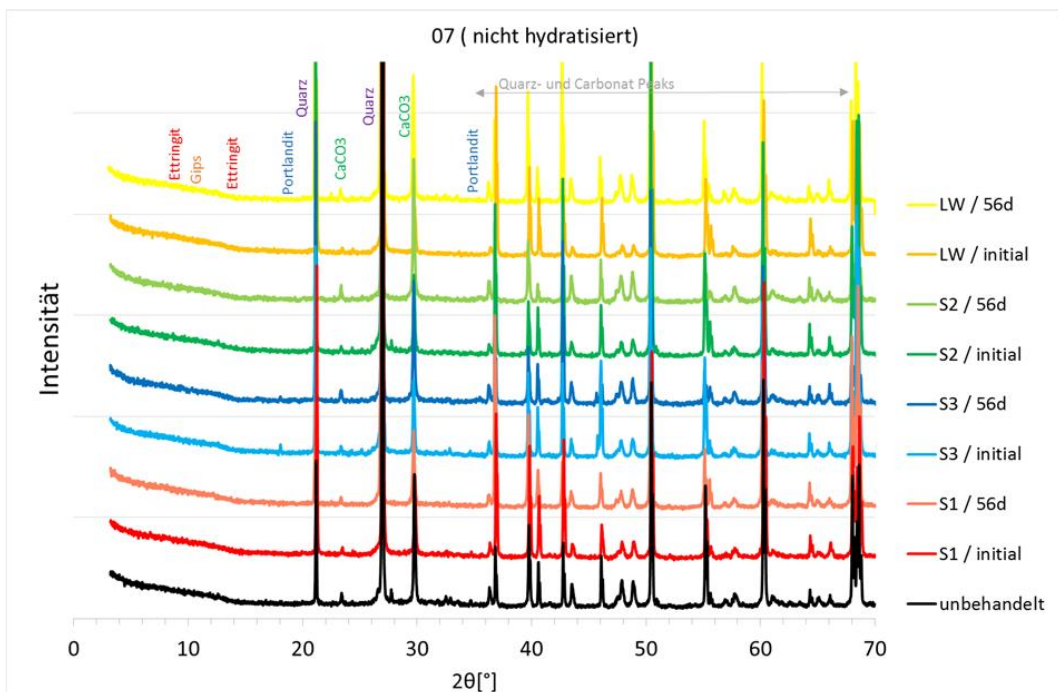


Abbildung 3-83: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 07 (nicht hydratisiert)

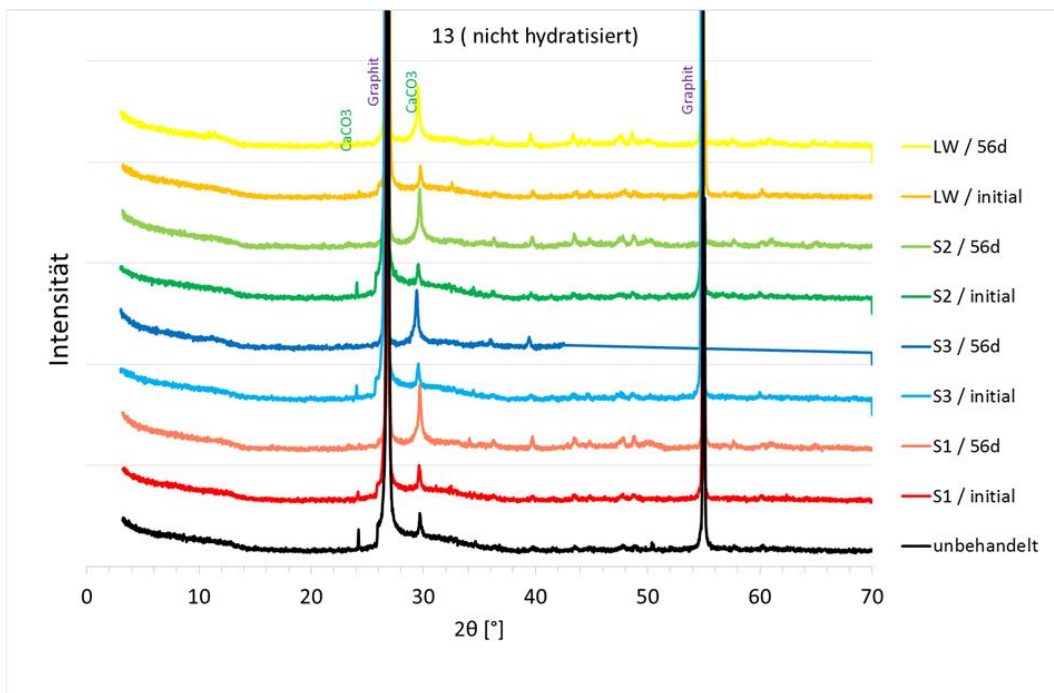


Abbildung 3-84: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 13 (nicht hydratisiert)

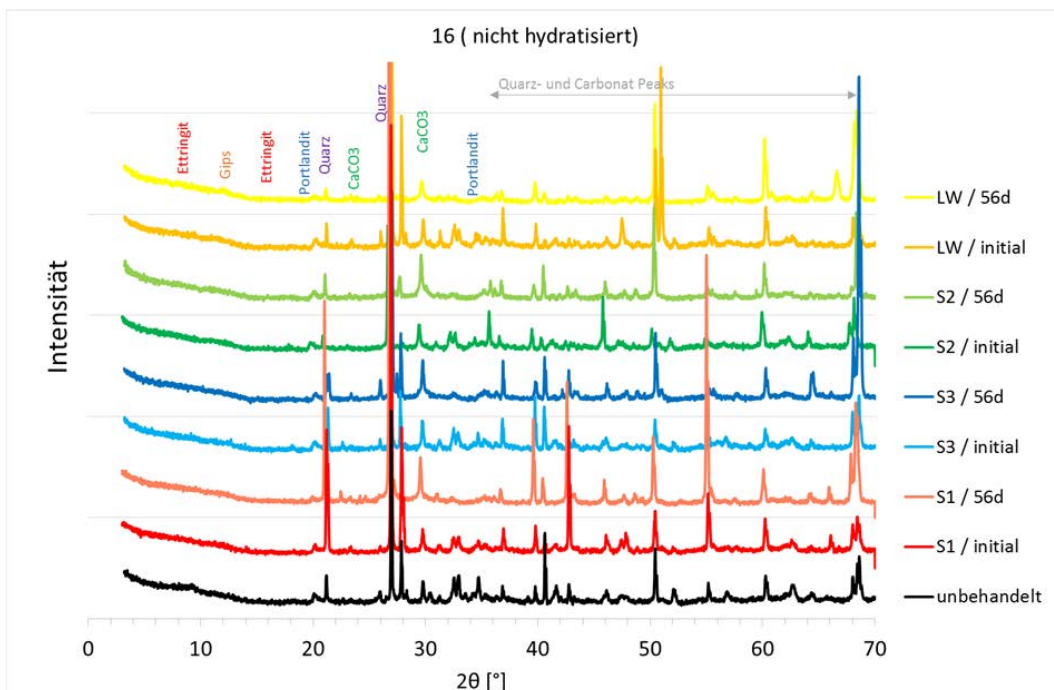


Abbildung 3-85: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 16 (nicht hydratisiert)

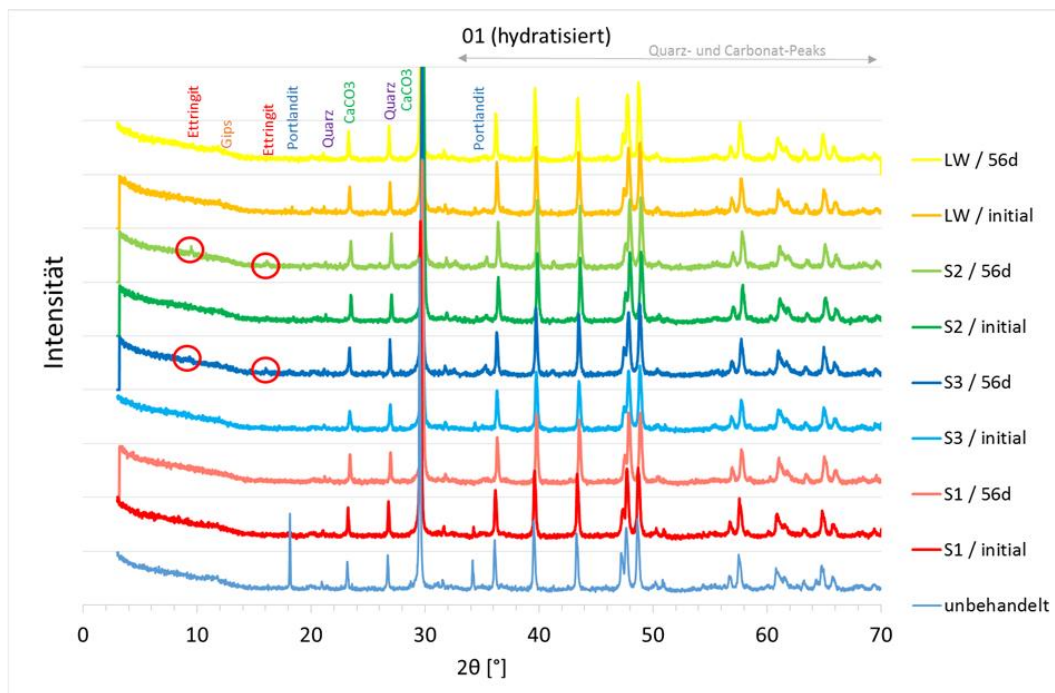


Abbildung 3-86: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 01 (hydratisiert)

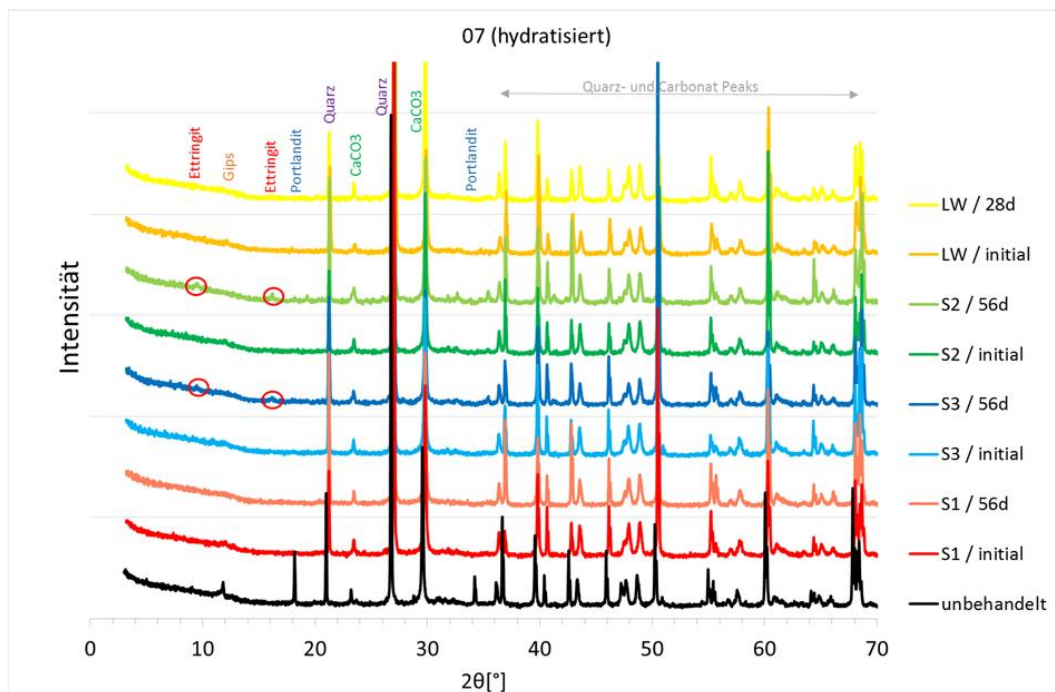


Abbildung 3-87: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 07 (hydratisiert)

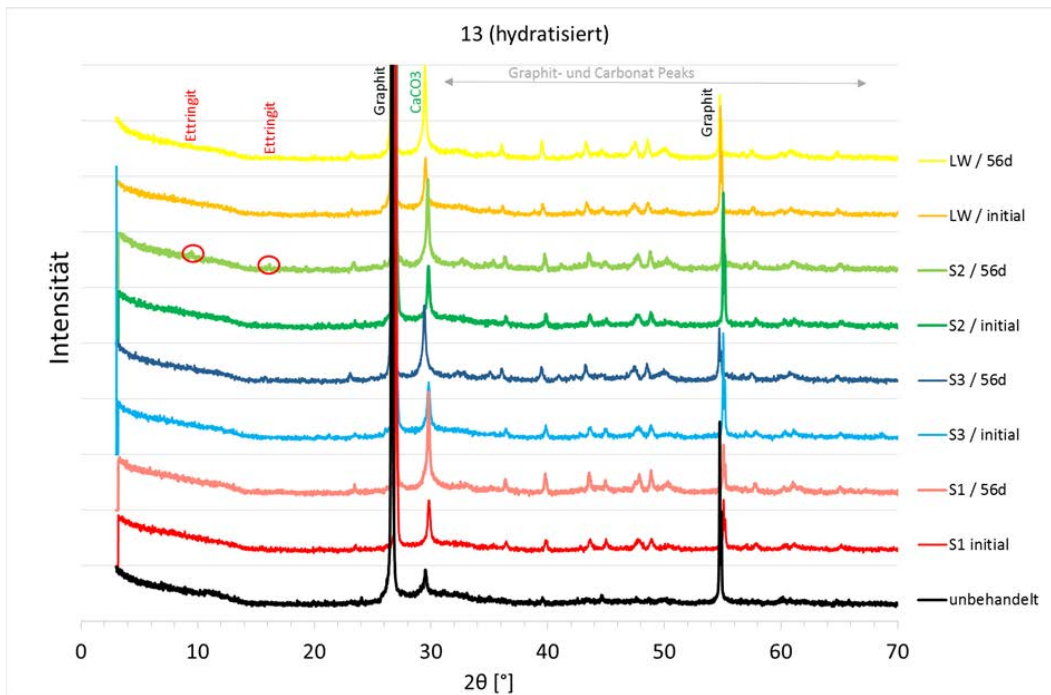


Abbildung 3-88: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 13 (hydratisiert)

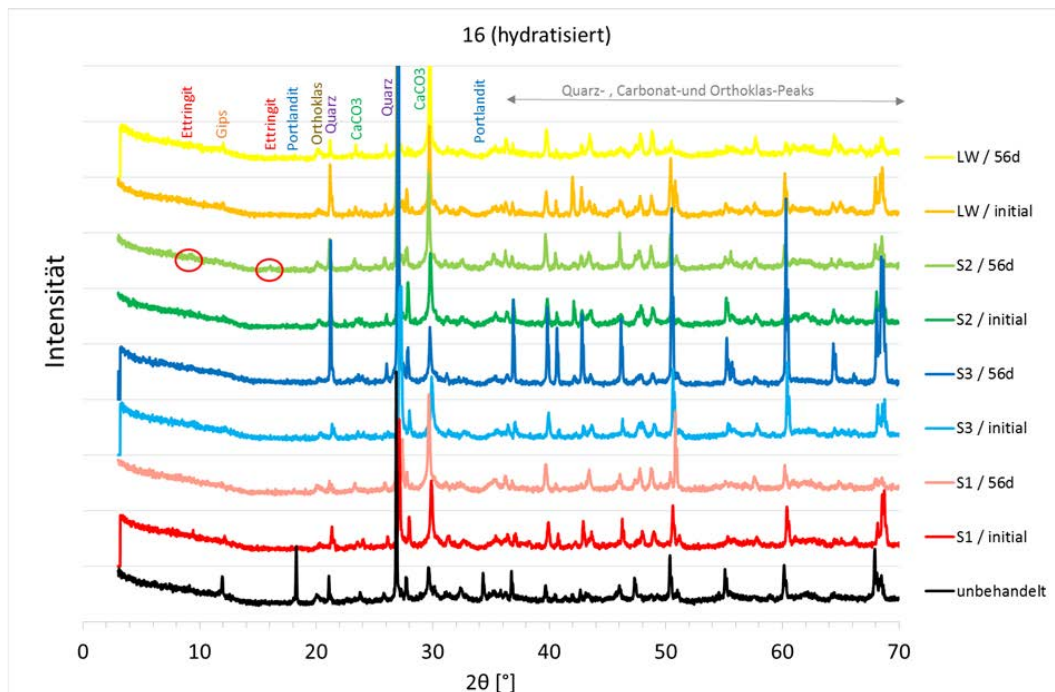


Abbildung 3-89: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für Material 16 (hydratisiert)

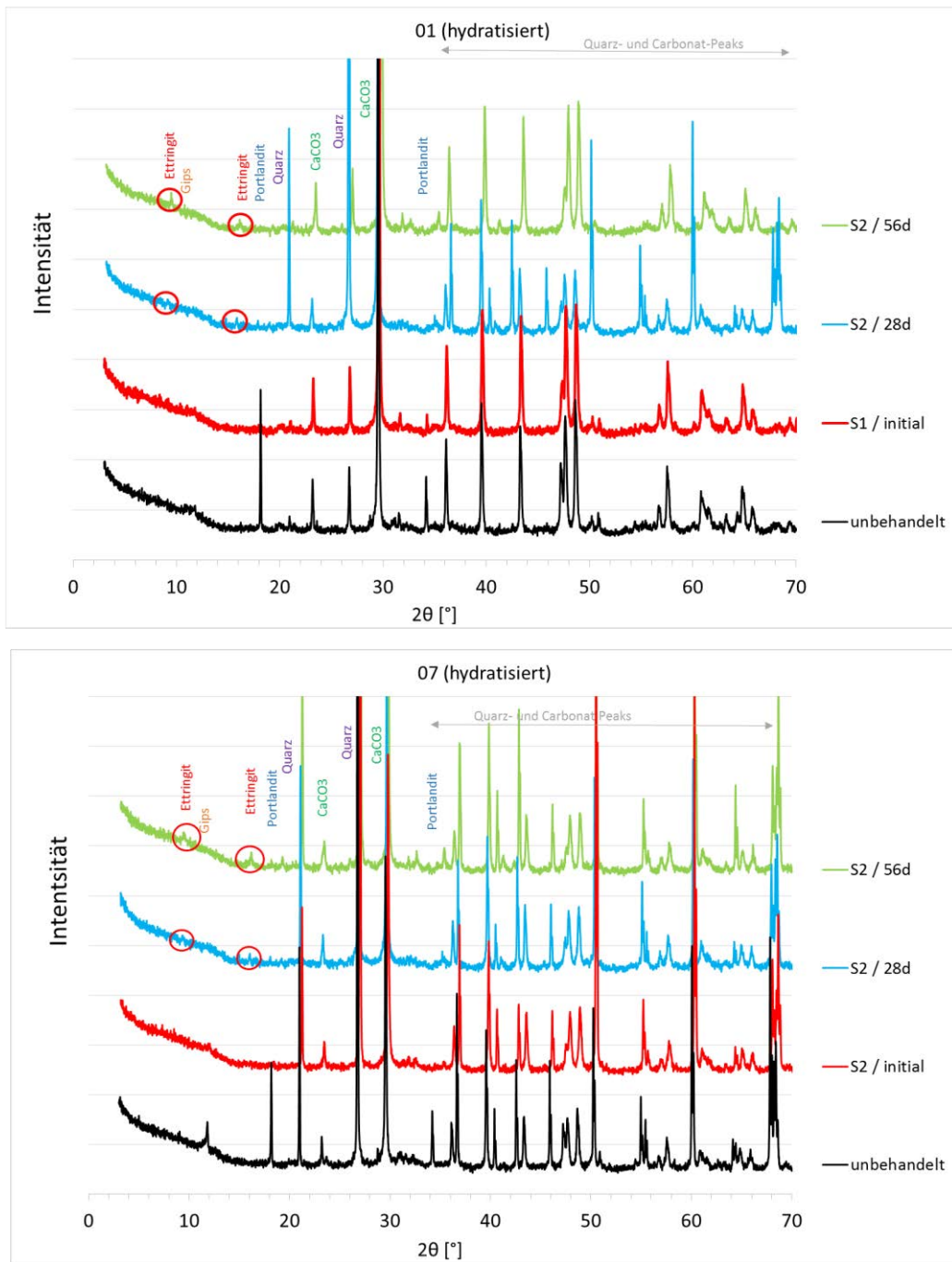


Abbildung 3-90: Röntgendiffraktogramme zeigen die Ettringitneubildung in Abhängigkeit der Versuchsdauer für die Baustoffe 01 und 07 (hydratisiert) mit Reaktionslösung Typ S2

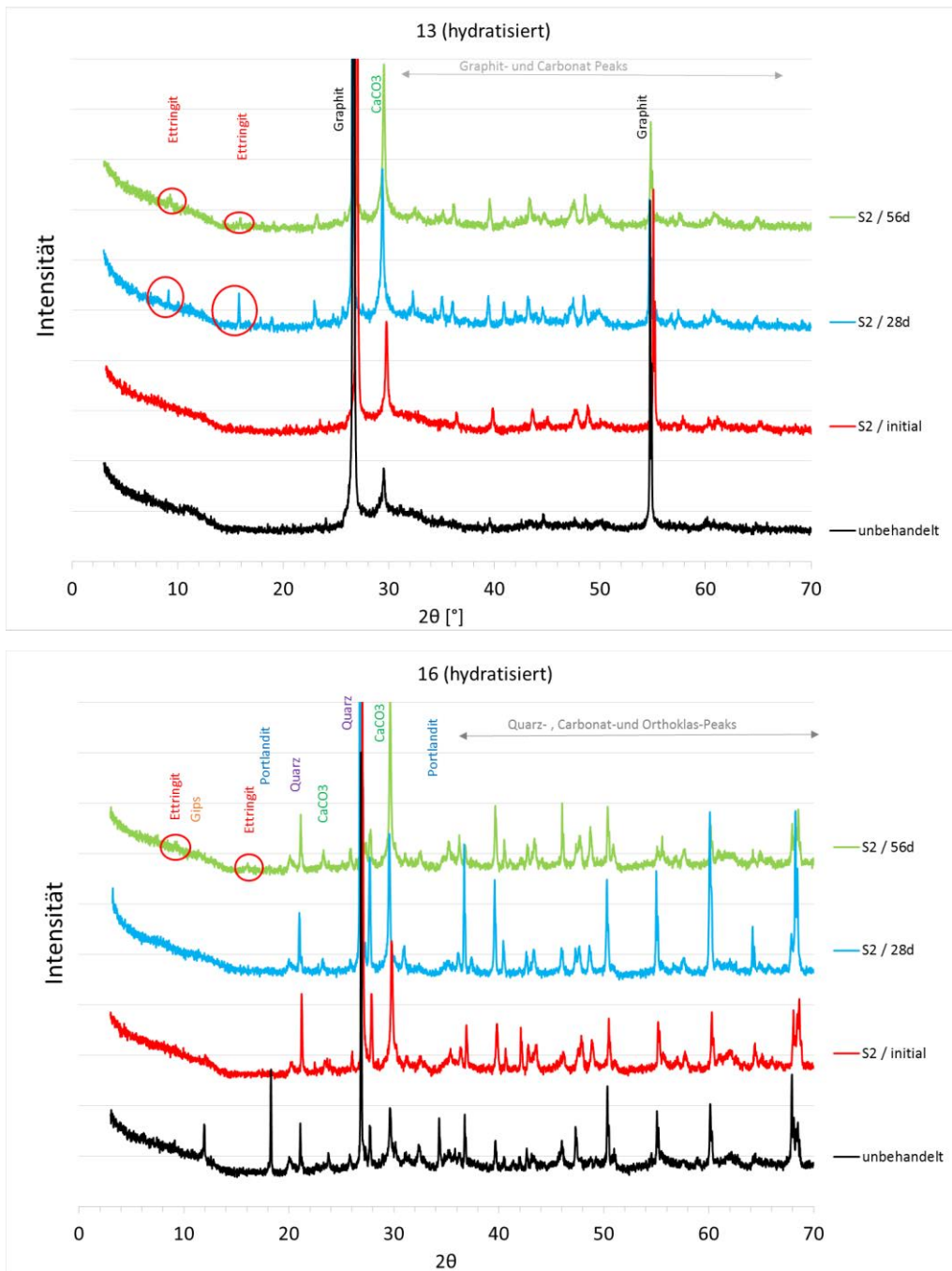


Abbildung 3-91: Röntgendiffraktogramme zeigen die Etringitneubildung in Abhängigkeit der Versuchsdauer für die Baustoffe 13 und 16 (hydratisiert) mit Reaktionslösung Typ S2

3.2.4.4.3. REM/EDX-Analytik (Feststoffproben)

Ausgewählte Proben (hydratisiert) wurden mittels REM/EDX hinsichtlich eines Sulfatangriffes untersucht: Neubildung von Sulfatmineralen wie Ettringit, Gips, Brucit oder Thaumazit.

Nachfolgend sind die Ergebnisse für die Materialien 01, 07, 13 und 16 der jeweiligen Initialproben und der Proben nach 56 d Versuchsdauer für die Reaktionslösung S3 (Abbildung 3-94 bis Abbildung 3-101) dargestellt. Weitere REM/EDX Analysen wie Übersichtsaufnahmen für die Reaktionslösung S3 und für Versuche mit Wasser des Typs S1 befinden sich auf der beigefügten Daten-CD. Die Initialproben wurden etwa 2 min mit der entsprechenden Reaktionslösung versetzt. Die getrockneten Proben wurden vorsichtig manuell zerkleinert (unterschiedliche Korngrößen sind nicht aussagekräftig) und bis zur Analyse unter Stickstoffatmosphäre aufbewahrt. Für die REM/EDX-Untersuchungen wurden die Proben in Form von Pulverproben auf ein Klebeband aufgebracht (schwarzer Hintergrund) und mit Kohlenstoff bedampft. Zum Vergleich wurden hydratisierte, jedoch unbehandelte Proben untersucht (Abbildung 3-92, Anhang 5).

Angaben zur Morphologie und Kristallinität einiger Hydratationsprodukte gibt Tabelle 3-30.

Tabelle 3-30: Angaben zur Struktur einiger Hydratationsprodukte (aus Stark & Wicht 2013); (C-S-H = Calciumsilikathydratphasen; CH = Portlandit)

Hydratationsprodukt	Kristallinität	Morphologie
C-S-H	sehr gering	spitznadelig (Spitzen um 10 nm), in Bündeln angeordnete Fasern je nach Hydratationsdauer mit einer Länge l von 0,1 μm bis $>1 \mu\text{m}$ und einem Durchmesser $d \leq 50 \text{ nm}$
CH	sehr gut	pseudohexagonale Kristalle mit $d \leq 10 \mu\text{m}$ und einer Basisfläche bis 120 μm
Ettringit	gut	lange schlanke prismatische Nadeln mit $d \approx 60\text{--}1000 \text{ nm}$ (0,06–1 μm) und sehr unterschiedlicher Länge je nach den Bildungsbedingungen
Monosulfat	gut	dünne hexagonale Platten mit einer Basisfläche $\approx 50 \mu\text{m}$ und $d < 1 \mu\text{m}$, unregelmäßige „Rosetten“
Calciumaluminat-hydrate	gut	hexagonale Platten mit $d \approx 50 \text{ nm}$, Basisfläche $\approx 10 \mu\text{m}$

Zunächst wurde von jeder Probe ein Übersichtsbild mit 1000-facher Vergrößerung aufgenommen (Daten CD). Danach wurden einzelne Körner mit höherer Vergrößerung untersucht und an ausgewählten Punkten EDX-Spektren aufgenommen. Allerdings stellt die EDX-Analyse lediglich eine qualitative Elementverteilung dar. Rückschlüsse bezüglich Mengen oder Mengenverhältnisse gemessener Elemente sind nicht möglich. Hohe C-Gehalte sind auf die Kohlenstoff-Bedampfung zurückzuführen. Für Objekte $< 1 \mu\text{m}$ ist keine EDX-Analyse möglich, da die Streustrahlung aus der Umgebung zu hoch ist.

Alle untersuchten Proben zeigen nach 56 d Versuchsdauer bezüglich der EDX-Spektren keinen signifikanten Unterschied im Vergleich zur jeweiligen Initialprobe. Die gemessenen Elemente sind Si, O, Ca, C, Al, Mg, S, Ti, Fe, Na sowie K. In einzelnen Proben konnte Calcit (Abbildung 3-98 und Abbildung 3-101) und Graphit (Material 13, Abbildung 3-98) eindeutig nachgewiesen werden. Tafelförmig ausgebildete Kristalle könnten ein Hinweis auf Portlandit sein. Enthaltene Quarz oder Tonminerale (z.B. Material 16) konnten nicht identifiziert werden.

Nadelförmig ausgebildete Minerale mit deutlichem Schwefel-Peak sind sowohl in den Initialproben als auch in den Proben nach 56 d Versuchsdauer zu erkennen (Abbildung 3-93). Der Schwefel-Peak im EDX-Spektrum ist ein Hinweis auf ein Sulfatmineral. Allerdings ist nicht erkennbar, ob es sich hierbei um Gips, Ettringit oder Thaumasit handelt. Die zuletzt genannten Minerale besitzen eine hexagonal säulenförmige Morphologie (Stark & Wicht 2013). Zwischen Ettringit und Thaumasit besteht zudem eine Mischkristallreihe (Verein Deutscher Zementwerke, 2002). Ettringit und Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, monoklin, prismatisch) sind bereits im Zement enthalten. Ettringit entsteht primär während der Zementhydratation. Gips wird dem Zement als Erstarrungsregler zugesetzt. Ob während der 56-tägigen Versuchsdauer in den untersuchten Proben Ettringit oder Gips sekundär durch einen äußeren Sulfatangriff entstanden sind, kann hier nicht abschließend geklärt werden. Thaumasit hingegen würde sich nur bei einem äußeren Sulfatangriff bilden (Stark & Wicht 2013).

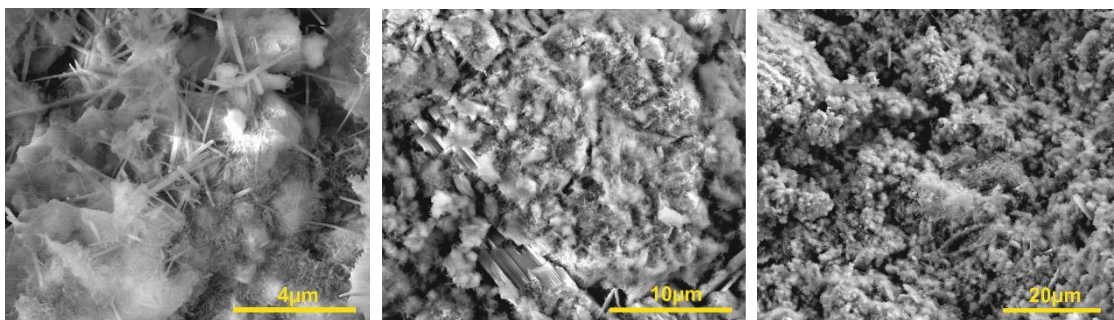


Abbildung 3-92: REM-Aufnahmen hydratisierter, nicht mit Reaktionslösung versetzter Zementproben (28 d unter Leitungswasseratmosphäre ausgehärtet; Probenstücke: links Baustoff 07, Mitte und rechts Baustoff 01): deutlich erkennbar sind die während des Hydratationsprozesses gebildeten CSH-Phasen (nadeliger Habitus)

Eine Ausfällung von Sulfatmineralen aus der Versuchslösung durch Überschreitung der Sättigung ist ebenfalls nicht auszuschließen. Auffällig ist, dass unbehandelte Zementproben (hydratisiert, jedoch nicht mit Reaktionslösung versetzt) im Vergleich zu den Initial- oder Batchproben weniger nadelförmige Minerale zeigen (Anhang 5). Allerdings wurden die unbehandelten Zemente nicht als Pulverpräparate im REM analysiert, sondern als kleine Probenstücke aufgeklebt.

Einige Proben zeigen nach einer Schütteldauer von 56 d im Vergleich zur Initialprobe Körner mit weniger Mineralaufwachsungen (z.B. Abbildung 3-95, Abbildung 3-101 und Daten CD). Ein Angriff auf einzelne Zementphasen ist nicht eindeutig erkennbar. Die Veränderungen der Mineraloberfläche können auf die mechanische Belastung während des Schüttelvorgangs zurückzuführen sein (Kornabrieb).

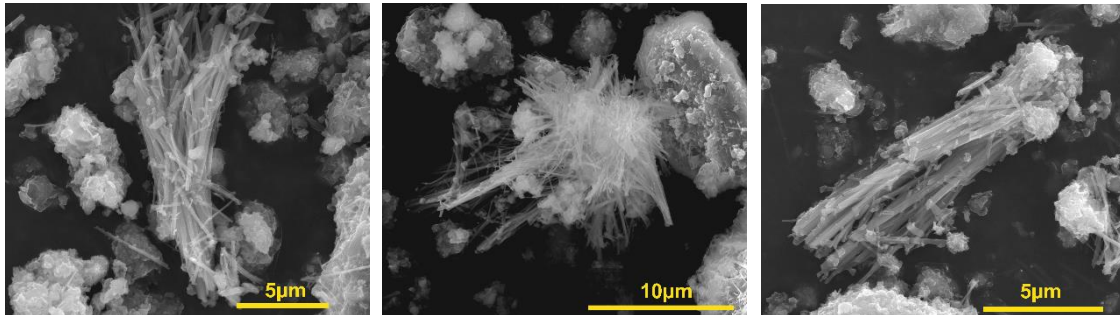


Abbildung 3-93: REM-Aufnahmen nadelig ausgebildeter Phasen, welche sowohl in den Initialproben als auch in Proben nach 56 tägiger Versuchsdauer zu finden sind. Diese Phasen zeigen einen deutlichen Schwefel-Peak im EDX-Spektrum (links und Mitte: Baustoff 16, rechts Baustoff 01)

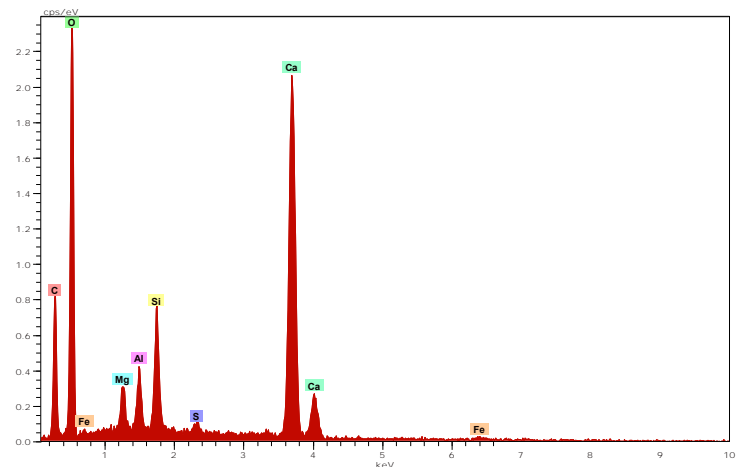
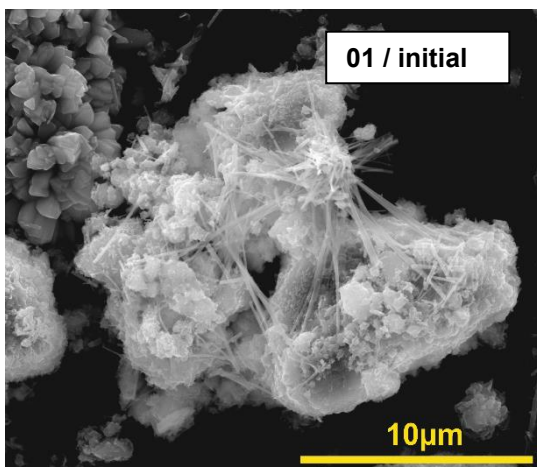
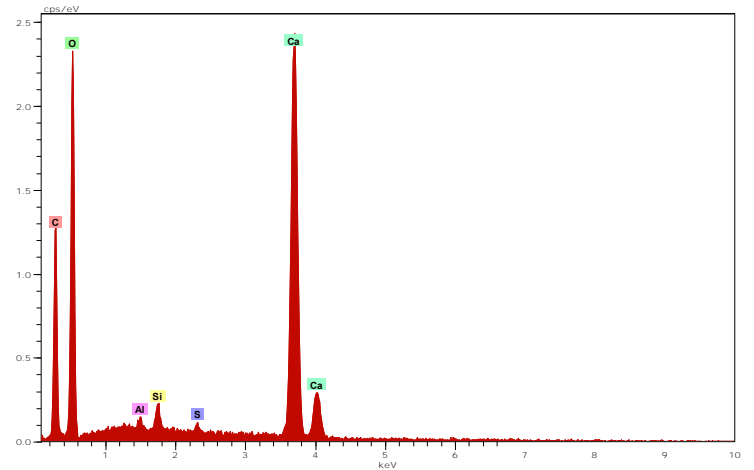
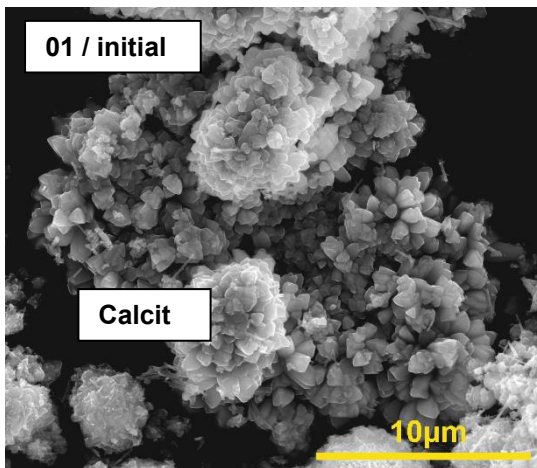
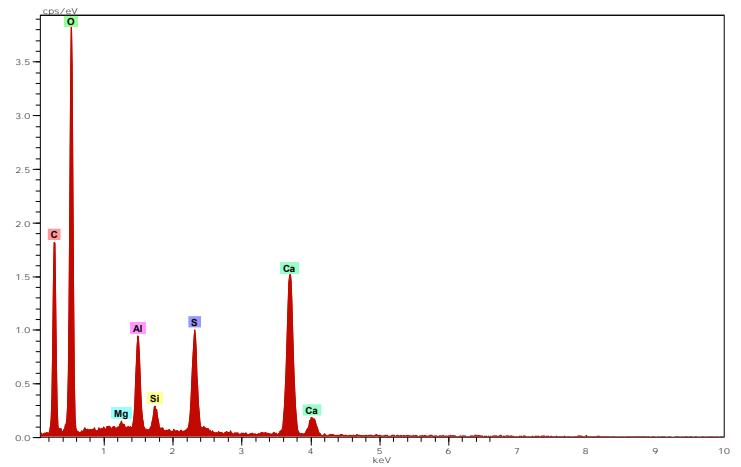
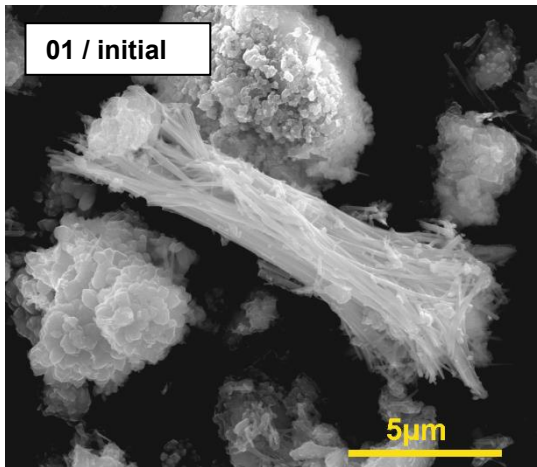


Abbildung 3-94: REM-Aufnahmen einzelner ausgewählter Körner (links) und zugehörige EDX-Spektren (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 01 (Initialproben) und Reaktionslösung S3

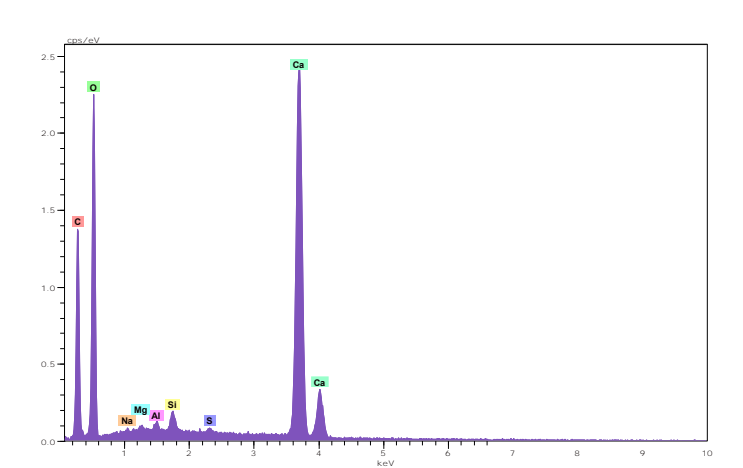
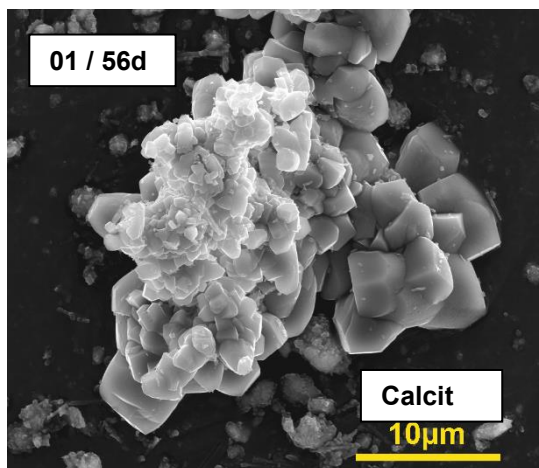
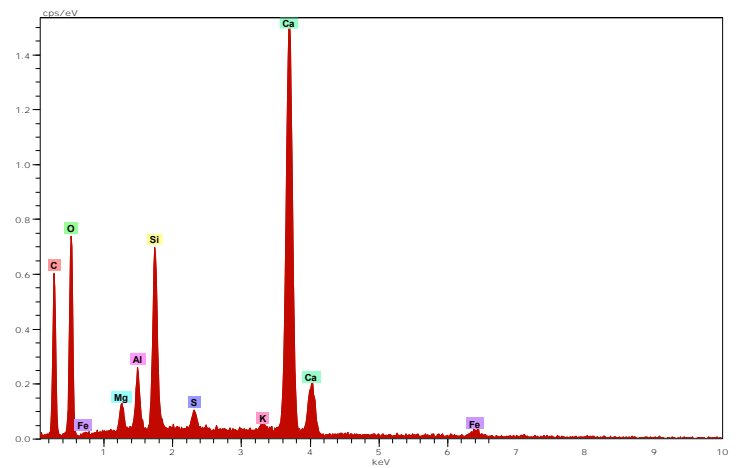
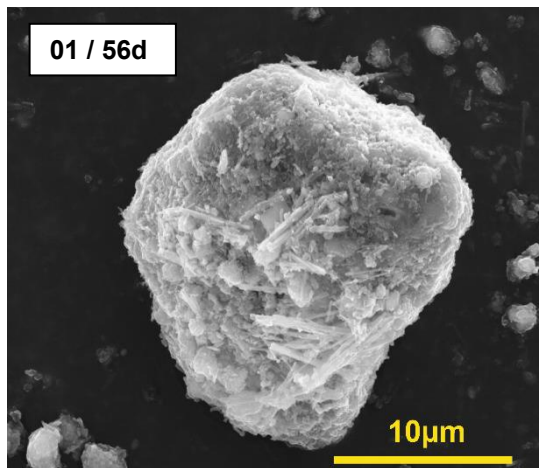
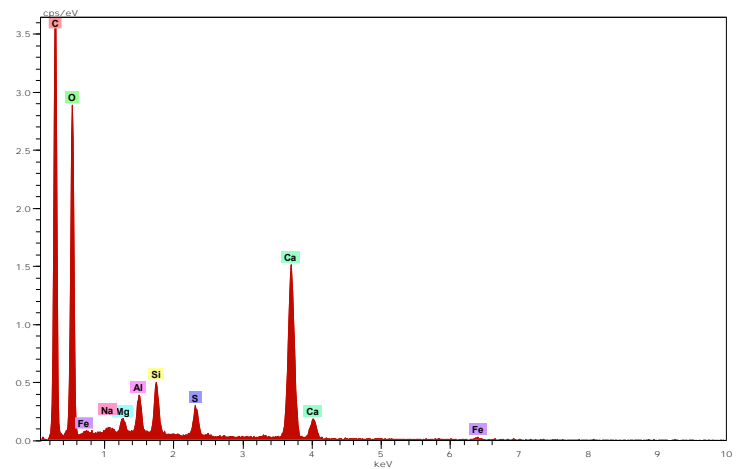
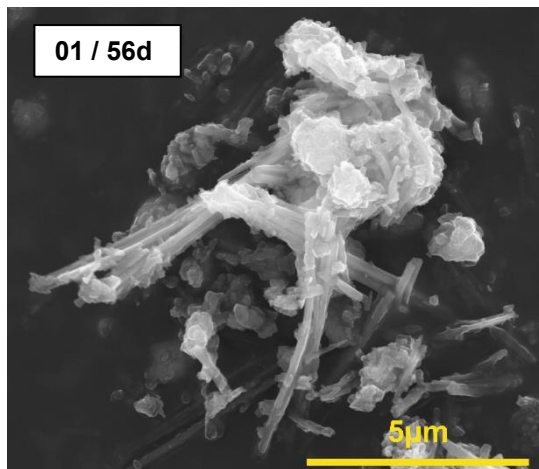


Abbildung 3-95: REM-Aufnahmen einzeln ausgewählter Körner (links) und zugehörige EDX-Spektren (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 01 und Reaktionslösung S3 nach 56 Versuchstagen

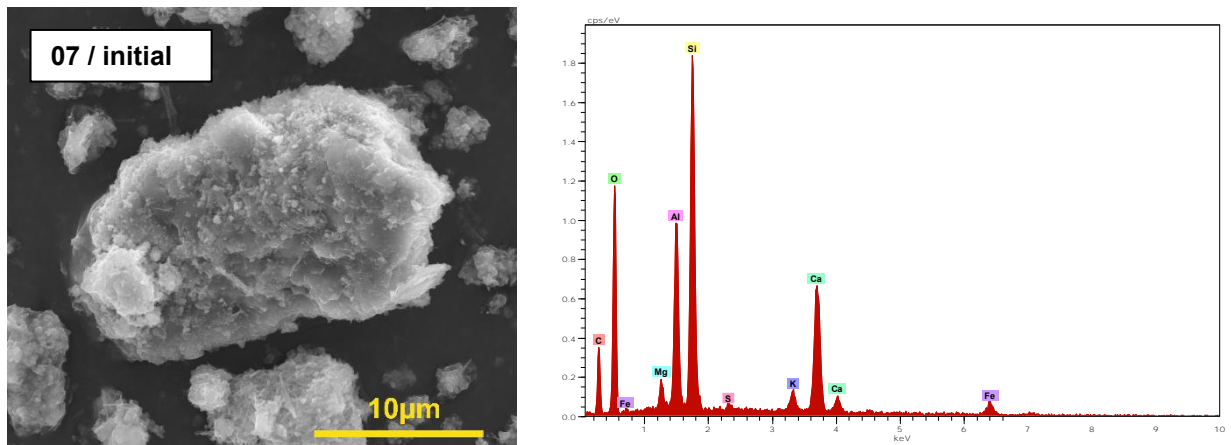


Abbildung 3-96: REM-Aufnahme (links) und zugehörige EDX-Spektrum (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 07 (Initialproben) und Reaktionslösung S3

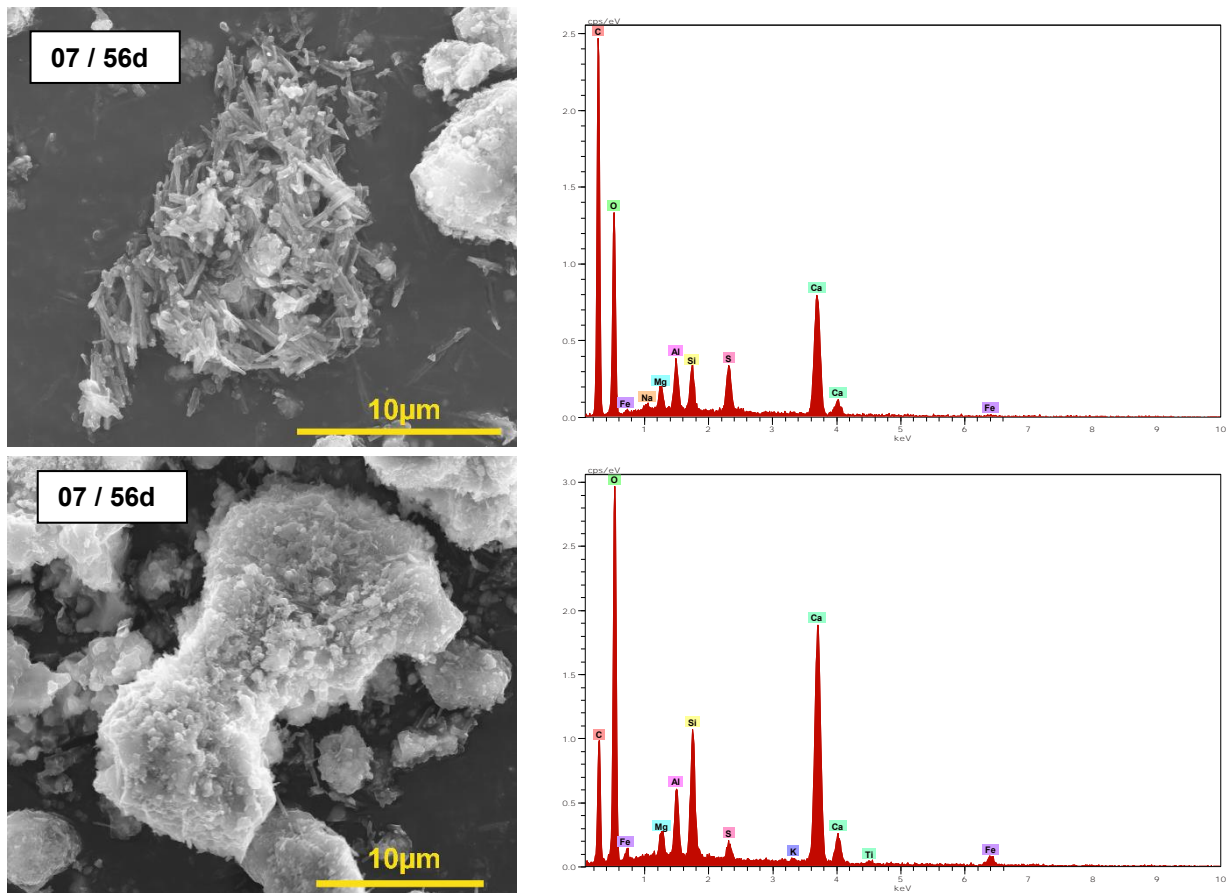


Abbildung 3-97: REM-Aufnahmen einzeln ausgewählter Körner (links) und zugehörige EDX-Spektren (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 07 und Reaktionslösung S3 nach 56 Versuchstagen

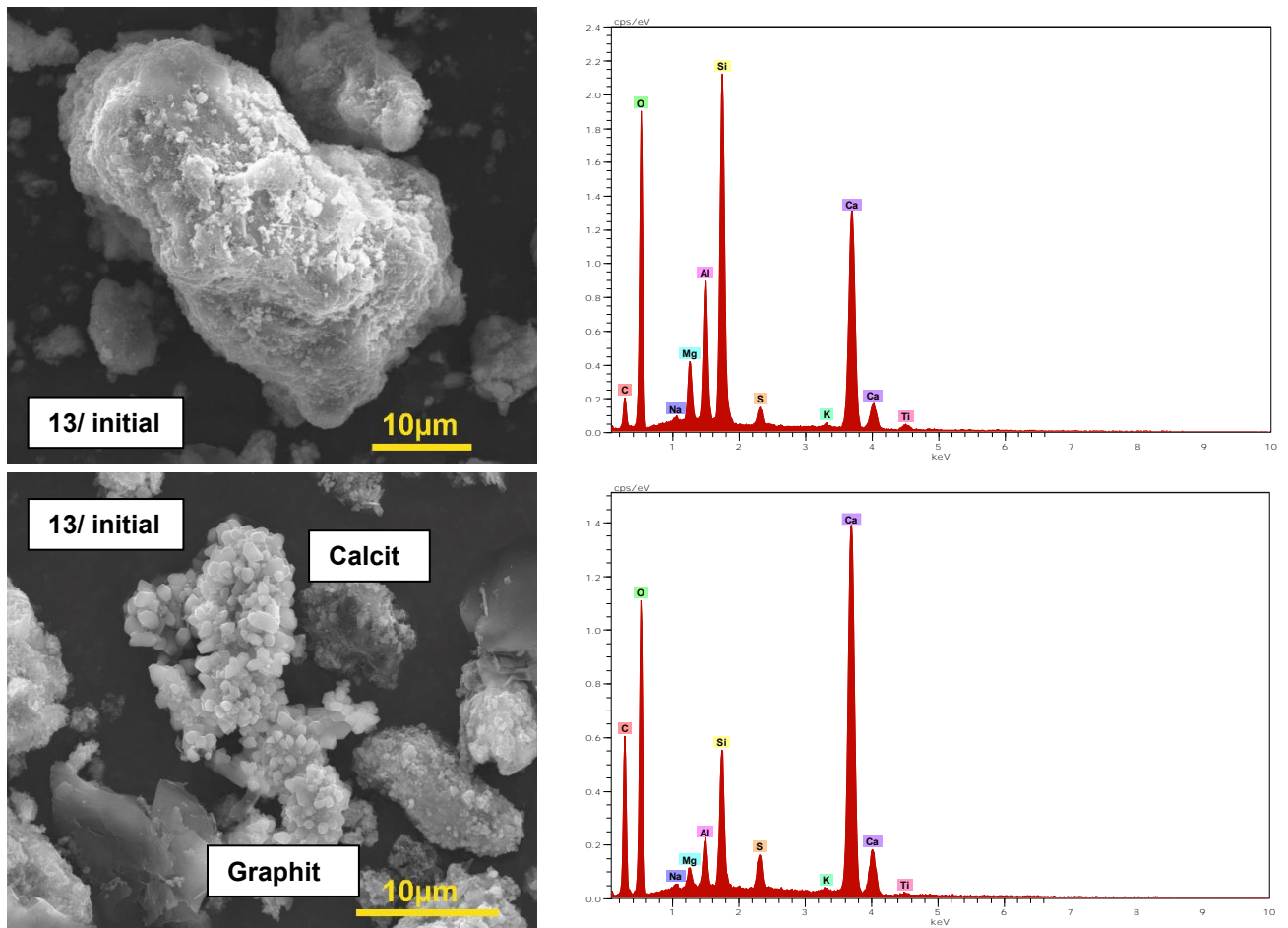


Abbildung 3-98: REM-Aufnahmen einzeln ausgewählter Körner (links) und zugehörige EDX-Spektren (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 13 (Initialproben) und Lösung S3

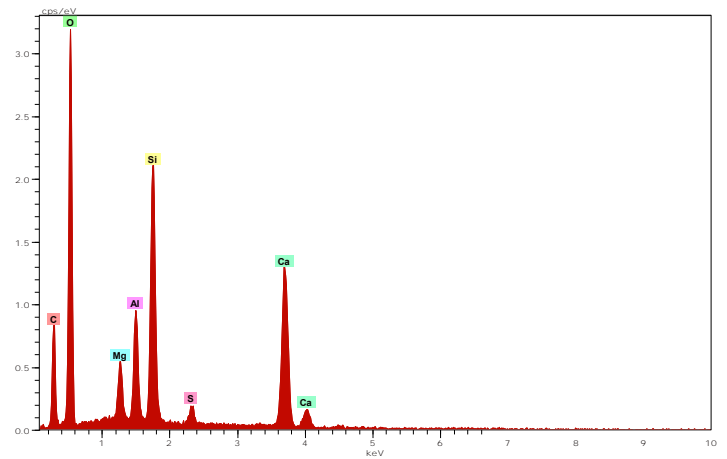
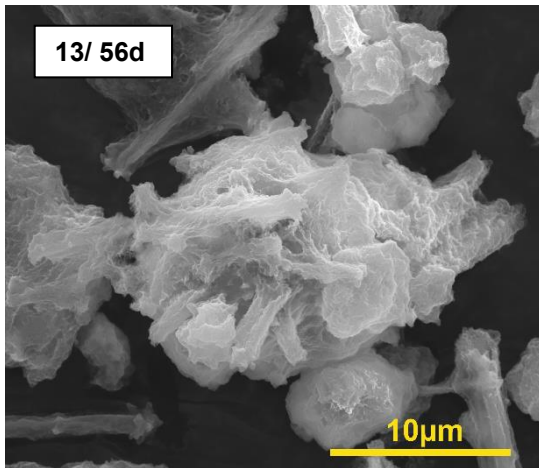
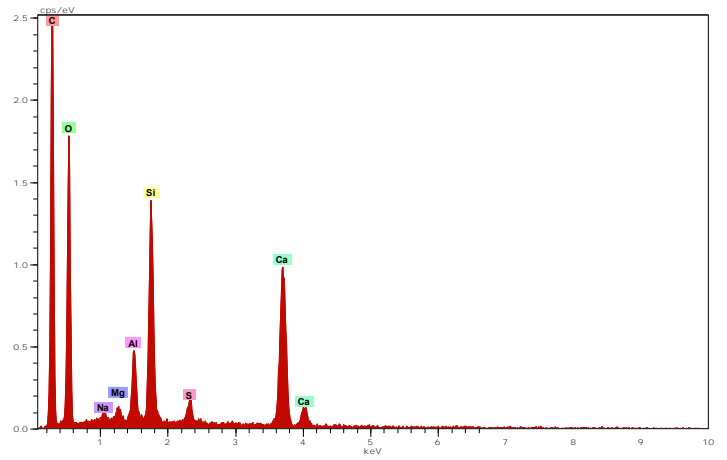
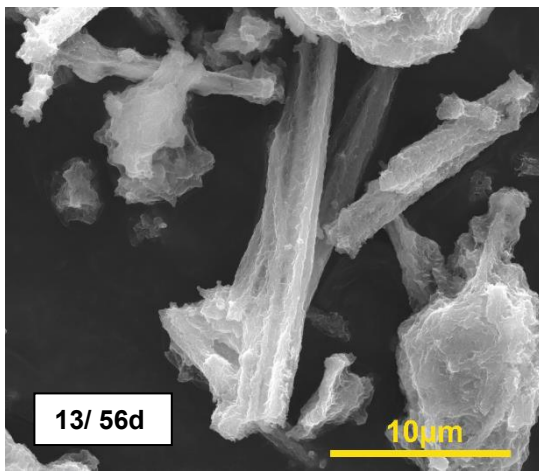


Abbildung 3-99: REM-Aufnahmen einzeln ausgewählter Körner (links) und zugehörige EDX-Spektren (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 13 und Wasser S3 nach 56 d

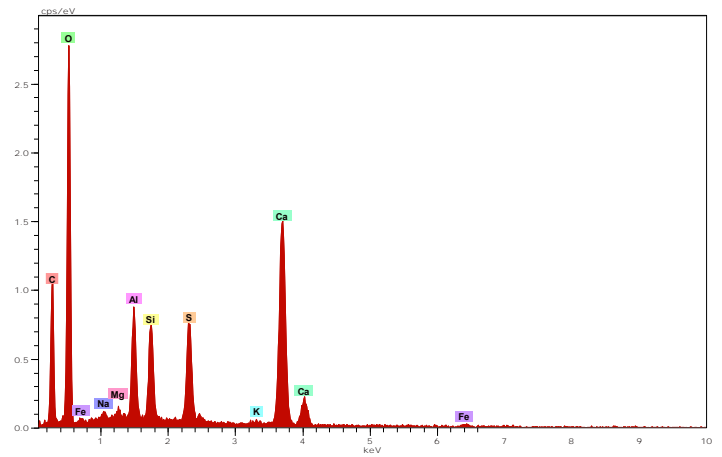
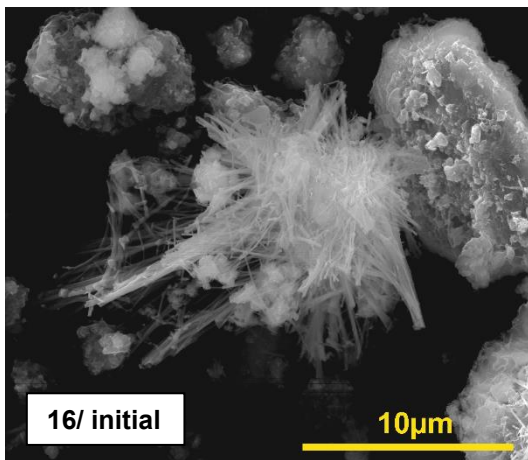


Abbildung 3-100: REM-Aufnahme (links) und zugehörige EDX-Spektrum (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 16 (Initialproben) und Wasser S3

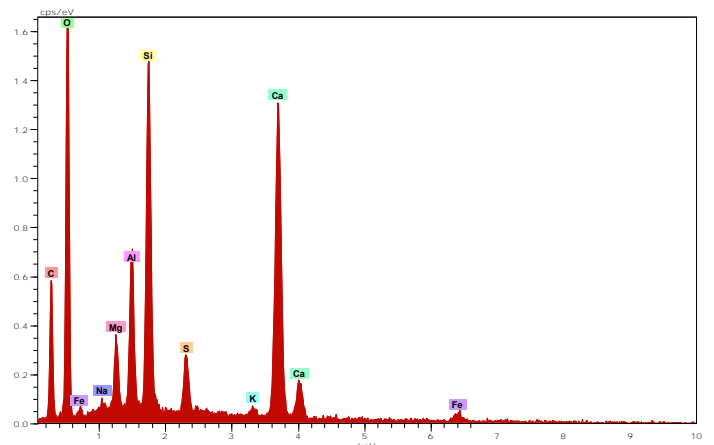
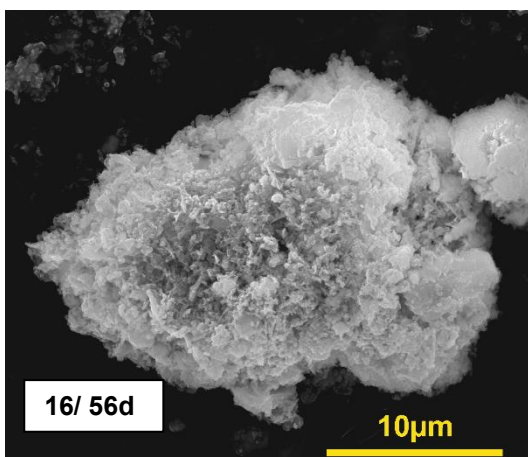
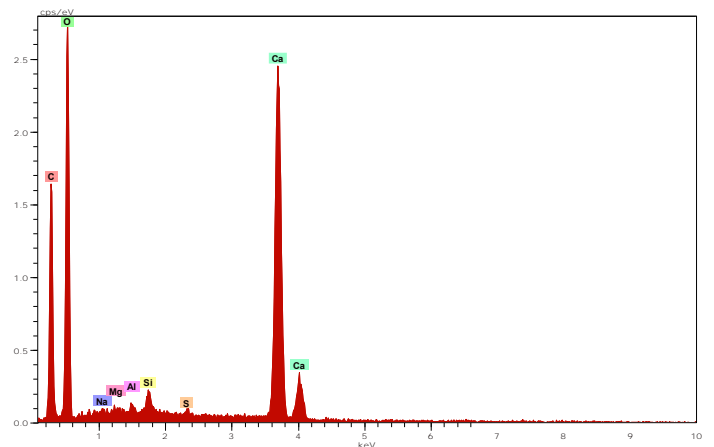
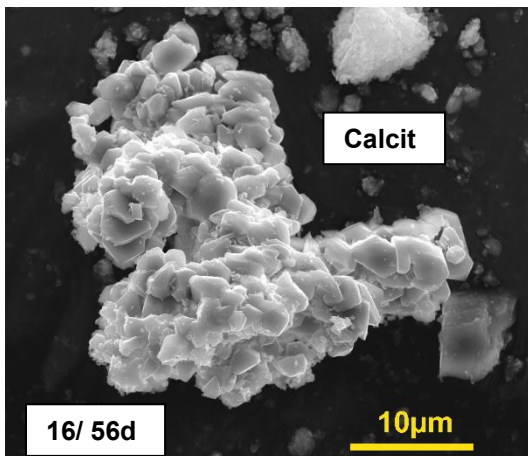


Abbildung 3-101: REM-Aufnahmen einzelner ausgewählter Körner (links) und zugehörige EDX-Spektren (rechts) aus den Batchversuchen (hydratisierte Proben) für Material 16 und Reaktionslösung S3 nach 56 Versuchstagen

3.2.4.5. Umströmungsversuche

Bei der Durchführung der Umströmungsversuche wurde sowohl der Sulfatangriff als auch der Säureangriff mit Wässern unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung simuliert. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln getrennt voneinander diskutiert. In Abbildung 3-102 ist die Nomenklatur der Probenbeschriftung für die Umströmungsversuche dargestellt.

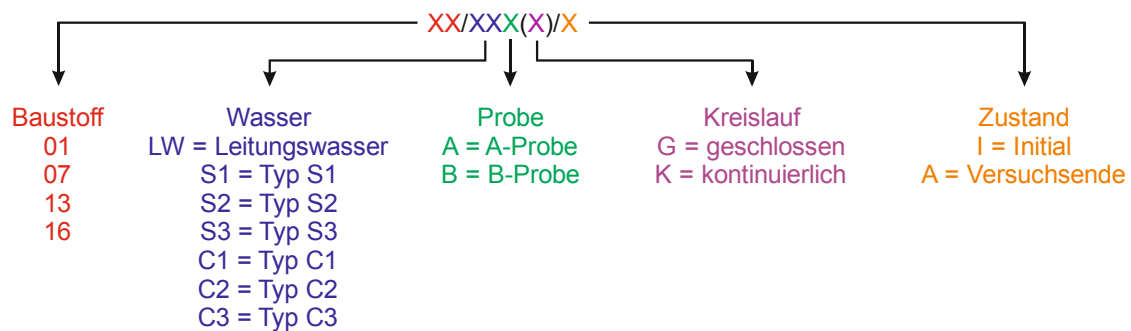


Abbildung 3-102: Nomenklatur der Probenbeschriftung

Proben, die in ihrer Bezeichnung kein G oder K beinhalten, wurden im geschlossenen Kreislauf zirkuliert.

3.2.4.5.1. Umströmungsversuche mit sulfataggressiven Wässern

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Umströmungsversuche diskutiert, die mit sulfataggressiven Wässern gemäß Kapitel 3.2.3.2 durchgeführt wurden. Die Probenkörper wurden vor, während und nach dem Versuch optisch begutachtet und fotografiert. In Abbildung 3-103 und Abbildung 3-104 sind von den vier untersuchten Baustoffen jeweils der Initiale (jeweils links) und der Zustand bei Versuchsende (jeweils rechts) gegenübergestellt. Es zeigt sich unabhängig von der Umströmungsart (Kapitel 3.2.3.9) bei allen Versuchen, dass bei Verwendung des Wassers des Typs S1 lediglich eine farbliche Veränderung der Proben zu verzeichnen ist, während bei der Verwendung von Leitungswasser (LW) ein feiner Niederschlag von Ausfällungen (Hydroxiden) zu verzeichnen ist. Bei den Umströmungsversuchen mit Wasser des Typs S2 und S3 sind die Ausfällungen stärker ausgeprägt und haben Dicken von wenigen zehnteln Millimetern. Ansonsten zeigen die Baustoffe 01, 07 und 13 keine auffälligen makroskopischen Veränderungen, wie z.B. Lösungserscheinungen, Expansion usw. Die Eigenmischung (Baustoff 16) verhält sich hiervon mit Ausnahme des Versuchs mit Leitungswasser stark abweichend. Beim Versuch S1G (Wasser Typ S1) zeigt sich eine hellere, porösere Oberfläche, die dem Erscheinungsbild eines äußeren Angriffs gleicht. Ausfällungen konnten auf diesem Probenkörper keine ausgemacht werden. Bei den Probenkörpern, die mit Wasser des Typs S2 und S3 umströmt wurden ist eine deutliche Veränderung der äußeren Form zu erkennen, wobei der Grad der Zerstörung der Probenkörper von S2G (Wasser Typ S2 geschlossene Zirkulation) über S3G (Wasser Typ S3 geschlossene Zirkulation) bis hin zu S3K (Wasser Typ S3 kontinuierliche Zirkulation) zunimmt. Darüber hinaus

waren diese Probenkörper durch den Sulfatangriff so weich, dass sie schon durch leichten Fingerdruck verformbar waren (lösender Angriff). Hier wurden im Zuge des Versuchs wahrscheinlich die C-S-H-Phasen als Hauptfestigkeitsbildner der Hinterfüllmasse in Thaumasit (TSA) umgewandelt und in eine nahezu festigkeitslose Masse überführt (Müllauer 2013). Neben der Thaumasitbildung kann aber auch die Bildung von sekundärem Gips, der röntgendiffraktometrisch im Randbereich der Proben nachgewiesen werden konnte (Abbildung 3-133), nicht nur zu einer äußeren Volumendehnung führen sondern auch eine Erweichung der Oberfläche des exponierten Zementsteins bewirken (Stark & Wicht 2013). Aufgrund der Konsistenz konnten die Probenkörper während des Versuchs nicht für weitere Untersuchungen wie Längenänderung, Gewichtsänderung usw. ausgebaut werden. Neben der Gips- und Thaumasitbildung konnte bei den Versuchen, die mit den Wässern S2 und S3 durchgeführt wurden, wenige zehntel Millimeter mächtige Ausfällungen aus Hydroxiden beobachtet werden.

Nach den Festigkeitsuntersuchungen konnten die Probenkörper auch in ihrem Inneren betrachtet werden. Es zeigte sich, dass die Proben 13/S1A, 7/S1AK, 7/S1BK, 7/LWG, 7/S1G, 7/S2G und 7/S3G eine deutlich sichtbare Reaktionszone mit Reaktionsfront aufwiesen. Die Reaktionszonen beim Baustoff 13 sind mit ca. 1,2 mm geringer ausgeprägt als die des Baustoffs 07 mit bis zu 2,3 mm, was durch die größeren Porenöffnungsweiten des Baustoffs 07 zu erklären ist (Abbildung 3-58). In den übrigen Proben waren makroskopisch keine Reaktionsfronten zu erkennen.

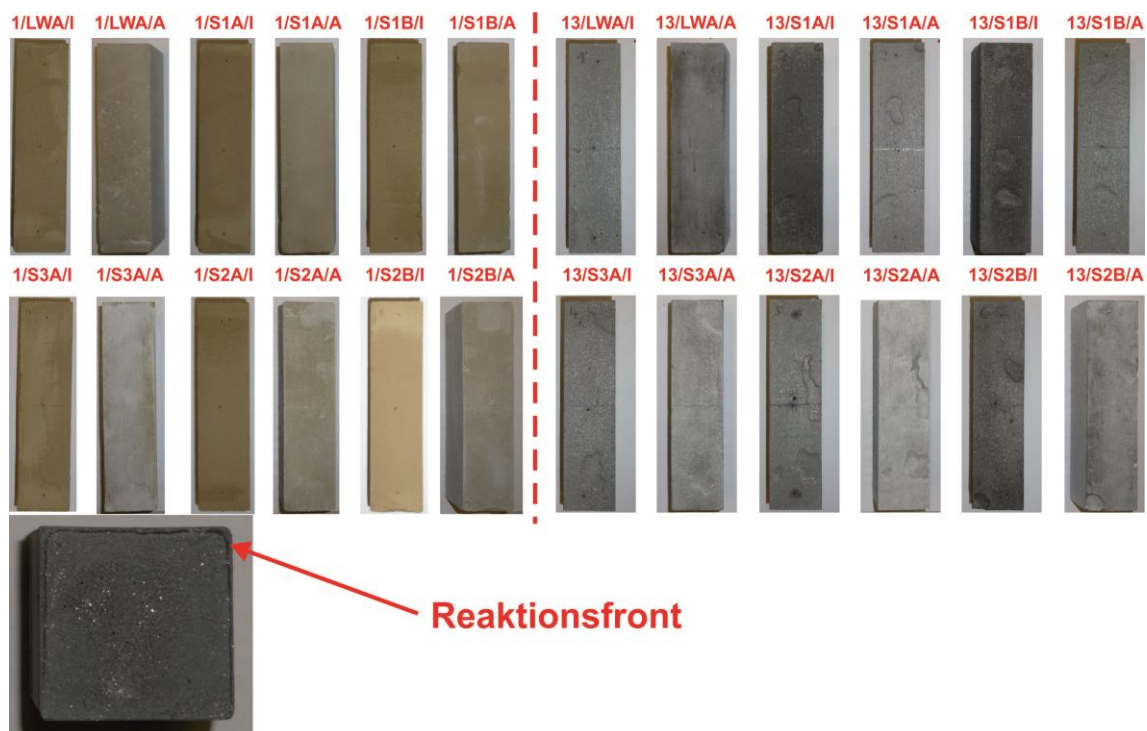


Abbildung 3-103: Bilder der Versuchsprismen der Hinterfüllbaustoffe 01 (links) und 13 (rechts) vor Versuchsbeginn (XX/XXX/I) und bei Versuchsende (XX/XXX/A). Reaktionsfront (unten) an Probekörper 13/S1A/A

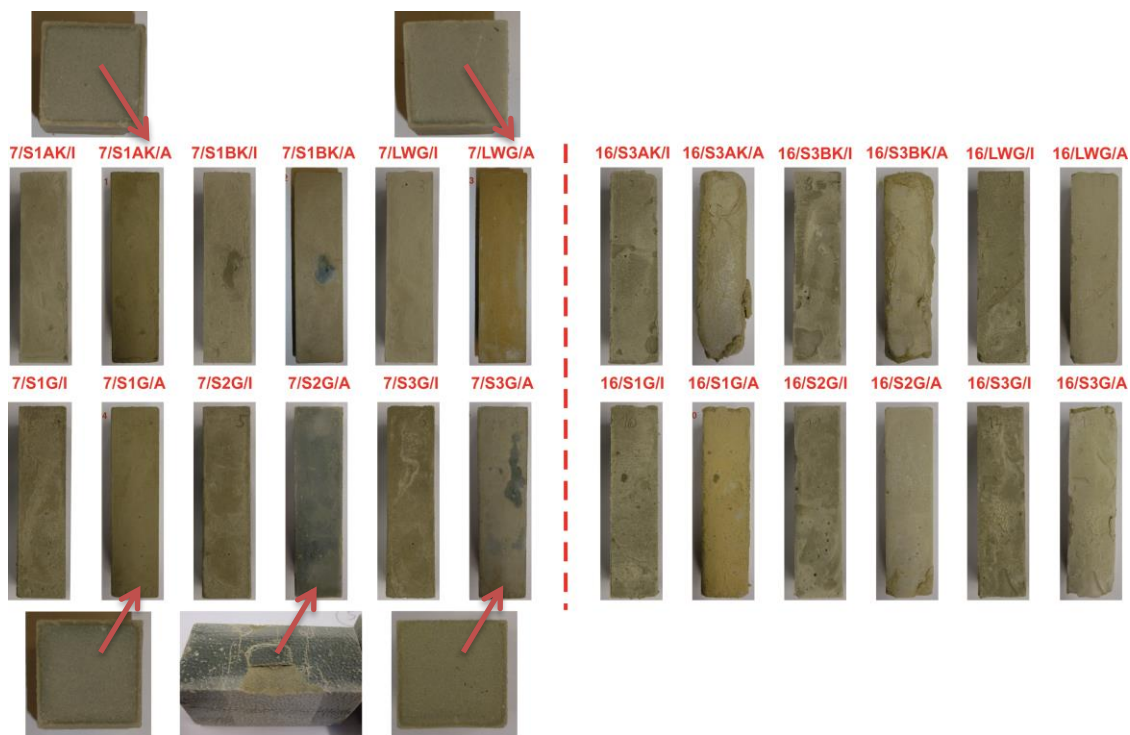


Abbildung 3-104: Bilder der Versuchsprismen der Hinterfüllbaustoffe 07 (links) und 16 (rechts) vor Versuchsbeginn (XX/XXX/I) und bei Versuchsende (XX/XXX/A).

Während der Umströmungsversuche wurden in Abständen von 7 bis 10 Tagen Wasserproben genommen und hinsichtlich ihres pH-Wertes, Eh-Wertes, ihrer elektrischen Leitfähigkeit sowie der Kationen Na^+ , K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} und Anionen Cl^- und SO_4^{2-} untersucht. Die pH-Werte der Wässer sind über die gesamte Versuchszeit in allen Proben im alkalischen Bereich (Abbildung 3-105). Dabei hat der Hinterfüllbaustoff 01 die höchsten pH-Werte, gefolgt von den Baustoffen 16, 07 und 13 (Initial und Blindwerte in Abbildung 3-106). Bei Betrachtung aller Versuche sind die Werte zu Versuchsbeginn um bis zu 5 höher als die Initialwerte der verwendeten Wässer. Im Versuchsverlauf nähern sich die Messwerte den Initialwerten der Versuchslösung an. Dies liegt daran, dass im Anfangsstadium der Hydratation der pH-Wert in der wässrigen Lösung der Hinterfüllung aufgrund der Dissoziation der Alkalisulfate stark ansteigt (Stark & Wicht 2013). Die grenzflächennahen (Fest-/Flüssigphase) OH^- -Ionen migrieren diffusionsgesteuert aus der Hinterfüllung in die Versuchslösung und sorgen hier für die Anhebung des pH-Wertes. Da im Versuchsverlauf die Migrationswege der zur Verfügung stehenden mobilen Hydroxidionen länger werden, bei gleichzeitiger Reduktion der Porosität bedingt durch den andauernden Hydrationsprozess und sich zudem um die Probe aufgrund der Hydroxidausfällungen eine Art Coating auf der Probekörperoberfläche bildet, sinkt der pH-Wert in der Reaktionslösung über die Versuchszeit. Die Abnahme der OH^- -Konzentration im äußeren Bereich der Probenkörper ist auch in Abbildung 3-106 ersichtlich. Hier wurde der pH-Wert der Hinterfüllung gemäß Kapitel 3.2.3.5.1 innerhalb der Reaktionszone und im zentralen Kern der Probe gemessen. Da es sich versuchsbedingt bei der Umströmungsversuchsordnung nicht um ein geschlossenes System handelt, kann die Reduzierung des pH-

Werts im Randbereich der Probe zum Teil auch aufgrund einer Carbonatisierung innerhalb der Hinterfüllung erfolgt sein, da dies mit einer pH-Wertreduzierung von bis zu 3,5 einhergehen kann (Stark & Wicht 2013). Dass die Carbonatisierung einen gewissen Einfluss auf die Probe und deren pH-Wert hat, wird anhand der Blindproben ersichtlich, denn diese Proben haben zwar alle einen höheren pH-Wert als die behandelten Proben, aber der äußere Wert ist bei allen Blindproben geringer als der innere Wert. Da das bei der Carbonatisierung entstandene Calciumcarbonat eine Ausgangskomponente für die Thaumasitbildung darstellen kann (Müllauer 2013), könnte dies mit ein Auslöser für die Thaumasitbildung im Baustoff 16 sein. Eine nachträgliche Carbonatisierung der Proben während der Probenlagerung kann aufgrund der Schutzatmosphäre während der Lagerung ausgeschlossen werden (Kapitel 3.2.3.4).

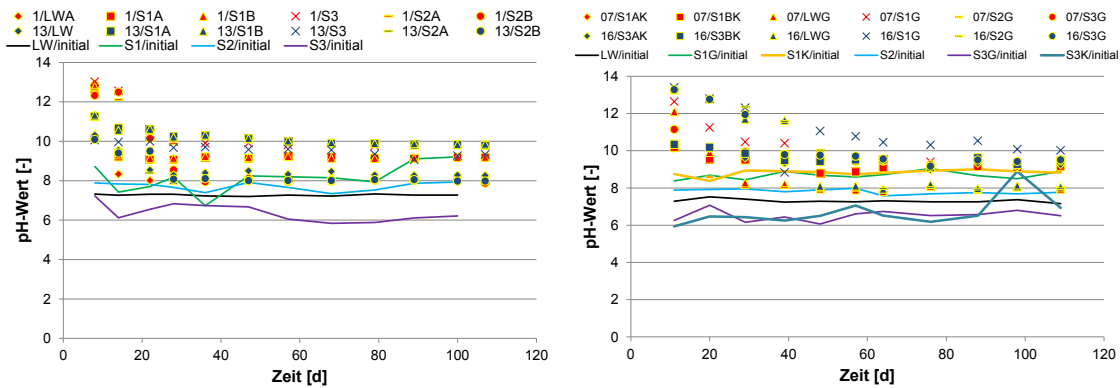


Abbildung 3-105: Entwicklung des pH-Werts innerhalb der umströmten Wässer

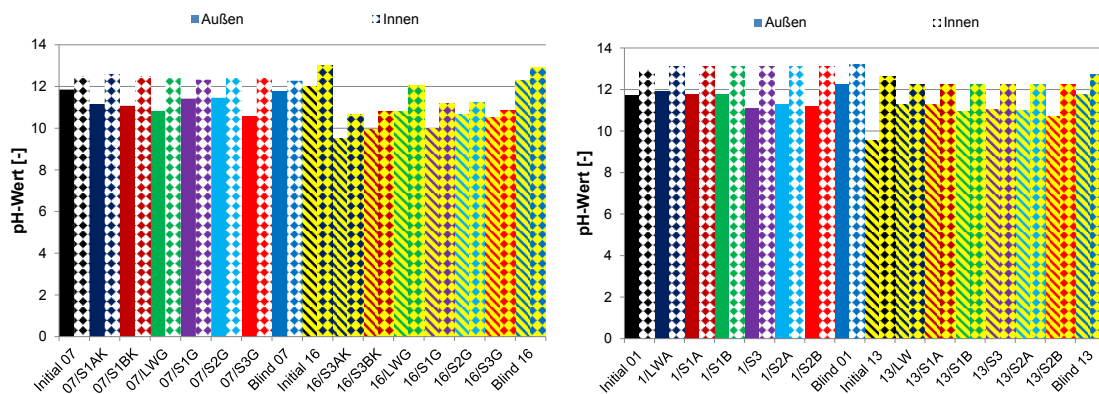


Abbildung 3-106: pH-Wert am Außenrand und innerhalb der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 nach der Umströmung mit sulfathaltigen Wässern

Die zeitliche Entwicklung der Redoxpotentiale ist in Abbildung 3-107 dargestellt. Die Eh-Werte der Hinterfüllung 13 sind dabei am geringsten, gefolgt von Hinterfüllmaterial 07, 16 und 01. Allgemein steigen die Eh-Werte in den Reaktionslösungen während der Versuchszeit an und nähern sich hierbei den Werten der Initiallösungen jedoch ohne deren Werte zu erreichen. Nach ca. 50 Tagen liegen die Eh-Werte bei ca. 300-400 mV und sind in etwa konstant. Da das Gleichgewicht

der Reaktionslösung durch den diffusiv gesteuerten Zustrom von Ionen aus dem Probenkörper gestört wird und Lösungs-/Fällungsreaktionen neben der Ionenkonzentration auch von den Eh-/pH-Bedingungen abhängig sind, stellen sich je nach den gerade vorherrschenden Bedingungen in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Probenkörper neue Gleichgewichtsbedingungen ein. Die Entwicklung der Eh-Werte und pH-Werte sind daher unmittelbar aneinandergelockt. Dies zeigt sich an der Entwicklung der Eh- und pH-Werte in den durchgeführten Experimenten, die in etwa spiegelsymmetrisch zueinander verlaufen.

Die elektrische Leitfähigkeit spiegelt die Ionenkonzentration (inkl. der Hydroxidionen) der Reaktionslösung wider. Sie ist in den ersten 10-20 Versuchstagen je nach Baustoff und Umströmungsmethode um bis zum 2-3-fachen höher als die der Initialwerte der Ausgangslösung (Abbildung 3-108). Bei kontinuierlicher Umströmung sind keine erhöhten Werte aufgetreten. Hinsichtlich der Baustoffe zeigt die Eigenmischung (Baustoff 16) den stärksten Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit, gefolgt vom Baustoff 01 und 07, der für nur geringfügig erhöhte Werte zu Versuchsbeginn sorgt. Beim Baustoff 13 liegen die Werte ca. im Bereich der Initialwerte. Nach ca. 20 Tagen sind die Werte in allen Reaktionslösungen dann etwa konstant im Bereich der Initialwerte. Die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Migration der Hydroxidionen sowie der Alkalimetalle (siehe z.B. Abbildung 3-115 und Abbildung 3-124) und Ca^{2+} (Abbildung 3-130) verursacht. Das Mg^{2+} spielt hier keine Rolle, da es bei diesen pH-Bedingungen als Hydroxid ausfällt (Haus 2002). Eine ausführliche Diskussion über die Entwicklung der Ionen folgt im Anschluss.

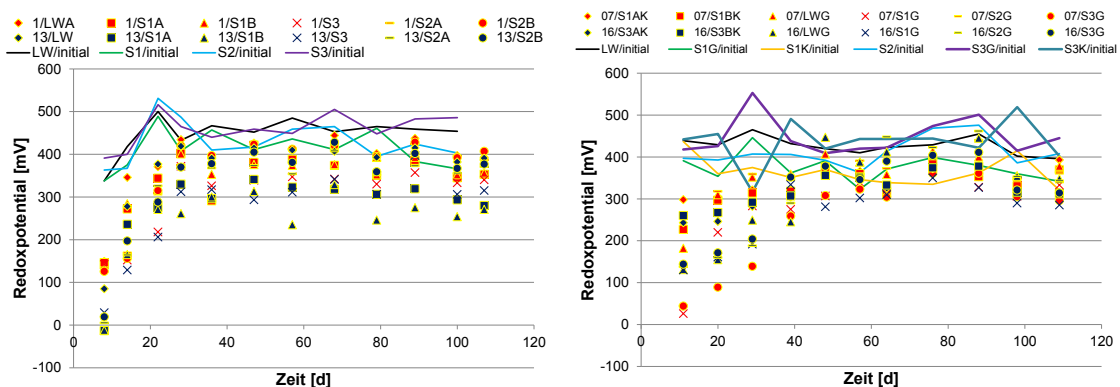


Abbildung 3-107: Entwicklung des Eh-Werts innerhalb der umströmten Wässer

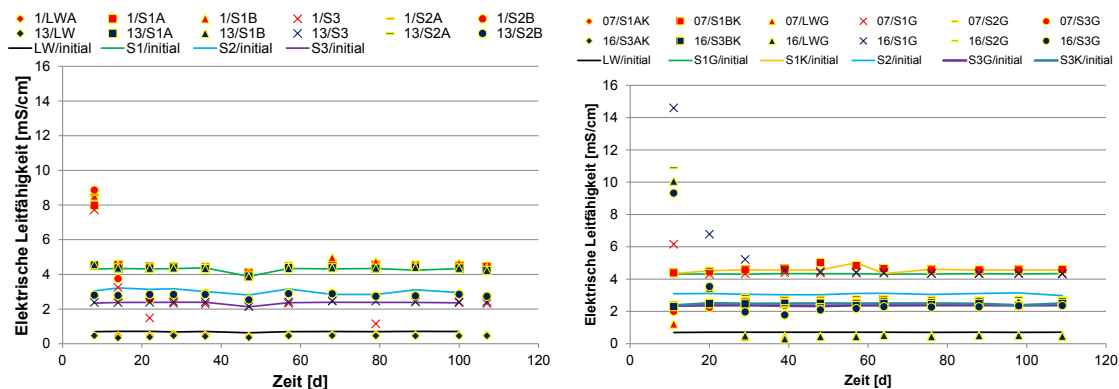


Abbildung 3-108: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit innerhalb der umströmten Wässer

Die Ionenkonzentrationen der Reaktionslösungen sind in den Abbildung 3-110 bis Abbildung 3-132 dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurden zusätzlich in Tabelle 3-32 die Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum zu Clustern zusammengefasst und gegenübergestellt. Bei der Betrachtung der einzelnen Baustoffe fällt auf, dass bei der Umströmung mit Leitungswasser die größten Veränderungen in der Ionenkonzentration auftreten. Begründet werden kann dies durch die geringen Initialkonzentrationen im Leitungswasser. Der Baustoff 13 zeigt im Gegensatz zu den übrigen Baustoffen unabhängig von den verwendeten Wässern bei den einzelnen Ionen eine gewisse Übereinstimmung. Die Ionenkonzentrationen bei Proben, bei denen ein Parallelversuch durchgeführt wurde, stimmen sehr gut überein (z.B. Abbildung 3-121/Abbildung 3-122; Abbildung 3-132) und sind somit ein Indiz für die Aussagekraft und Reproduzierbarkeit der Versuche. Demgegenüber ist beim Vergleich der gleichen Wässer in Abhängigkeit der Baustoffe nur bedingt eine Übereinstimmung zu erkennen. Dies bedeutet, dass die Reaktionen sowohl vom Baustoff als auch von der Reaktionslösung abhängig sind.

Aufgrund der Versuchsbedingungen und der Porenöffnungsweite der Hinterfüllmaterialien (Abbildung 3-140 bis Abbildung 3-151) ist die Migration der Ionen in und aus dem Baustoff diffusionsgesteuert und damit sehr langsam. Die ablaufenden Reaktionen sind dabei von den physikalischen und chemischen Bedingungen im Baustoff sowie der Reaktionslösung abhängig (Tabelle 3-10, Tabelle 3-11 und Tabelle 3-31). Die Versuche wurden nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen begonnen (Kapitel 3.2.3.9). Zu diesem Zeitpunkt ist die Hydratation des Zements noch nicht abgeschlossen. Bei der Verfestigung der Hinterfüllung sind Hydrolyse- und Hydratationsvorgänge sowie Lösungs- und Kristallisationsvorgänge die hauptsächlichen chemischen Prozesse. Die Struktur und Morphologie der Ausgangsstoffe nehmen hierbei auf den Reaktionsablauf einen starken Einfluss und es kommt innerhalb des Gemischs zur Bildung von übersättigten Lösungen, aus denen an den Phasengrenzen durch Grenzflächenvorgänge gelförmige und/oder kristalline Hydratphasen gebildet werden (Stark & Wicht 2013). Die ablaufenden Prozesse sind hierbei sehr komplex, da die Klinkerphasen sich in ihrer Reaktionsfähigkeit gegenseitig beeinflussen. Nach dem Kontakt mit Wasser beginnen die Calciumsilicate Ca^{2+} und OH^- freizusetzen. Ferner gehen durch die Dissoziation der Alkalisulfate Na^+ und K^+ in Lösung (Abbildung 3-109, siehe auch Ab-

bildung 3-37) und der pH-Wert steigt sofort auf Werte von über 12 an (Benedix 2011). Die Verfügbarkeit dieser Ionen sowie die Zusammensetzung und Konzentration der Reaktionslösung sind maßgeblich für die in den Umströmungsversuchen ablaufenden Reaktionen inklusive eines eventuellen Sulfatangriffs. Wenn die angreifende Lösung neben SO_4^{2-} -Ionen auch Mg^{2+} enthält, kann sich Brucit sowie aus Portlandit Gips bilden (siehe Gleichung (3-9)), das in beiden Fällen gefügeschädigend ist.

Tabelle 3-31: Hydratationsprodukte für verschiedene $\text{C}_3\text{A}/\text{C}_2\text{S}$ -Verhältnisse (nach Benedix 2011)

$\text{C}_3\text{A}/\text{C}_2\text{S}$	Hauptprodukte der Hydratation
>3	Ettringit und freier Gips
3,0	Ettringit
1,0...3,0	Ettringit und Monosulfat
1,0	Monosulfat
<1	Monosulfat und C_4AH_{13} , C_2AH_8 bzw. $\text{C}_3\text{A}/\text{C}_2\text{S},\text{CH})\text{H}_{12}$
0	C_3AH_6

Neben der äußeren Volumendehnung ist bei der Bildung von sekundärem Gips auch eine Erweichung der Oberfläche des exponierten Zementsteins zu verzeichnen (Stark & Wicht 2013). Beim äußeren Sulfatangriff sind in erster Linie nicht die chemischen Prozesse im Zementstein, sondern die Dichtigkeit des Betongefüges entscheidend, da die Sulfationen durch Diffusion oder Migration in die Probe eindringen können (Stark und Wicht 2013). Zur Erhöhung der Sulfatstabilität und Eindämmung der Bildung der Schadminerale Gips und Ettringit kann auf chemischem Weg durch den Einsatz von Portlandzement mit geringen Aluminatgehalten in Kombination mit einem puzzolanischen Zusatzstoff begegnet werden, da damit der zur Gipsbildung benötigte Portlanditgehalt gesenkt wird sowie durch puzzolanische oder latent hydraulische Reaktionen ein dichteres Gefüge mit einem höheren physikalischen Sulfatwiderstand entsteht (Stark & Wicht 2013). Da der diffusive Stofftransport von der Porenöffnungsweite abhängig ist, kann durch einen geringen W/Z-Wert, der eine Verringerung der Kapillarporosität mit sich bringt, insgesamt der Sulfatwiderstand erhöht werden. Eine detaillierte Beschreibung der Mechanismen des Sulfatangriffs findet sich unter anderem in Kapitel 3.2.2.3 sowie bei Stark & Wicht (2013), Müllauer (2013), Lipus & Puntke (2004) und Santhanam et al. (2002, 2003).

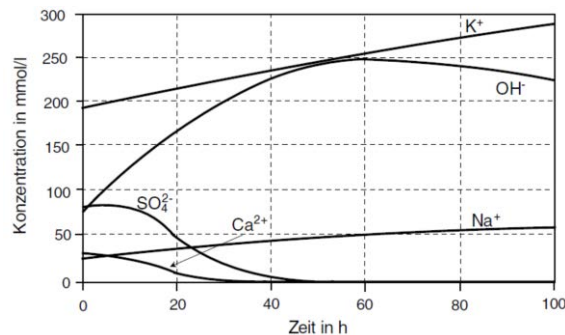


Abbildung 3-109: Zeitlicher Verlauf der Ionenkonzentration bei der Hydratation eines SR-Zements (Stark & Wicht 2013)

Tabelle 3-32: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme der Kationen- und Anionen-Konzentrationen in den jeweiligen Reaktionslösungen (für $1 < C/C_0 < 10$ wird $>$ verwendet, für $C/C_0 > 10$ wird $>>$ verwendet; für $0,5 \leq C/C_0 \leq 1,5$ wird ± 1 verwendet; für Konzentrationserhöhungen \uparrow 0-1 mg/l; $\uparrow\uparrow$ 1-10 mg/l; $\uparrow\uparrow\uparrow$ 10-100 mg/l; $\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$ >100 mg/l wird verwendet)

Probe	Na ⁺ C/C ₀	K ⁺ C/C ₀	Ca ²⁺ C/C ₀	Mg ²⁺ C/C ₀	SO ₄ ²⁻ C/C ₀	Cl ⁻ C/C ₀
01/LWG	>1	>>1	<1	≥1	>0	±1
01/S1AG	>1	>0	↑↑	↑	>0	±1
01/S1BG	±1	>0	↑↑	↑	>0	≥1
01/S2AG	>0	>>1	>0	>0	>0	>0
01/S2BG	±1	>1	±1	>0	>0	>0
01/S3G	↑↑↑	↑↑↑↑	>>1	>0	>0	>0
07/LWG	>>1	>>1	>0	<1	(>>1)	>0
07/S1G	>0	±1	↑↑	↑	>0	±1
07/S1AK	<1	>0	↑↑↑	↑↑	±1	±1
07/S1BK	<1	<1	↑↑↑	↑↑	±1	±1
07/S2G	±1	>1	<1	>0	±1	±1
07/S3G	↑↑↑	↑↑↑	>0	>0	±1	±1
13/LWG	>1	>>1	<1	<1	>0	>0
13/S1AG	±1	±1	↑↑	↑	±1	>0
13/S1BG	±1	±1	↑↑	↑	±1	±1
13/S2AG	±1	≥1	±1	<1	±1	>0
13/S2BG	±1	≥1	±1	<1	±1	>0
13/S3G	↑↑↑	↑↑↑	>>1	>0	±1	±1
16/LWG	>>1	>>1	>0	>0	>0	±1
16/S1G	±1	>0	↑↑↑	↑	>0	±1
16/S2G	>1	>1	±1	<1	>0	±1
16/S3G	↑↑↑↑	↑↑↑↑	>>1	<1	>0	±1
16/S3AK	↑↑	↑↑	>1	<1	±1	±1
16/S3BK	↑↑	↑↑	>1	<1	±1	±1

Bei der Betrachtung von Na^+ und K^+ in den Versuchen mit Leitungswasser fällt auf, dass es in den ersten 20 Versuchstagen zu einer signifikanten Erhöhung der Konzentration kommt (Abbildung 3-110, Abbildung 3-111, Abbildung 3-112, Abbildung 3-113). Mit beginnendem Kontakt der Probenkörper mit dem Leitungswasser migrieren die bei der Hydratation freigewordenen, grenzflächennahen Ionen (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) in die Reaktionslösung. Unter den gegebenen Bedingungen sind sowohl Na^+ als auch K^+ sehr gut löslich und reichern sich daher in der Reaktionslösung an. Da im Versuchsverlauf der Migrationsweg für die Kationen im Probenkörper länger wird und die Reaktionslösung alle 7-10 Tage gewechselt wurde, sinkt die Konzentration in der Reaktionslösung auf C/C_0 -Werte von 1 bis 2 ab. Die Magnesiumkonzentration in der Reaktionslösung steigt im Gegensatz zu den Alkalimetallen an, wobei die C/C_0 -Werte nicht größer als 1 werden. Diese Entwicklung hängt mit dem pH-Wert zusammen, der über den Versuchsverlauf abnimmt. Zu Versuchsbeginn sind die pH-Werte über 10, so dass $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ausfällt. Mit der Abnahme des pH-Werts bleiben gemäß Abbildung 3-65 (links) vermehrt Mg^{2+} in Lösung. Ein ähnliches Verhalten zeigt das Ca^{2+} , welches jedoch gemäß Abbildung 3-114 erst bei höheren pH-Werten als Hydroxid ausfällt. Da die Sulfatkonzentration im Leitungswasser mit ca. 50 mg/l weit unterhalb der Sättigungskonzentration des Gipses liegt und die Werte über den Versuchsverlauf weitgehend bei $C/C_0 \pm 1$ liegen, kann davon ausgegangen werden, dass kein Gips an der Probenoberfläche ausgefallen ist, was zusätzlich zu einer Ca^{2+} -Konzentrationsreduktion geführt hätte. Auch die Chloridkonzentrationen liegen bei den Versuchen mit Leitungswasser bei $C/C_0 \pm 1$, was durch die sehr gute Wasserlöslichkeit der Alkali- und Erdalkalichloride begründet ist.

Allgemein sind bei den Versuchen mit Leitungswasser baustoffbedingte Konzentrationsunterschiede in den Reaktionslösungen zu erkennen, aber prinzipiell ist das chemische Verhalten ähnlich ausgeprägt. Die Ergebnisse aus Umströmungs- und Batchversuchen mit Leitungswasser (Kapitel 3.2.4.4) zeigen bis auf die Calciumkonzentrationen beim Material 16 einen ähnlichen Trend und sind demnach vergleichbar. Eine Erklärung wäre, dass sich im Umströmungsversuch im Gegensatz zum Batchversuch eine stabile Hydroxidschicht um den Probenkörper bilden konnte. Bei den Absolutkonzentrationen muss darauf geachtet werden, dass das Verhältnis Wasservolumen zum Feststoffgewicht beim Batchversuch 10 und beim Umströmungsversuch im geschlossenen Kreislauf ca. 3 betrug. Deshalb sind die gemessenen Konzentrationen im Umströmungsversuch teilweise höher als im Batchversuch (Verdünnungseffekt, etc.). Zudem wurden beim geschlossenen Kreislaufsystem bei jeder Probennahme das Wasser komplett ersetzt bzw. beim kontinuierlichen Betrieb stetig Ionen dem System entzogen. Neben weiterer Einflussfaktoren aufgrund der unterschiedlichen Versuchsaufbauten und -bedingungen (Umströmung, Verdunstungsmöglichkeit, potentielle Sauerstoffaufnahme im Umströmungsversuch) ergeben sich dementsprechende unterschiedliche Konzentrationsverläufe im Batch- und Umströmungsversuch.

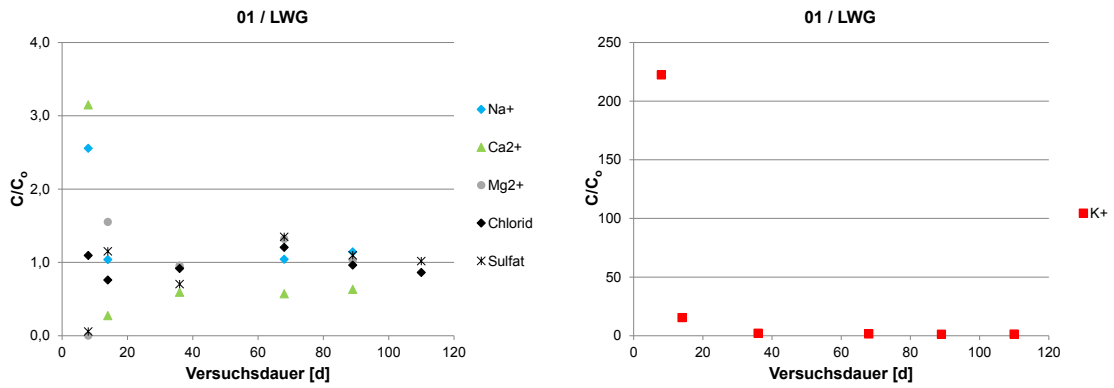


Abbildung 3-110: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung LWG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 01

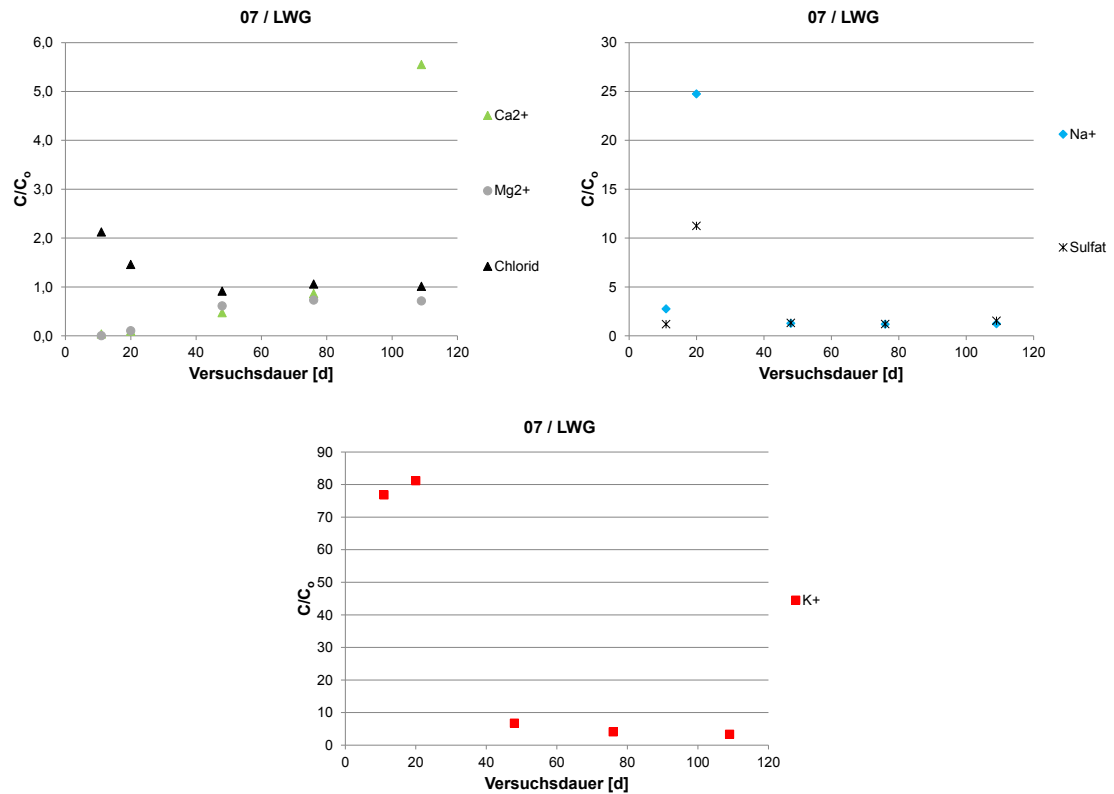


Abbildung 3-111: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung LWG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

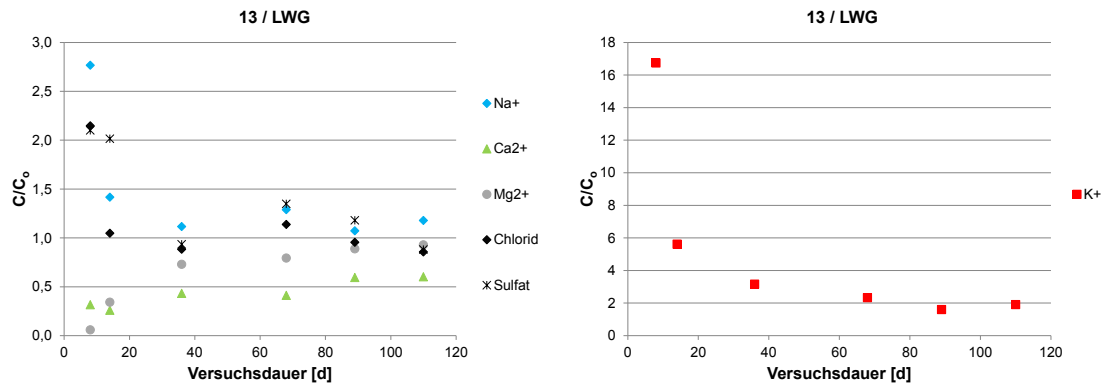


Abbildung 3-112: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung LWG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

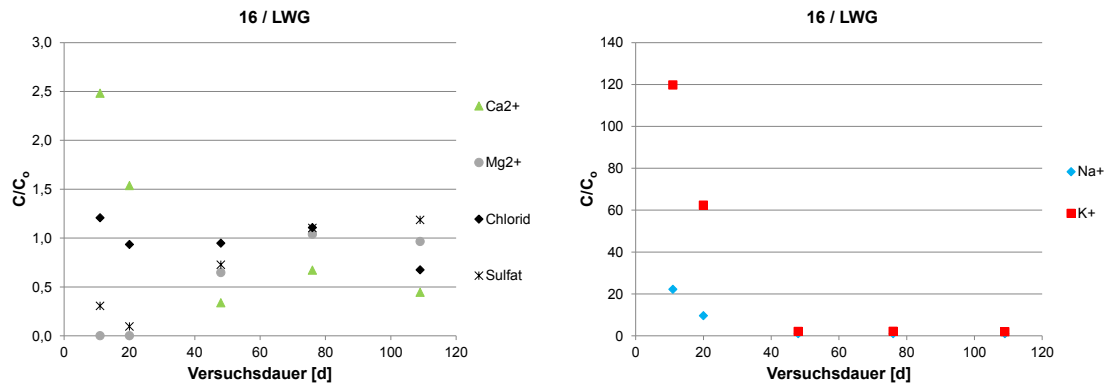


Abbildung 3-113: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung LWG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 16

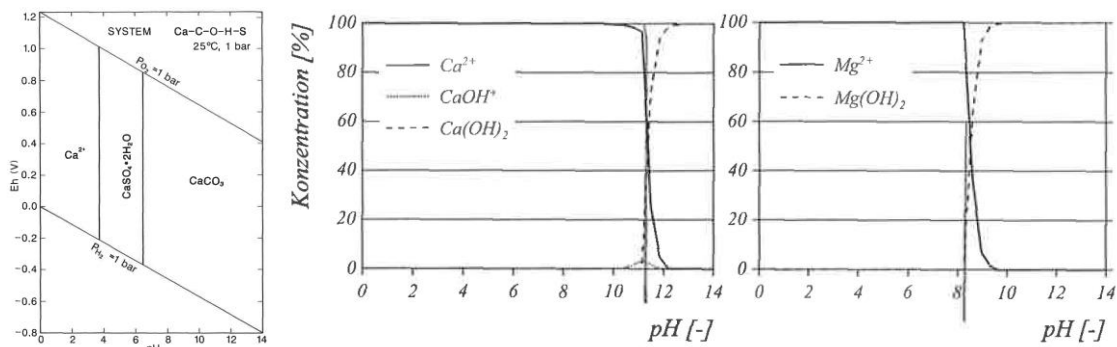


Abbildung 3-114: Eh-pH-Diagramme des Systems Ca-C-O-H-S (Brookins 1988) (links) und Lösungsgleichgewicht verschiedener Ca- und Mg-Spezies unter Standardbedingungen (Haus 2002) (Mitte und rechts)

Bei den Versuchen mit dem Wasser des Typs S1 waren initial keine Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen enthalten, so dass für diese Ionen in den folgenden Diagrammen (Abbildung 3-115 bis Abbildung

3-123) Konzentrationen in mg/l angegeben werden. Für die Hinterfüllmaterialien 01 und 13 wurde bei geschlossener Umströmung und für die Hinterfüllung 07 bei kontinuierlicher Umströmung jeweils ein Parallelversuch durchgeführt. Darüber hinaus wurde für den Baustoff 07 zusätzlich ein Versuch mit geschlossener Umströmung ausgeführt. Es zeigt sich anhand der Ergebnisse, dass die Werte der Parallelversuche sehr gut übereinstimmen (Abbildung 3-115 und Abbildung 3-116; Abbildung 3-121 und Abbildung 3-122; Abbildung 3-119 und Abbildung 3-120), so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Versuchsanordnung reproduzierbare Ergebnisse liefert. Beim Vergleich der unterschiedlichen Umströmungsmethoden ist ein geringfügiger Unterschied erkennbar. Besonders beim Mg^{2+} und Ca^{2+} zeigt sich, dass es bei geschlossener Umströmung innerhalb der Reaktionslösung zu einem kontinuierlichen Anstieg dieser Ionen kommt. Dieser Anstieg ist bei kontinuierlicher Umströmung für Mg^{2+} gar nicht und für Ca^{2+} nur bedingt zu beobachten. Für die anderen Ionen ist kein einheitlicher Trend erkennbar. Lediglich die Konzentrationen sind bei geschlossener Umströmung geringfügig höher als bei kontinuierlicher Umströmung. Der Grund für diese Entwicklung ist die längere Kontaktzeit und das begrenzte Wasservolumen im Falle der geschlossenen Umströmung.

Die Konzentrationen der Alkalimetalle Na^+ und K^+ verhalten sich für die untersuchten vier Baustoffe und in Abhängigkeit von der Umströmungsart unterschiedlich. Beim Baustoff 01 sind die Werte gegenüber der Initialkonzentration leicht erhöht. Lediglich der erste Messwert ist wie beim Versuch mit Leitungswasser deutlich höher, was der Freisetzung dieser Ionen zum Beginn des Hydratationsprozesses innerhalb des Probenkörpers, sowie den über die Zeit länger werdenden Migrationswegen geschuldet ist. Von der Probe 01/S1A wurde eine μ -RFA-Analyse durchgeführt (Abbildung 3-117). Hierbei zeigt sich eine deutliche Korrelation der Sulfat- und Kaliumionen, was wahrscheinlich durch die Bildung von Syngenit verursacht wird, der auch schwach im Röntgendiffraktogramm zu erkennen ist (Abbildung 3-133, kleiner Peak auch im Batchversuch in Abbildung 3-82 erkennbar). Beim Syngenit handelt es sich um ein Sulfatmineral mit der chemischen Zusammensetzung $K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$, das bei hohen Sulfat- und Kaliumkonzentrationen ausfällt. Wie bereits im Versuch mit Leitungswasser beobachtet, ist die Kaliumkonzentration beim Baustoff 01 höher als bei den übrigen Baustoffen. Für den Baustoff 07 zeigt sich, dass Na^+ und K^+ bei geschlossener Umströmung um den Wert $C/C_0 \pm 1$ schwanken, während sie bei kontinuierlicher Umströmung etwas kleiner als 1 sind. Beim Hinterfüllbaustoff 13 liegen die Na^+ und K^+ -Konzentrationen über die gesamte Versuchszeit bei ± 1 , so dass davon ausgegangen werden kann, dass keine spezifischen Reaktionen mit diesen Ionen auftreten. Ganz anders geartet ist jedoch die zeitliche Entwicklung der Alkalimetalle beim Versuch mit dem Baustoff 16. Hier sinkt zu Versuchsbeginn die K^+ -Konzentration um sich dann im Versuchsverlauf $C/C_0 \pm 1$ anzunähern. Einen gleichen Konzentrationsverlauf zeigt auch das Sulfat, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich bei den gegebenen Bedingungen Syngenit gebildet hat. Die Na^+ -Konzentration zeigt wie beim Versuch mit Leitungswasser zu Versuchsbeginn einen leicht erhöhten Wert, der wahrscheinlich auf die Lösung der Alkalisulfate im Zuge der Hydratation zurückzuführen ist.

Die Entwicklung der Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Konzentration ist wie in den Versuchen mit Leitungswasser an die Entwicklung des pH-Werts gekoppelt, der entscheidend für die Ausfällung von Brucit und

Portlandit ist. Zu erwähnen ist hierbei, dass die Werte des Baustoffs 07 bei kontinuierlicher Umströmung am Tag 48 (blaue Ellipse in Abbildung 3-119, Abbildung 3-120), die vom übrigen Trend deutlich abweichen, auf einen Fehler bei der Herstellung der Reaktionslösung zurückzuführen sind, die in dieser Versuchswoche Mg^{2+} und Ca^{2+} initial enthielt. Allgemein sind die Magnesiumkonzentrationen in allen Versuchen mit Werten $< 1\text{ mg/l}$ sehr gering und liegen immer unterhalb der Konzentration des Na^+ , K^+ und Ca^{2+} .

Die Sulfat- und Chloridkonzentrationen schwanken mit Ausnahme des Baustoffs 16 (siehe oben) um $C/C_0 \pm 1$. Hier kann davon ausgegangen werden, dass bis auf den diffusiven Stofftransport in den Probekörper keine weitere Reaktion in der Lösung stattfindet.

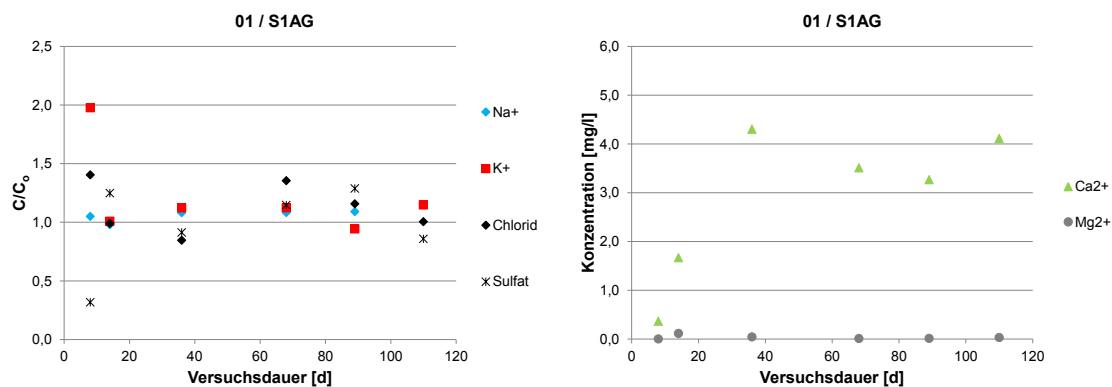


Abbildung 3-115: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1AG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 01

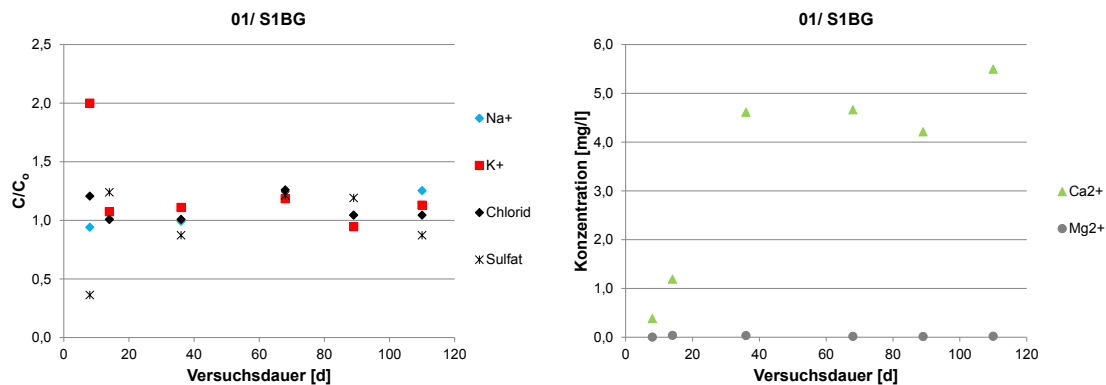


Abbildung 3-116: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1BG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 01

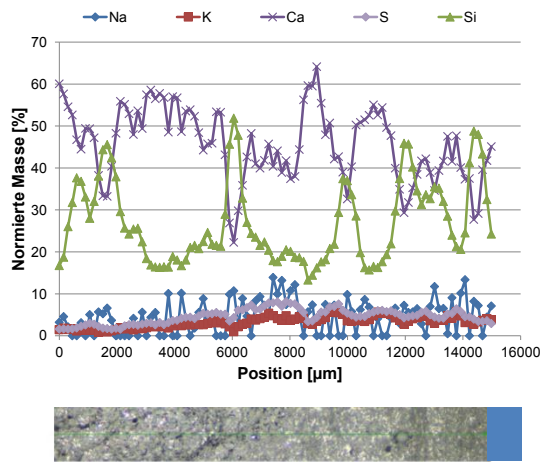


Abbildung 3-117: μ -RFA- Aufnahme der Reaktionszone der Probe 01/S1A

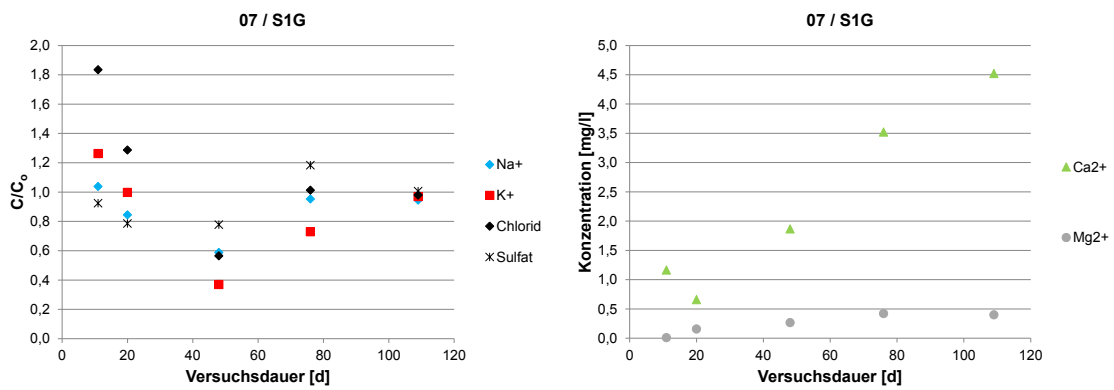


Abbildung 3-118: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

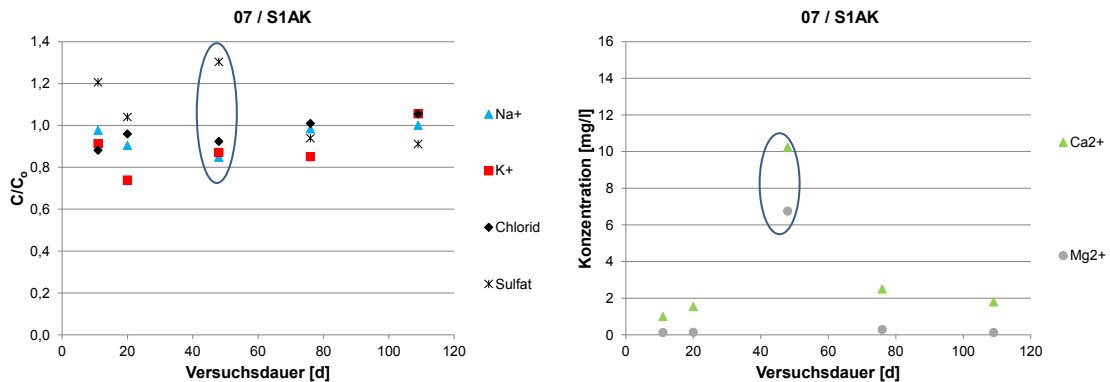


Abbildung 3-119: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1AK im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

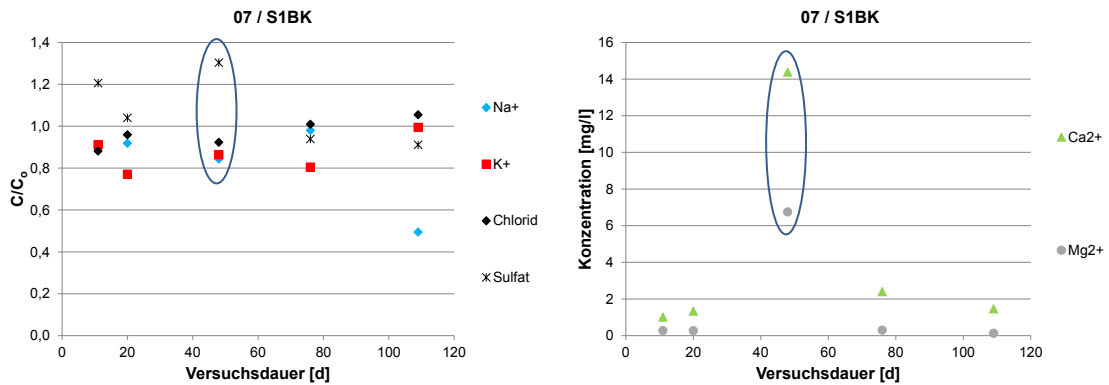


Abbildung 3-120: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1BK im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

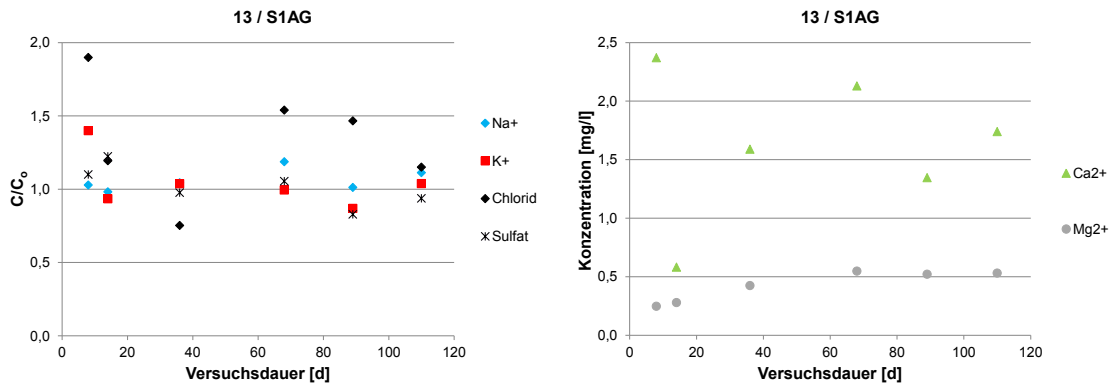


Abbildung 3-121: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1AG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

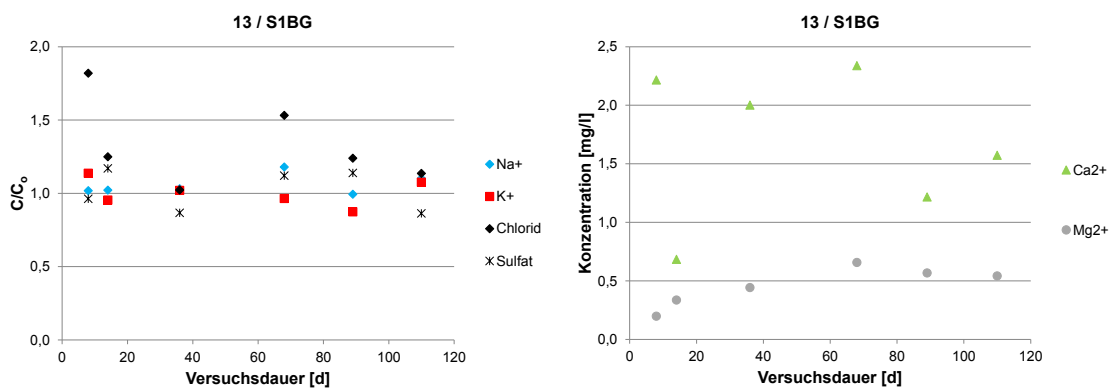


Abbildung 3-122: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1BG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

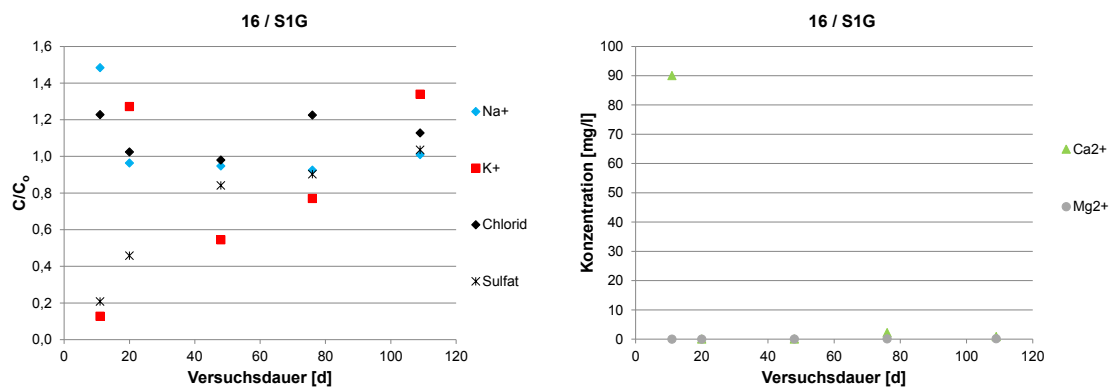


Abbildung 3-123: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S1G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 16

Die Entwicklung der Kationen und des Chlorids bei den Versuchen mit Wasser des Typs 2 verhalten sich weitgehend analog zu den vorher beschriebenen Versuchen. Darüber hinaus stimmen auch die Ergebnisse der Parallelversuche jeweils gut überein. Für den Baustoff 01 zeigen sich zu Versuchsbeginn geringere Sulfatkonzentrationen als im Versuch mit dem Wasser des Typs 1, wobei hier bereits ein ähnliches Verhalten angedeutet wird, dieses jedoch deutlich geringer ausgeprägt ist. Diese Entwicklung lässt sich durch die Entstehung von Syngenit erklären, da auch die K⁺-Konzentrationen entsprechend hoch sind. Dasselbe Verhalten der K⁺- und Sulfatkonzentration ist beim Baustoff 16 noch deutlicher ausgeprägt, so dass auch hier die Syngenitbildung in den ersten 40 Versuchstagen wahrscheinlich ist. Innerhalb des Zements verschwindet Syngenit nach geraumer Zeit wieder und es bildet sich sekundärer Gips (Benedix 2011, Stark & Wicht 2013). Gips kann sich in Abhängigkeit der Sulfatkonzentration bis zu einem pH-Wert von etwa 12,8 aus Portlandit bilden (Abbildung 3-64). Bei einem pH-Wert von 12,45 (reine Portlanditlösung ohne zusätzliche Alkalien bei 25 °C) ist eine Sulfatkonzentration von 1400 mg/l nötig, um Gips auszufällen. Je basischer der pH-Wert, desto höher die erforderliche Sulfatkonzentration zur Fällung von Gips. Aufgrund der Tatsache, dass der pH-Wert nach 10 Tagen unterhalb von 12 lag und im weiteren Versuchsverlauf unter 10 abfiel (Abbildung 3-106), waren die Bedingungen für die Ausfällung von Gips gegeben. Der experimentelle Nachweis des Syngenit war während des Experiments versuchsbedingt nicht möglich. Dagegen konnte nach Versuchsende auf der Oberfläche der Probenkörper Gips röntgendiffraktometrisch nachgewiesen werden (Abbildung 3-133). Die Syngenit- und Gipsbildung ist beim Baustoff 16 deutlich ausgeprägter als beim Baustoff 01, was sich sowohl in der Entwicklung der K⁺- und Sulfationen (Abbildung 3-124, Abbildung 3-125, Abbildung 3-129) als auch in den deutlicheren Gipspeaks im Röntgendiffraktogramm (Abbildung 3-133) zeigt. Die Neubildung von Ettringit durch einen äußeren Sulfatangriff konnte im Versuch nicht nachgewiesen werden, es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass sich dieses Sulfatmineral sekundär gebildet hat. Ettringit bildet sich innerhalb eines pH-Wert Bereiches zwischen 10,5 und 13,2 (Müllauer 2013). Die gemessenen pH-Werte bei allen Baustoffen liegen bei den Initial- und Blindproben innerhalb dieses pH-Bereiches. Im Versuchsverlauf mit den Wässern des Typs S1-S3 nimmt beim Baustoff 16 der pH-Wert im Probenkörper (äußerer Bereich) jedoch auf Werte

zwischen 9,5 und 10,7 ab (Abbildung 3-106). Da sich Ettringit bei einem pH-Wert von 9,5 bis 10,7 in Gips und Aluminiumhydroxid umwandelt (Müllauer 2013) ist in den stark beeinträchtigten Proben des Baustoffs 16 kein Ettringit zu erwarten. Eine Bildung von Monocarbonaten in den Hinterfüllbaustoffen kann aufgrund der pH-Werte, die kleiner als 13,4 sind, ausgeschlossen werden, da sich erst ab diesem pH-Wert zunehmend Monocarbonat bildet und die Ettringitbildung abnimmt (Bollmann 2000).

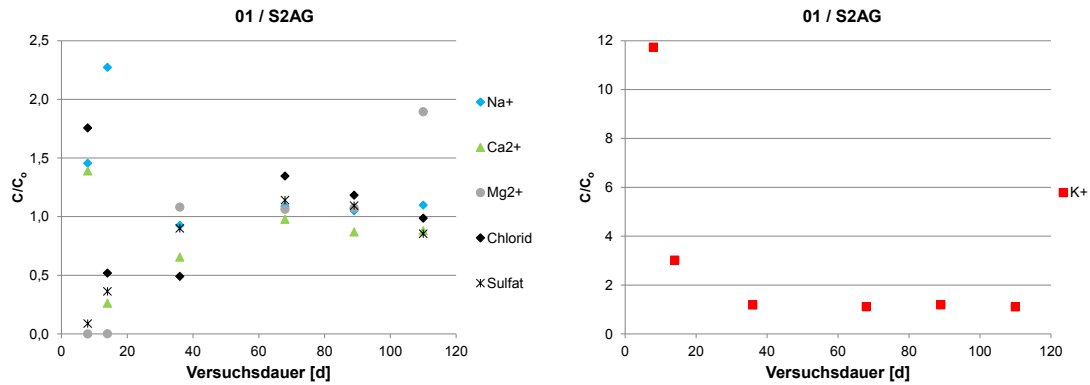


Abbildung 3-124: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S2AG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 01

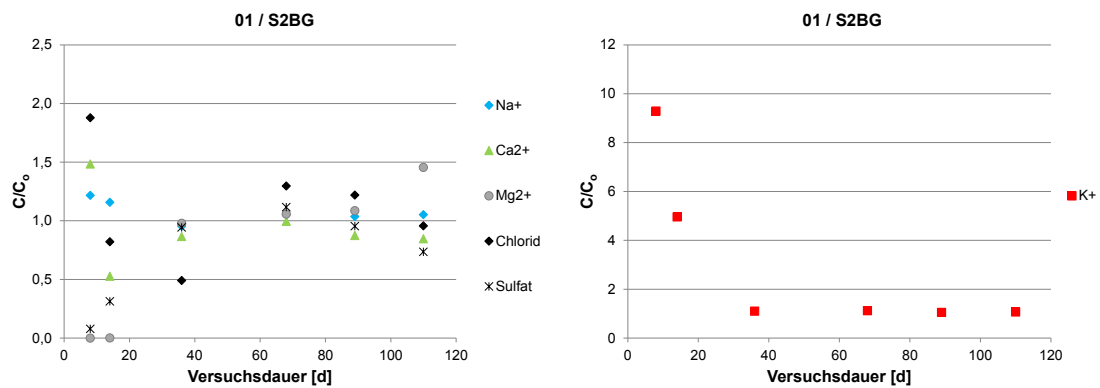


Abbildung 3-125: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S2BG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 01

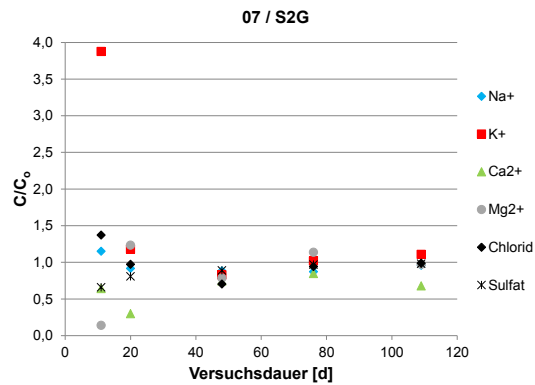


Abbildung 3-126: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S2G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

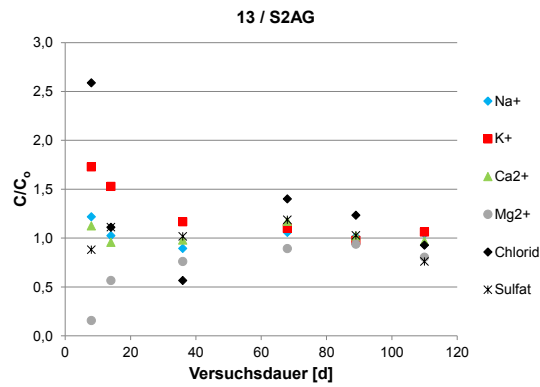


Abbildung 3-127: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S2AG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

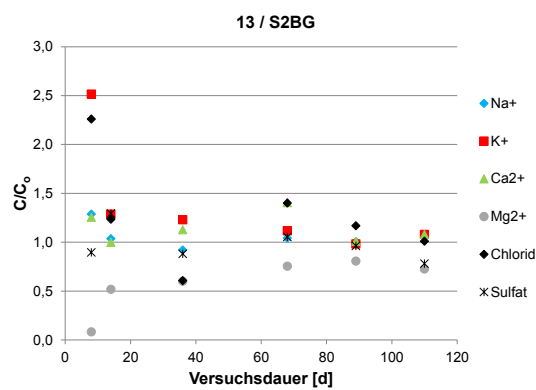


Abbildung 3-128: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S2BG im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

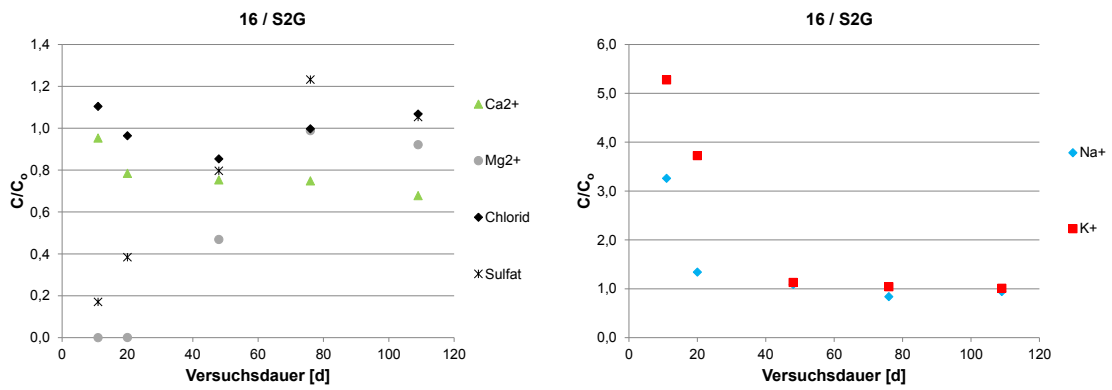


Abbildung 3-129: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S2G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 16

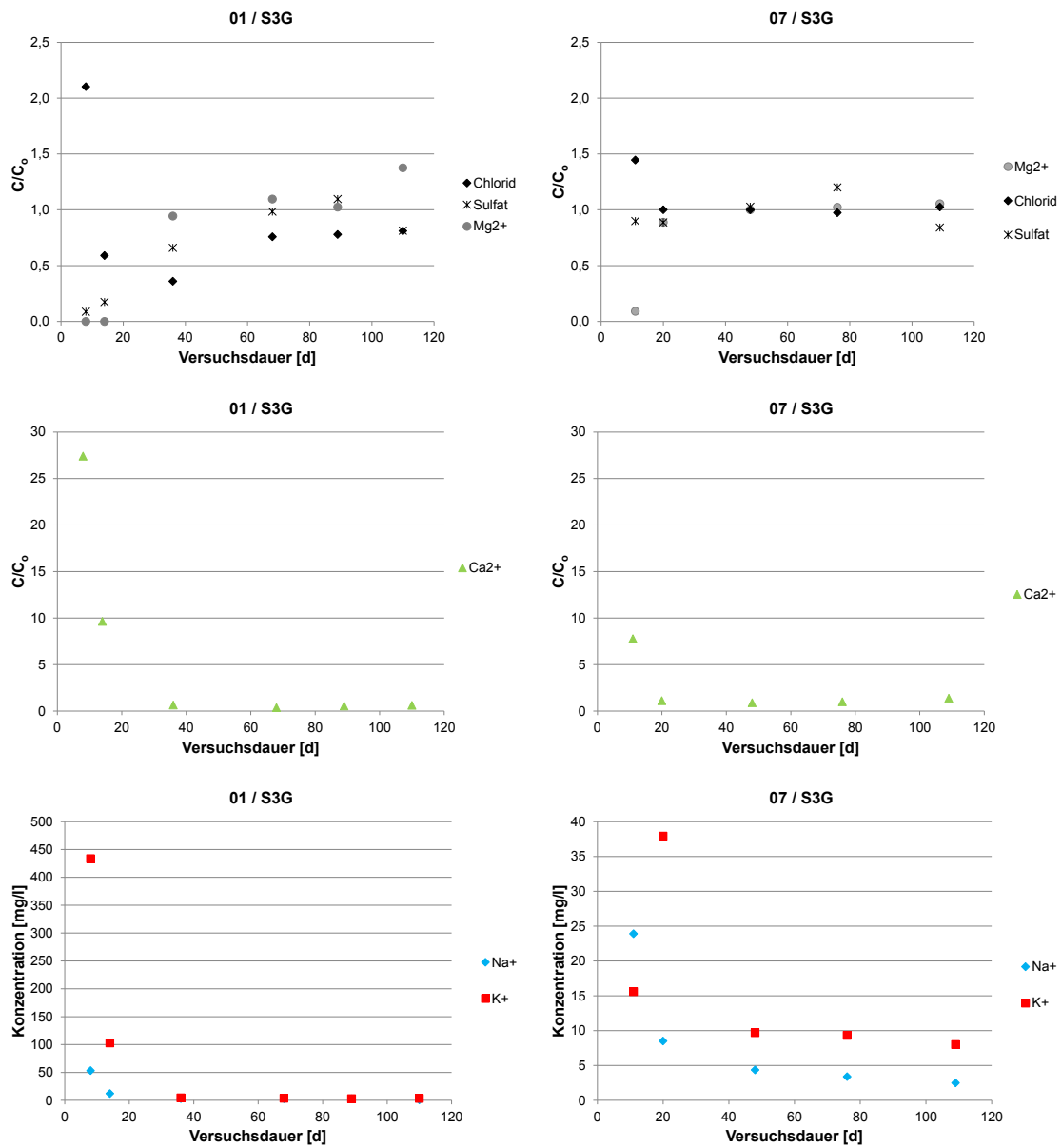


Abbildung 3-130: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S3G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 01 (links) und dem Baustoff 07 (rechts)

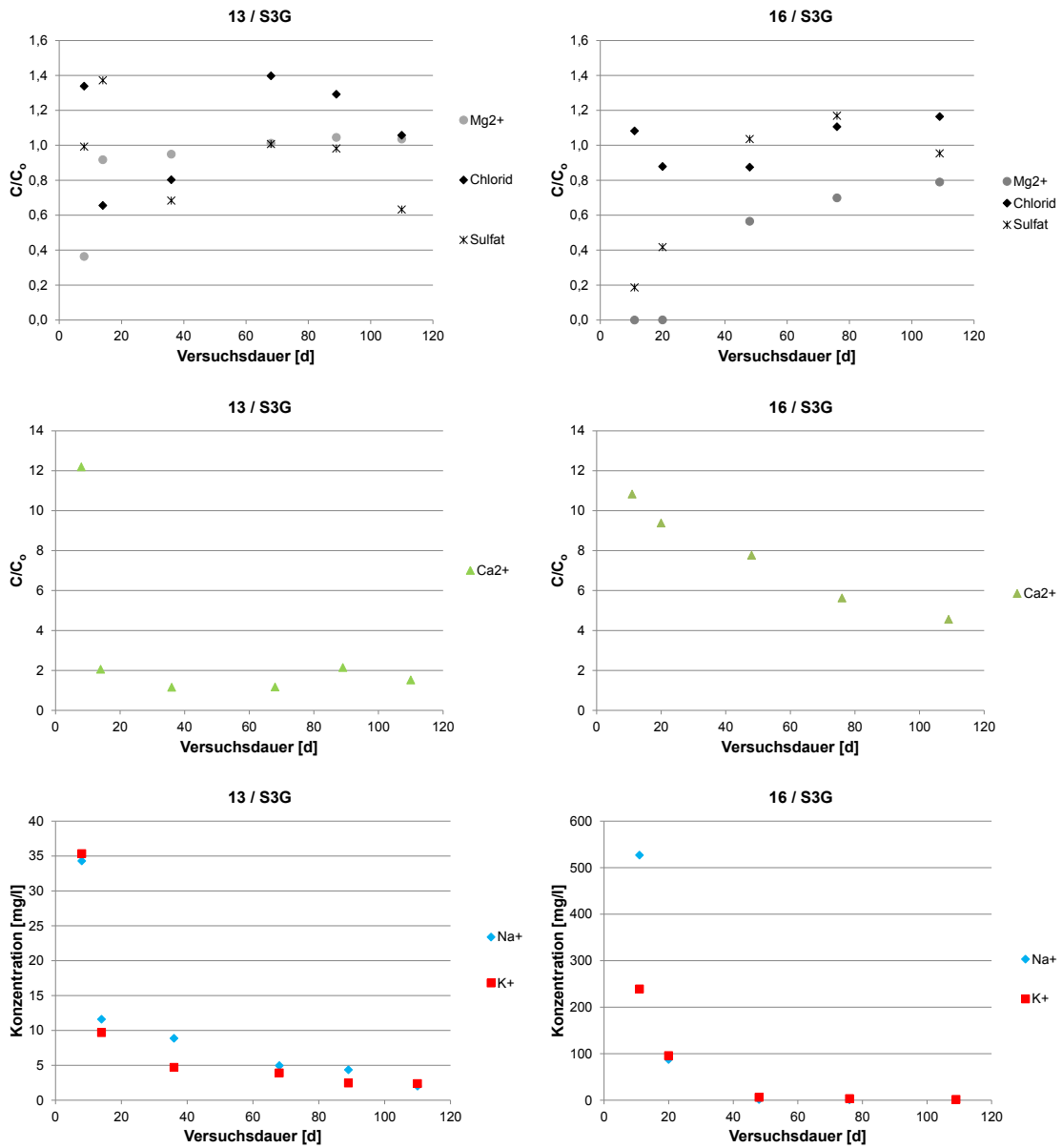


Abbildung 3-131: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S3G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13 (links) und dem Baustoff 16 (rechts)

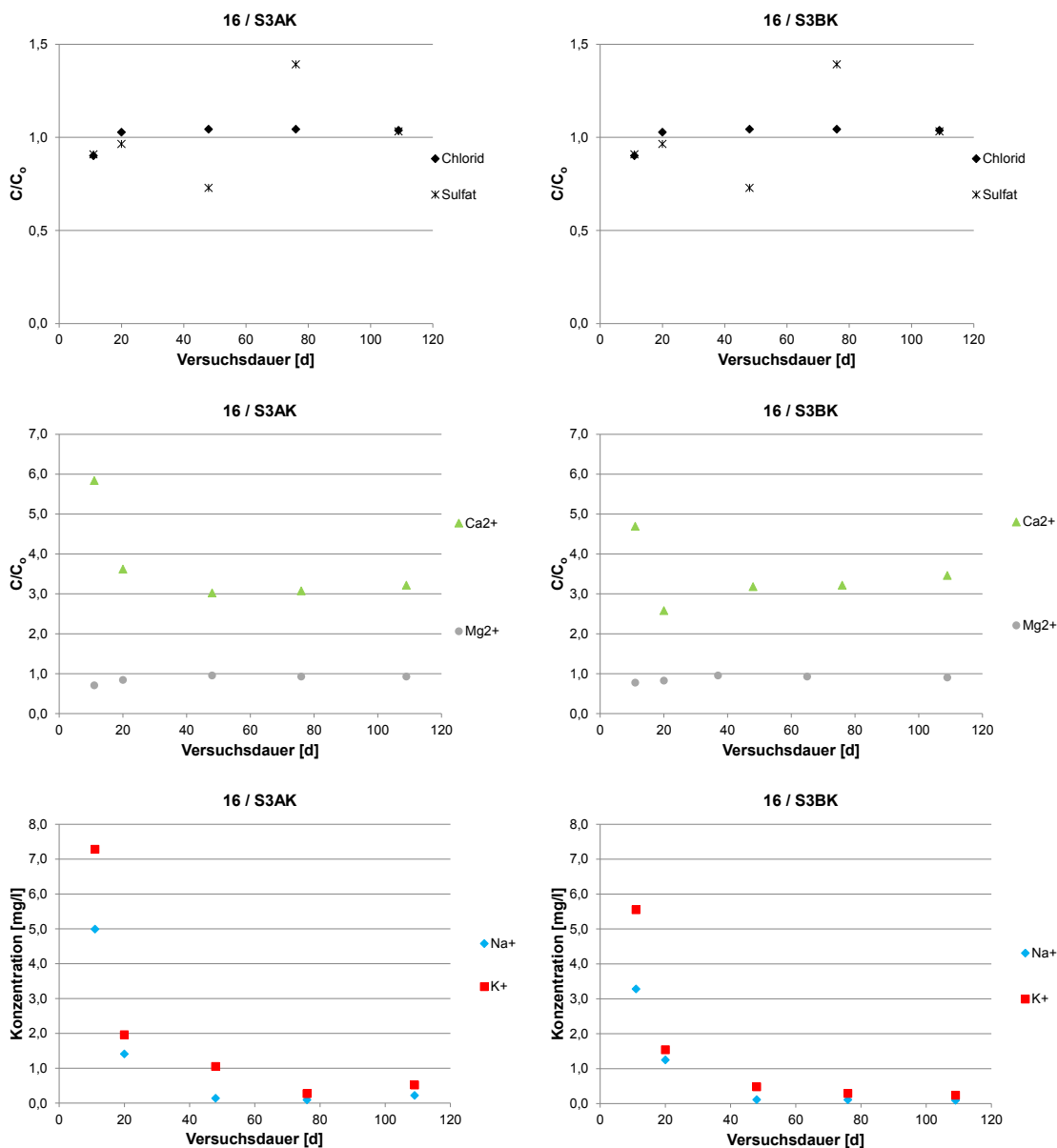


Abbildung 3-132: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung S3AK im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 16 (links) und in der Reaktionslösung S3BK im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 16 (rechts)

Bei den Versuchen mit dem Wasser des Typs S3 waren initial keine K⁺- und Na⁺-Ionen enthalten, so dass analog zum Versuch mit Wasser des Typs 1 für diese Ionen in den folgenden Diagrammen die Konzentrationen in mg/l angegeben werden (Abbildung 3-130; Abbildung 3-132). Für den Baustoff 16 wurde bei kontinuierlicher Umströmung ein Parallelversuch durchgeführt und zusätzlich ein Versuch bei geschlossener Umströmung. Die Konzentrationsentwicklung der untersuchten Ionen zeigt die gleichen Trends wie in den Versuchen, die mit Wasser des Typs 2

durchgeführt worden sind, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die selben Reaktionen stattfanden, wenn auch sicherlich in unterschiedlicher Intensität. Dies zeigt sich besonders beim Baustoff 16, der bei Umströmung mit Wasser des Typs S3 stärker beeinträchtigt wurde (Abbildung 3-104, rechts).

In Abbildung 3-133 ist die röntgendiffraktometrisch bestimmte mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Proben dargestellt, inklusive der Initialproben (jeweils roter Graph). Hierbei lassen sich aufgrund ihrer geringen Kristallgröße, die bei der Hydratation entstehenden Calciumsilicathydrate, röntgenographisch nicht nachweisen (Stark & Wicht 2013). Auch die während des Umströmungsversuchs entstehenden Zwischenphasen (z.B. Syngenit im Frühstadium des Versuchs) können versuchsbedingt nicht gemessen werden. Aufgrund der Mischkristallbildung, der Kristallinität und der Kristallgröße ist eine eindeutige Zuordnung der Mineralphase nur bedingt möglich.

Schon im Initialstadium zeigen die untersuchten Hinterfüllungen deutlich unterschiedliche mineralogische Zusammensetzungen (rote Graphen in Abbildung 3-133, und Kapitel 3.1.5.1.6), die sich auch auf die ablaufenden Prozesse beim Sulfatangriff auswirken. So ist im Baustoff 01 und 16 initial Portlandit vorhanden, aus dem sich im Zuge des Sulfatangriffs Gips bildet (Stark & Wicht 2013). Diese Gipsbildung ist besonders in den Wässern ausgeprägt, die die Erdalkalimetalle Ca^{2+} und Mg^{2+} enthalten. Prinzipiell wurde in allen Hinterfüllbaustoffen Gips nachgewiesen, aber lediglich in Baustoff 16 wurden in Abhängigkeit der Umströmungsart und der verwendeten Wässer höhere Werte ermittelt. Es zeigt sich, dass bei der kontinuierlichen Umströmung mit Wasser des Typs 3 mehr Gips gebildet wurde als bei der geschlossenen Umströmung mit derselben Reaktionslösung. Unter der Berücksichtigung, dass Gips zur Erweichung der Oberfläche von exponierten Zementsteinen beiträgt, entsprechen diese Ergebnisse dem Vergleich mit dem makroskopisch erkennbaren Schadensbild (Abbildung 3-104). Neben der Gipsbildung konnte im Baustoff 01 sowie im Baustoff 16 auch untergeordnet Syngenit detektiert werden.

Die Bildung von Brucit konnte in allen Hinterfüllmaterialien, die mit dem Wasser des Typs S3 umströmt wurden, nachgewiesen werden. Bei der Umströmung mit Leitungswasser konnte Brucit lediglich in Hinterfüllmaterial 13 ermittelt werden und bei der Umströmung mit Wasser des Typs 2 in Baustoff 01, 13 und 16. In den übrigen Proben konnte kein Brucit nachgewiesen werden, da wahrscheinlich während der Hydratation nur wenig Mg^{2+} freigesetzt wurde und diese Wässer initial kein Mg^{2+} enthalten. Dies deckt sich auch mit den chemischen Analysen der Reaktionswässer. Besonders in den Proben, die mit Ca^{2+} -reichen Wässern umströmt wurden, tritt ein Mineral auf, das nicht eindeutig zugeordnet werden kann (mit ? gekennzeichnet). Hierbei könnte es sich aufgrund der chemischen Zusammensetzung um Glaubernit handeln, ein Sulfat mit der Summenformel $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$.

Ettringit und Thaumazit konnten röntgendiffraktometrisch nicht nachgewiesen werden. Aufgrund des lösenden Angriffs an Baustoff 16 kann aber davon ausgegangen werden, dass sich Thaumazit gebildet haben muss. Der Baustoff 07 zeigt röntgenographisch die geringsten Veränderungen, gefolgt von Baustoff 01, 13 und 16.

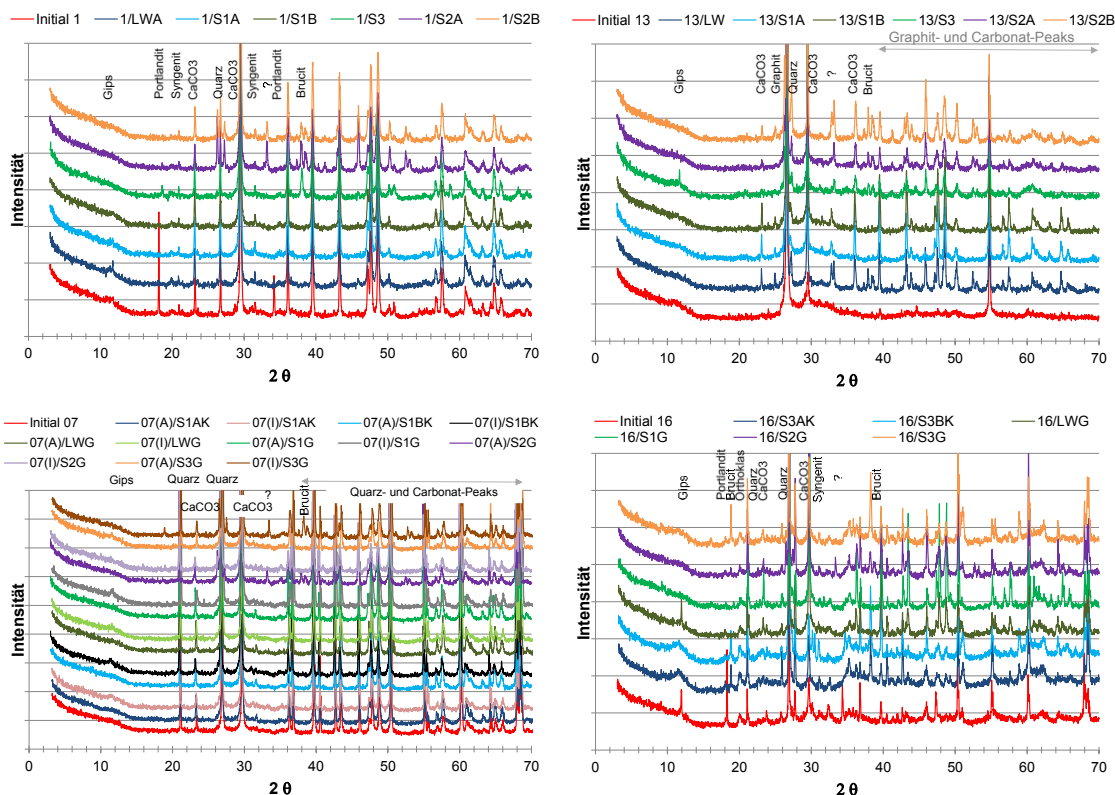


Abbildung 3-133: Mineralogische Zusammensetzung der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 nach der Umströmung mit sulfathaltigen Wässern

Ein Versuchsparameter, der initial, während und bei Versuchsende ermittelt wurde, ist die Längenänderung der Versuchsprismen, da es durch den Sulfatangriff zu einer Dehnung aufgrund der Mineralneubildungen kommt. Nach den derzeit in Deutschland durchgeführten Prüfverfahren für den äußeren Sulfatangriff sollte die Längenänderung von Flachprismen (160 x 40 x 10 mm) 0,5 mm/m nicht übersteigen (Stark & Wicht 2013). In Abbildung 3-134 sind die Ergebnisse der relativen Längenänderung dargestellt. Auffallend ist hierbei, dass beim Baustoff 16 lediglich ein Wert vorhanden ist. Dies liegt daran, dass die Proben schon frühzeitig so stark ihre Festigkeit verloren haben, dass kein Ausbau während des laufenden Versuchs möglich war. Beim Baustoff 01 zeigt sich, dass die Längenänderung den geforderten Wert von 0,5 mm/m deutlich übersteigt, während sie beim Baustoff 13 nur zum Teil geringfügig über dem geforderten Wert liegen. Hierbei muss allerdings angemerkt werden, dass die Längenmessung direkt auf der Probenoberfläche erfolgte und nicht auf einer in den Probenkörper eingelassenen Messspitze. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da nur eine beschränkte Anzahl von Proben in die Versuchsanlage eingebaut werden konnte und mit diesen Proben eine Vielzahl weiterer Untersuchungen durchgeführt werden sollten. Eine eingebaute Messspitze hätte verhindert, dass die Proben für die weiteren Untersuchungen ungestört vorliegen. Durch diese Art der Messung wurde also nicht nur eine mögliche Dehnung der Probe gemessen, sondern auch die auf der Probeoberfläche entstandenen Ausfällungen (Abbildung 3-103, Abbildung 3-104), die eine Schichtdicke von wenigen zehnteln

Millimetern aufwiesen. Dieser Einfluss zeigt sich besonders bei den Baustoffen 01 und 13. Die Probenkörper, die mit Ca^{2+} und Mg^{2+} -haltigen Wässern umströmt wurden, zeigen aufgrund der Ausfällung von Brucit und Portlandit eine deutlichere Längenänderung als zum Beispiel die, die mit Wasser des Typs 1 umströmt wurden. Das Maß der Ausfällungen wird dabei durch die physikochemischen Parameter der Reaktionsflüssigkeit sowie der ablaufenden Prozesse an der Probenoberfläche bestimmt. Aufgrund der in dieser Studie durchgeführten Untersuchungsmethode ist die relative Längenänderung mit dem Kriterium von $< 0,5 \text{ mm/m}$ ohne Verwendung einer eingebauten Messspitze nicht aussagekräftig und sollte daher für die Bewertung der Sulfatbeständigkeit der Hinterfüllbaustoffe bei dieser Versuchsdurchführung nicht herangezogen werden. Diese Aussage wird durch die Untersuchungen zum Säureangriff untermauert.

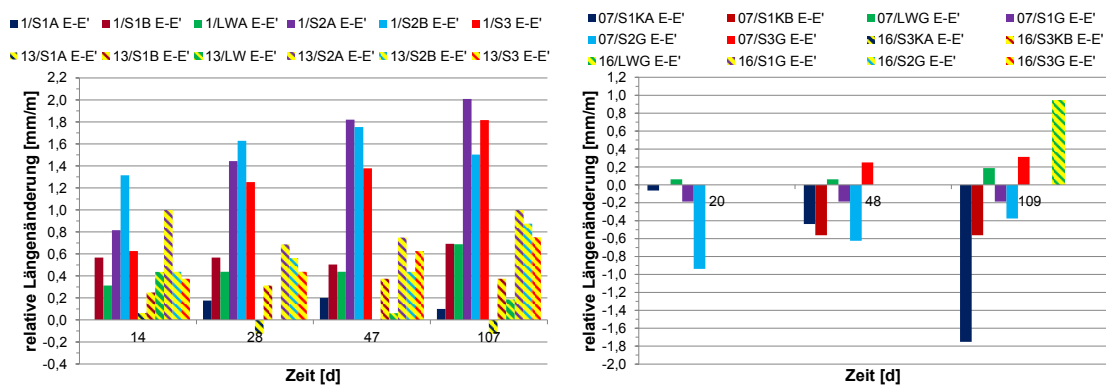


Abbildung 3-134: Relative Längenänderung der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 nach der Umströmung mit sulfathaltigen Wässern

Die relative Gewichtsveränderung zeigt für die Baustoffe 01, 07 und 13 zu Versuchsbeginn eine starke Gewichtszunahme, die im Versuchsverlauf geringer wird. Zu Versuchsbeginn nimmt die Probe zum einen Wasser auf, da die Proben aufgrund ihrer Lagerung (Kapitel 3.2.3.9) nicht zu 100 % wassergesättigt sind und zum anderen tragen die Ausfällungen mit zur Gewichtserhöhung bei. Die Entwicklung der Gewichtsveränderung und der Längenänderung stimmen gut überein und stützen somit die Aussage hinsichtlich der Ausfällungen.

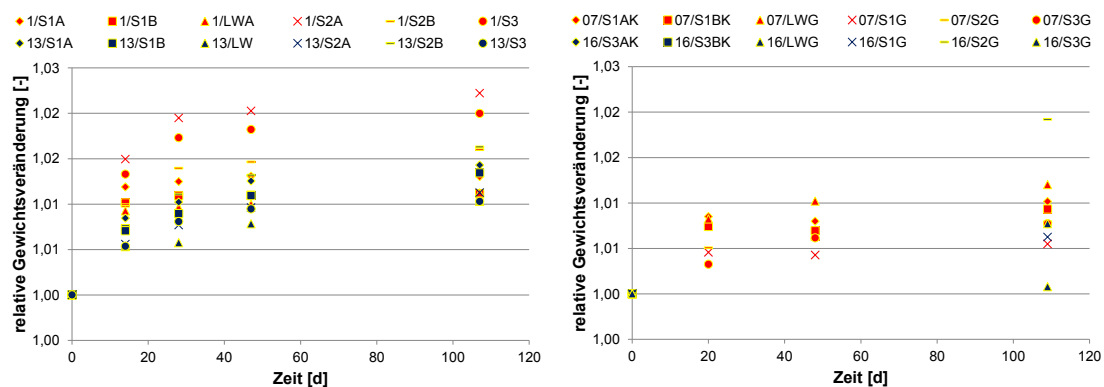


Abbildung 3-135: Relative Gewichtsveränderung der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 nach der Umströmung mit sulfathaltigen Wässern

Für die Bewertung der Festigkeit von Prüfkörpern, die im Zuge des äußeren Sulfatangriffs einer Reaktionslösung ausgesetzt waren, gibt es derzeit keine allgemeingültigen Werte. Aufgrund der angewandten Prüfverfahren wird derzeit für die relative Biegezugfestigkeit von in sulfataggressiven Wässern gelagerten Kleinprismen (60 x 10 x 10 mm) ein Wert von mindestens 0,7 herangezogen (Stark & Wicht 2013). Entsprechend der LQS EWS (2012) muss die Druckfestigkeit der Hinterfüllbaustoffe mindestens 1 N/mm² betragen.

Werden die Werte der relativen Biegezugfestigkeit herangezogen, dann erfüllen alle untersuchten Baustoffe das geforderte Mindestkriterium. Aufgrund der bereits diskutierten Ergebnisse stimmt diese Aussage für den Baustoff 16 jedoch eindeutig nicht. Die zementbasierten Hinterfüllmaterialien müssen prinzipiell und unabhängig von den hydrogeologischen Standortbedingungen eine Mindestbiegezugfestigkeit aufweisen. Anhand der hier durchgeführten Versuche wäre ein Wert von 1 N/mm² sinnvoll. Erst wenn diese Anforderung erfüllt ist, kann die derzeitige Bewertung mittels der relativen Biegezugfestigkeit herangezogen werden. Für die Baustoffe 01, 07 und 13 scheint das Kriterium plausibel und deckt sich mit den übrigen Ergebnissen.

In Abbildung 3-136 fällt auf, dass die Biegezugfestigkeit der Probe 07/Blind in etwa dem Wert der Initialprobe entspricht. Der Grund hierfür liegt in der Alterung des Probenmaterials vor der Herstellung des Prüfkörpers. Bei der Versuchsvorbereitung wurden jeweils 12 Prismen hergestellt, 6 für den eigentlichen Versuch, 3 als Initialprobe und 3 als Blindprobe. Im Falle des Baustoffs 07 sind beim Lösen der Proben aus den Styroporformen mehrere Versuchsprismen kaputt gegangen, so dass die Blindproben zwar insgesamt 135 Tage (28 Tage Lagerung 107 Tage Versuchszeit) gelagert wurden, diese aber erst ca. 2-3 Monate später gefertigt wurden. Da das Probenmaterial zu Beginn des Projekts bezogen wurde (Erklärung hierzu Kapitel 3.2.3.1), betrug die Lagerungszeit dann ca. 1 Jahr. Der Effekt der Alterung ist auch bereits bei den Batchversuche aufgetreten und diskutiert worden.

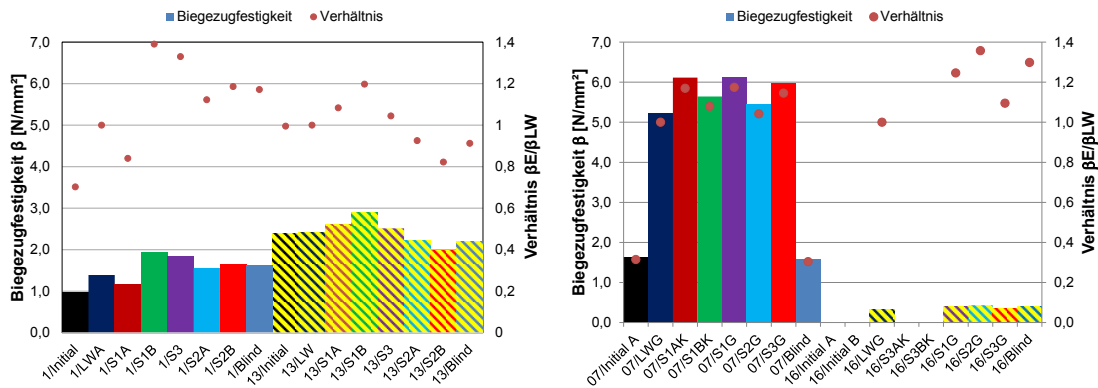


Abbildung 3-136: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 nach der Umströmung mit sulfathaltigen Wässern

Die Druckfestigkeit der Baustoffe 01, 07 und 13 erfüllen die Bedingungen der LQS EWS (2012). Für den Baustoff 16 trifft dies mit Initialwerten von 0,4 N/mm² nicht zu. Würde hier das gleiche Kriterium wie bei der relativen Biegezugfestigkeit herangezogen, dann wäre auch in diesem Fall der Hinterfüllbaustoff 16 sulfatstabil. Daher muss bei der Beurteilung der Sulfatbeständigkeit einer zementbasierten Hinterfüllung mittels der relativen Druckfestigkeit eine Mindestdruckfestigkeit gegeben sein. Der von der LQS EWS (2012) vorgegebene Wert scheint hier plausibel zu sein, wenn es sich um eine bis zu 100 m tiefe Erdwärmesonde handelt, ansonsten sollte der Wert höher angesetzt werden. Auch im Falle dichter Hinterfüllsuspensionen sollte der Wert höher angesetzt werden.

Aussagen über die ablaufenden Prozesse bei der Umströmung der einzelnen Baustoffe mit unterschiedlichen Wässern können mittels der Druck- und Biegezugfestigkeit nicht gemacht werden.

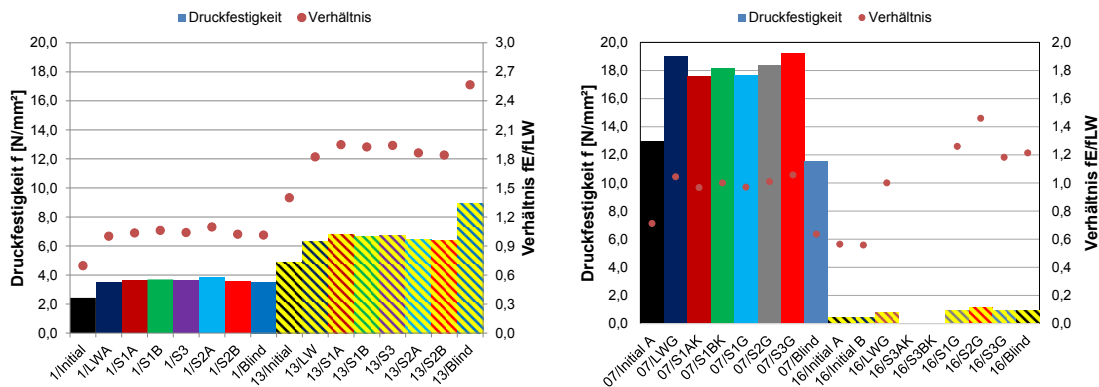


Abbildung 3-137: Entwicklung der Druckfestigkeit der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 nach der Umströmung mit sulfathaltigen Wässern

Die Bestimmung des Nadelpenetrometerwiderstands (NPR) ist ein einfacher Versuch, der auch während des Umströmungsversuchs durchgeführt werden kann. Dies wurde im vorliegenden Fall nicht gemacht, da die Proben dann für weitere Festigkeitsuntersuchungen nicht mehr brauchbar

gewesen wären. Deshalb wurden der NPR erst nach den Festigkeitstests gemessen. Abbildung 3-138 zeigt, dass die NPR gut mit der Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit der Baustoffe 01, 13 und 16 übereinstimmen. Lediglich beim Baustoff 07 sind Abweichungen zu erkennen. Der Grund hierfür liegt an der Zusammensetzung des Baustoffs. Trifft beim Versuch die Nadel auf einzelne Quarzkörner, wird somit ein etwas höherer Eindringwiderstand ermittelt. Über Mehrfachmessungen kann dieser Effekt minimiert werden (hier wurden jeweils 10 Messungen durchgeführt und der Mittelwert gebildet). Trotz der guten Ergebnisse müssen weitere Untersuchungen im Rahmen der Sulfatwiderstandsversuche durchgeführt werden, da die Nadel je nach Abbruchkriterium bis zu 10 mm in den Probekörper eindringt (Kapitel 3.2.3.5.12), die Reaktionsfront aber unter Umständen noch nicht soweit eingedrungen ist. Dadurch würde eine Sulfatbeständigkeit vorgetäuscht, die das Material eventuell gar nicht hat.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse wäre ein NPR von 5 N/mm zur Bewertung der Festigkeit der Hinterfüllbaustoffe sinnvoll. Für den relativen NPR könnte nach den momentanen Gesichtspunkten ebenfalls ein Wert von 0,7 als untere Grenze zur Beurteilung der Sulfatbeständigkeit von Hinterfüllmaterialien festgelegt werden. Hier müssten jedoch noch weitere Untersuchungen folgen.

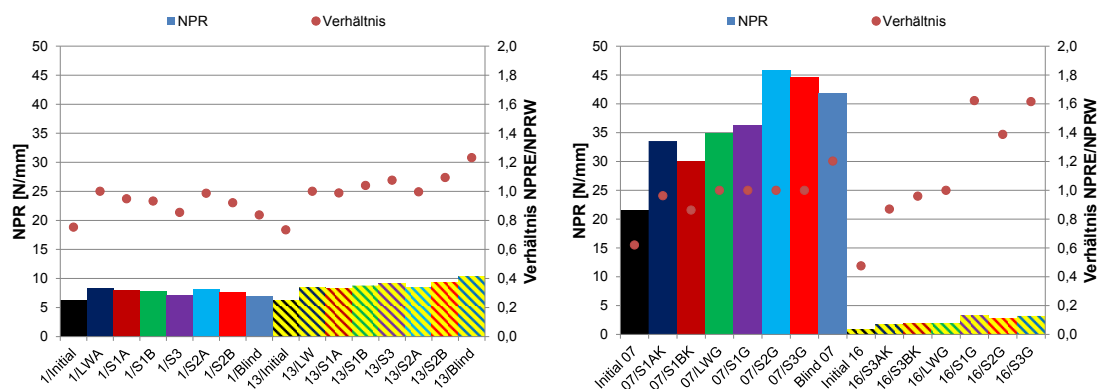


Abbildung 3-138: Entwicklung des Nadelpenetrometerwiderstands (NPR) der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 nach der Umströmung mit sulfathaltigen Wässern

Allgemein gilt es für die Bewertung der Sulfatbeständigkeit mittels Festigkeitsuntersuchungen jedoch die Laufzeit der Versuche zu berücksichtigen. In den vorliegenden Versuchen hat sich gezeigt, dass die Reaktionsfront aufgrund des langsam stattfindenden diffusiven Stofftransports trotz einer Versuchszeit von 107 Tage nur einige Millimeter in den Probekörper migriert ist. Dadurch ist noch ein relativ großer, unveränderter Kern der Probe vorhanden, der die Festigkeitseigenschaften der Probe stark beeinflusst.

Da sich Lösungs- und Fällungsreaktionen während des Sulfatangriffs auf den Porenraum auswirken, wurden im Zuge der Umströmungsversuche quecksilberporosimetrische Untersuchungen durchgeführt. Hierzu konnte bereits Müllauer (2013) zeigen, dass in einer ersten Phase (Abbildung 3-139) die Poren im Bereich von ca. 10-100 nm kontinuierlich mit Ettringit gefüllt werden. Sind diese Poren teilweise oder vollständig gefüllt, dann führt das weitere Wachstum von Ettringit gegen die Porenwände zu einem Aufbau von Spannungen und zur Bildung von Mikrorissen, bis

schließlich eine durchgehende Gefügeschädigung eintritt. Wenn das Reaktionspotential expansiver Phasen erschöpft ist, nimmt die Dehnung nicht mehr weiter zu (Phase 3). Die Bildung von Ettringit alleine führt jedoch zu keinem Schaden, was durch den Vergleich mit der Dehnung von Flachprismen ersichtlich wird. Das für die Kristallisation zur Verfügung stehende Porenvolumen, die Übersättigung der Porenlösung, die Geschwindigkeit der Kristallbildung und die mechanischen Eigenschaften der Proben entscheiden, ob eine bestimmte Ettringitmenge zu einem Schaden führt oder nicht (Müllauer 2013). Eine detaillierte Zusammenfassung der bekannten Dehnungstheorien sowie der Dehnungsmechanismen findet sich in Müllauer (2013).

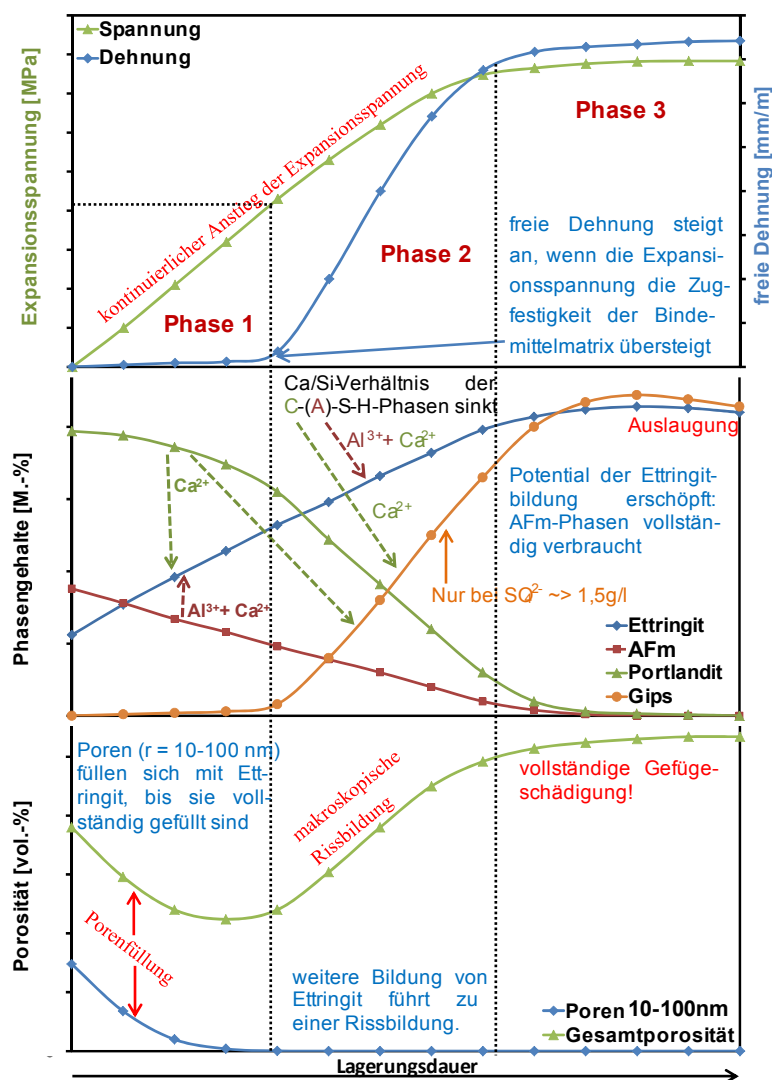


Abbildung 3-139: Schematische, qualitative Darstellung der Entstehung der Dehnung von kleinformatigen Mörtelproben (aus Müllauer 2013)

Die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie sind in Abbildung 3-140 bis Abbildung 3-151 dargestellt. Hierbei wurden zur Beurteilung des Sulfatangriffs Initialwerte (blauer Graph) und die Werte

einer Blindprobe (grüner Graph) den Werten der behandelten Probe (roter Graph) gegenübergestellt.

Auffallend ist, dass alle Proben eine Porenöffnungsweite von $< 1 \mu\text{m}$ aufweisen und damit Gel- und Kapillarporen (Abbildung 3-44) überwiegen, die für einen hydraulischen Fluidtransport nur untergeordnet wirksam sind (Kapitel 3.2.3.5.10). Dies deckt sich auch mit den hydraulischen Durchlässigkeitsversuchen. Die Porenöffnungsweite der Hinterfüllung 16 ist bei den untersuchten Baustoffen am größten, gefolgt von den Baustoffen 07, 01 und 13, wobei die Porosität des Baustoffs 07 etwas geringer als die des Baustoffs 01 ist.

Die durch den Sulfatangriff bedingten Veränderungen sind bei der Hinterfüllung 01 sehr gering (Abbildung 3-140 bis Abbildung 3-145). Es zeigt sich, dass die Graphen der Blindproben weitgehend mit denen der behandelten Proben übereinstimmen. Dabei sind die Porenöffnungsweiten und die Porosität bedingt durch die andauernde Hydratation nur wenig geringer als bei den Initialproben. Dies untermauert die übrigen Untersuchungsergebnisse dieses Baustoffs, der unter Berücksichtigung der Versuchslaufzeit von 107 Tagen keine nennenswerte Beeinträchtigung im Zuge des Umströmungsversuchs zeigt.

Im Fall der Hinterfüllung 13 ist sowohl die Porosität als auch die Porenöffnungsweite der Blindprobe geringer als die der Initialprobe (Abbildung 3-140 bis Abbildung 3-145). Bei den behandelten Proben liegt das Maximum der Porenöffnungsweite in etwa in derselben Größenordnung wie das der Initialprobe. Auffallend ist jedoch, dass bei diesem Baustoff bei allen Proben, inklusive der Probe die mit Leitungswasser umströmt wurde, die Peakhöhe deutlich geringer ist als bei der Blind- und Initialprobe. Mit Ausnahme der mit Leitungswasser umströmten Probe zeigen alle übrigen Proben die Entwicklung eines sekundären zweiten Peaks im Bereich zwischen $0,1$ und $1 \mu\text{m}$. Eine eindeutige Zuordnung der ablaufenden Ausfällungs- und Lösungsprozesse ist hierbei schwer möglich, da das Verhalten unabhängig vom umströmten Medium auftritt. Eine durch den Sulfatangriff bedingte Dehnung der Probe kann allerdings ausgeschlossen werden, da die Erscheinung auch bei der in Leitungswasser gelagerten Probe auftaucht sowie bei den Proben 13/S1A und 13/S1B, die bei der Betrachtung der relativen Längenänderung Werte $< 0,4$ aufweisen. Der Unterschied zwischen umströmten Proben und den Initial- und Blindproben besteht darin, dass die letzteren nicht im direkten Kontakt mit Wasser standen, sondern in einer Atmosphäre von $>98 \%$ Luftfeuchtigkeit gelagert wurden, wodurch die Poren unter Umständen nicht zu 100% wassergesättigt waren und damit die Hydratationsprozesse beeinträchtigt wurden.

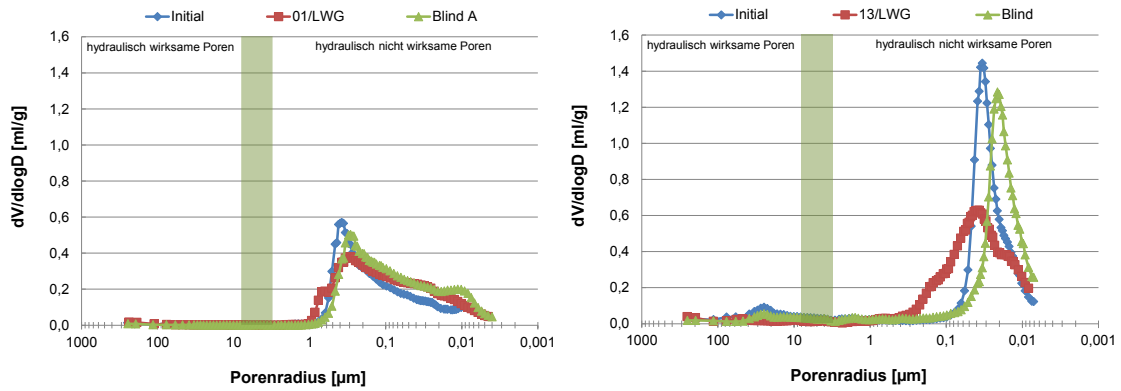


Abbildung 3-140: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 01 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs LWG

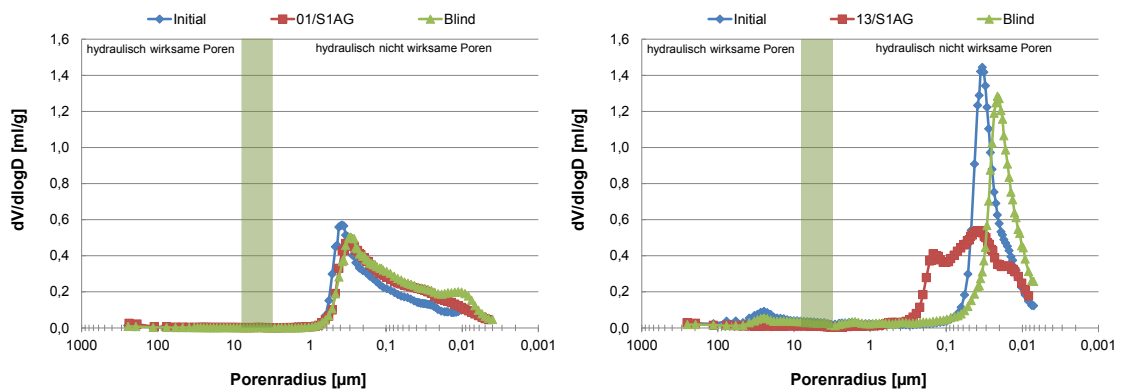


Abbildung 3-141: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 01 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S1AG

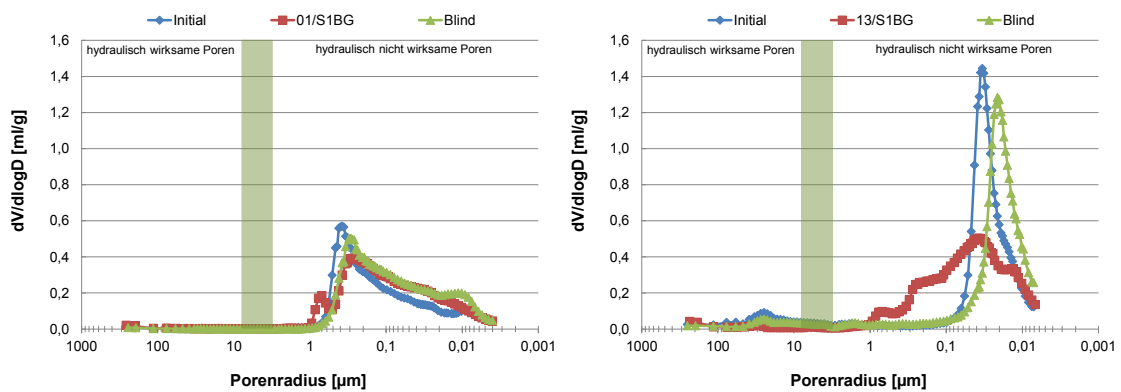


Abbildung 3-142: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 01 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S1BG

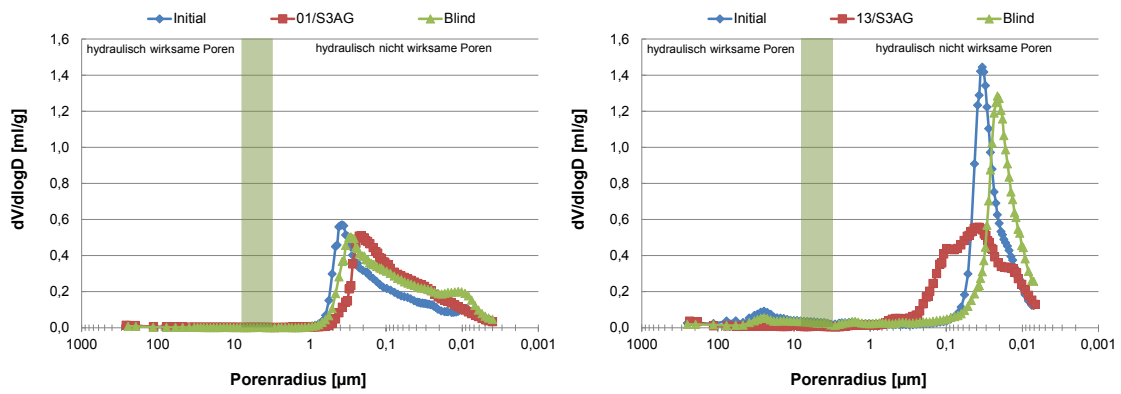


Abbildung 3-143: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 01 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S3AG

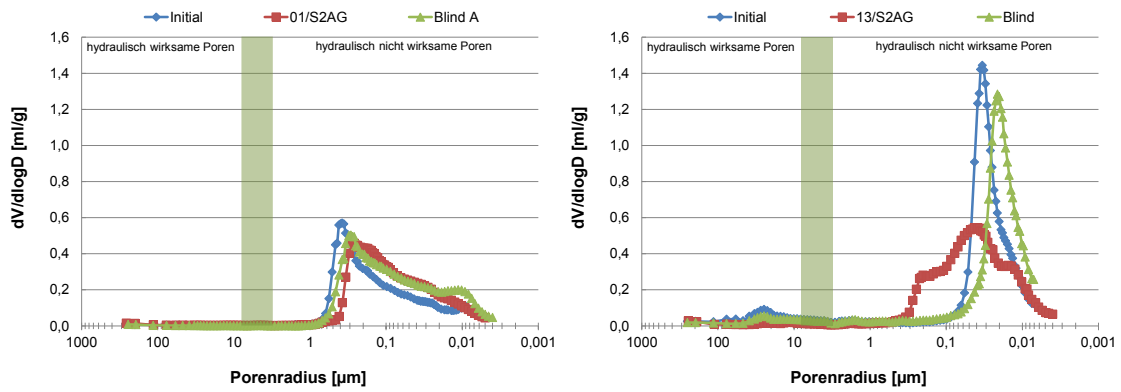


Abbildung 3-144: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 01 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S2AG

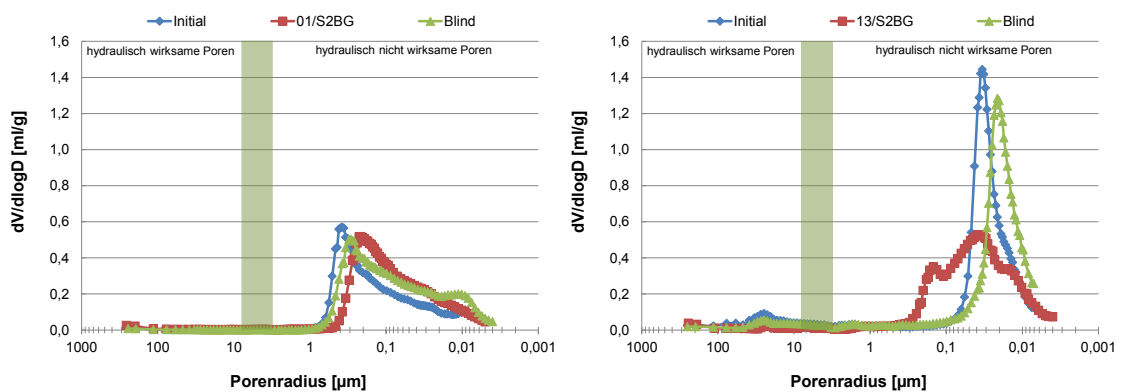


Abbildung 3-145: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 01 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S2BG

Bei der Betrachtung des Hinterfüllbaustoffs 07 (Abbildung 3-146 bis Abbildung 3-151) zeigt sich, dass bei der Blindprobe, aber auch bei den umströmten Proben die Poren durch die andauernde

Hydratation kleiner werden und damit die maximale Porenöffnungsweite hin zu kleineren Porenöffnungsradialen verschoben wird. Dieser Effekt ist bei den behandelten Proben jedoch deutlicher ausgeprägt als bei der Blindprobe, bei der noch Poren mit einer Öffnungsweite von ca. 1 μm vorhanden sind. Eine dem Chemismus der umströmten Wässer zuzuordnende Veränderung kann auch hier aus dem Verlauf der Porenöffnungsweiten nicht abgeleitet werden, da die Entwicklung der Porenöffnungsweiten aller Versuche sich gleichen, inklusive des Versuchs mit Leitungswasser. Daher kann auf einen Sulfatangriff nicht geschlossen werden.

Beim Hinterfüllmaterial 16 wurde durch die bisherigen Untersuchungen eindeutig eine Beeinträchtigung der Festigkeit des Baustoffs durch die sulfathaltigen Wässer nachgewiesen, besonders im Fall der Wässer des Typs 2 und 3. Dies zeigt sich auch bei den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie. Hier haben alle Probekörper eine höhere Porosität als die der Blindprobe. Zum Teil ist die Porosität sogar größer als die der Initialprobe. Die Peakhöhen der Probekörper, die mit den Wässern des Typs 2 und 3 umströmt wurden, liegen ein wenig im Bereich hin zu größeren Porenöffnungsweiten (Abbildung 3-150 rechts und Abbildung 3-151 rechts) gegenüber den Blindproben. Auch wenn die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie für die Baustoffe 01 und 07 eindeutig sind, so gibt es bei Baustoff 16 noch offene Fragen. So zeigt beim Baustoff 16 der Referenzversuch mit Leitungswasser eine höhere Porosität, die einen treibenden Angriff andeutet, obwohl in den röntgenographischen Untersuchungen für diese Probe kein Brucit, Portlandit, Gips usw. gefunden wurde und auch die übrigen Untersuchungen kein Indiz für einen Sulfatangriff erbrachten. Der Grund für diese Ergebnisse könnte in der Genauigkeit der Messmethode als auch in der für den diffusiven Stofftransport bedingten relativ kurzen Versuchszeit liegen, da die Reaktionsfront somit nur wenige mm beträgt. Für die Messung mit dem Autopore III-Porosimeter ist jedoch in Abhängigkeit von der Porosität der Probe ein Probekörper mit einer Kantenlänge von 0,5 bis 1 cm notwendig. Es wurde zwar versucht für die Porositätsmessung nur die Reaktionszone zu verwenden, da diese aber makroskopisch nicht bei allen Proben zu erkennen war, kann bei einigen Proben auch ein Teil des intakten Zementsteins mit gemessen worden sein, wodurch das Ergebnis einer Kombination aus beeinflussten und unbeeinflussten Poren entspricht. Da nach 28 Tagen die Hydratation noch nicht abgeschlossen ist, was in allen Versuchen durch den Vergleich der initialen Porenverteilung mit denen der Blindproben belegt wird, ist der Vergleich zwischen Initialprobe und umströmter Probe, so wie dies von Müllauer (2013) durchgeführt wurde, nur bedingt aussagekräftig. Durch die Reaktionslösungen verlaufen zwar die Hydratationsprozesse in den Probekörpern nicht analog und unbeeinflusst im Vergleich zu denen in den Blindproben, dennoch entsprechen die Reaktionen nicht nur dem Unterschied aus Initialprobe und umströmter Probe.

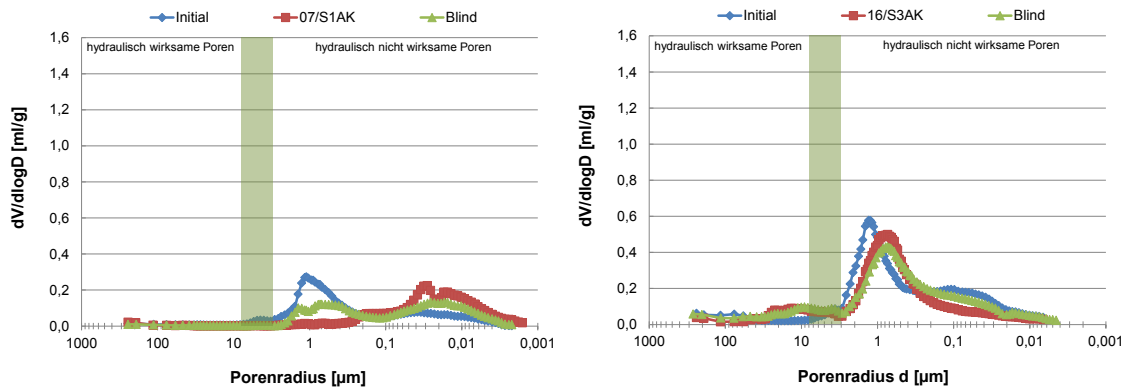


Abbildung 3-146: Porenöffnungsverteilung des Baustoffs 07 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S1AK und des Baustoffs 16 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S3AK

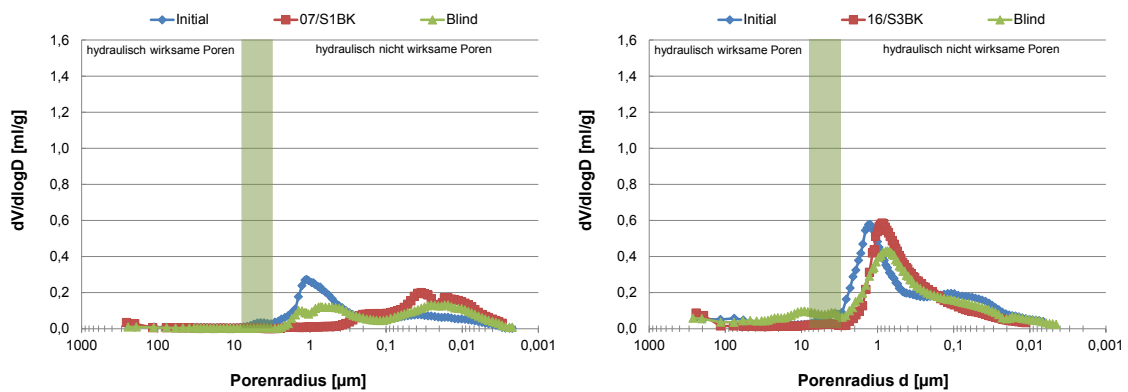


Abbildung 3-147: Porenöffnungsverteilung des Baustoffs 07 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S1BK und des Baustoffs 16 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S3BK

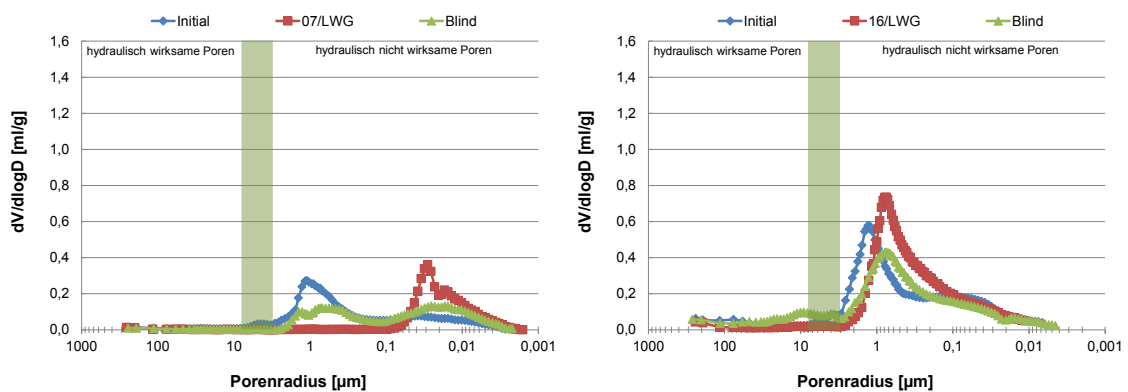


Abbildung 3-148: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 16 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs LWG

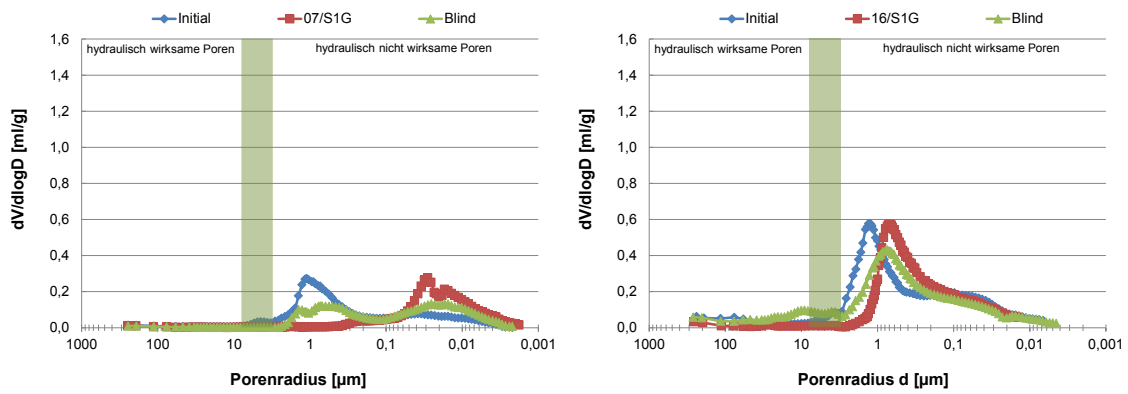


Abbildung 3-149: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 16 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S1G

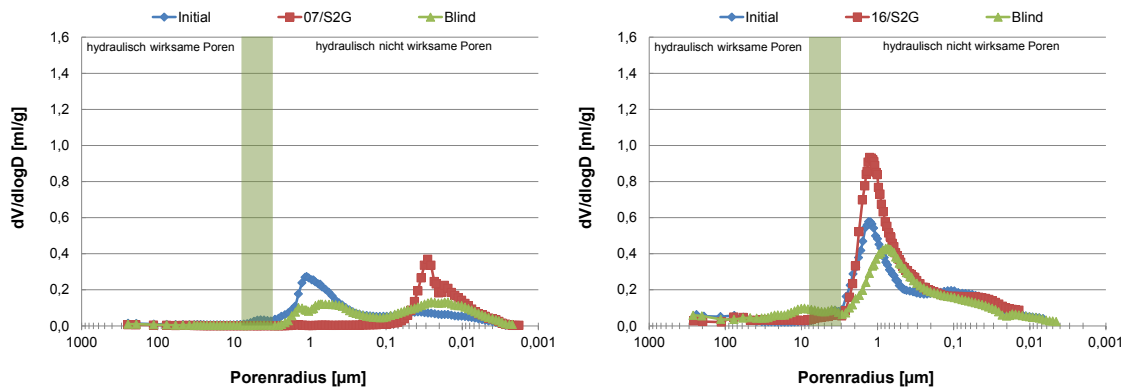


Abbildung 3-150: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 16 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S2G

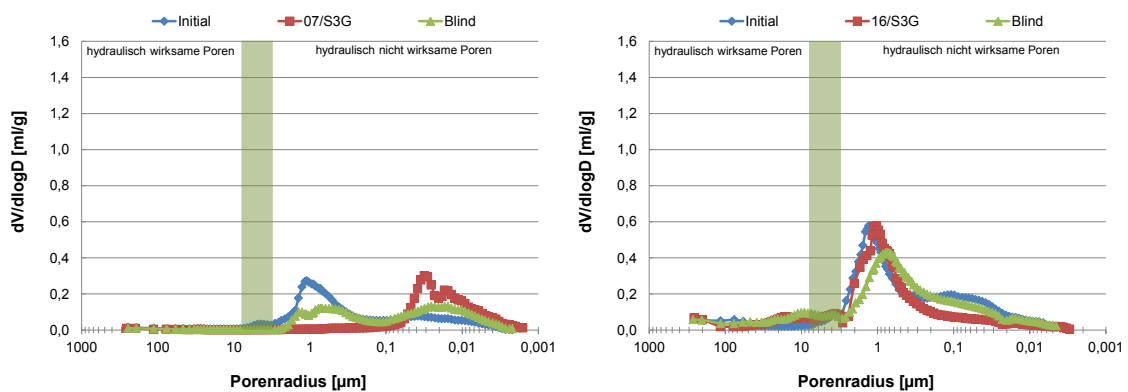


Abbildung 3-151: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 16 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs S3G

3.2.4.5.2. Umströmungsversuche mit sauren Wässern

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Umströmungsversuche diskutiert, die mit sauren Wässern gemäß Kapitel 3.2.3.2 und 3.2.3.9 durchgeführt wurden. In Abbildung 3-152 und Abbildung 3-153 ist der Zustand der Proben vor, während und nach dem Versuch dokumentiert. Beim Hinterfüllmaterial 07 zeigt sich unabhängig vom verwendeten Wasser ein deutlicher Angriff der Probenkörper. Die Probe, die mit Wasser des Typs C2 umströmt wurde und die Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} sowie Mg^{2+} enthält, zeigt an der Oberfläche einen Farbumschlag ins grünliche. Dieser Farbumschlag ist auch bei der Probe, die mit Leitungswasser umströmt wurde, zu erkennen. Ungeöhnlich ist, dass auch die Probe, die kontinuierlich mit Leitungswasser umströmt wurde, ebenfalls deutliche Angriffsspuren aufweist, zumal diese in der ersten Versuchsreihe nicht aufgetreten sind (Kapitel 3.2.4.5.1, Abbildung 3-104). Der Grund hierfür liegt, wie bereits in Kapitel 3.2.4.5.1 bei der Diskussion der Festigkeitseigenschaften angesprochen, in der Alterung des Probenmaterials. In dieser Versuchsreihe war das Probenmaterial bereits etwas über 2 Jahre gelagert. Daher können für dieses Material beim Säureangriff lediglich die hier ablaufenden Prozesse beschrieben werden. Eine Aussage, ob das Hinterfüllmaterial 07 jedoch stabil gegenüber sauren Wässern ist, kann aufgrund der Materialalterung nicht gemacht werden. Hierzu müsste mit frischem Probenmaterial der Versuch wiederholt werden. Da aber bereits bei der Lagerung unter trockenen Bedingungen eine deutliche Materialalterung zu erkennen ist, darf bei der Errichtung von Erdwärmesonden die maximale Lagerungszeit nicht überschritten werden.

Beim Hinterfüllmaterial 13 ist makroskopisch kein Angriff auf die Probenkörper zu erkennen. Auch eine farbliche Veränderung, wie sie zum Beispiel durch Ausfällungen oder Auslaugung auftreten können, ist nicht erkennbar. Die Farbabweichungen in Abbildung 3-153 sind aufgrund der Lichtverhältnisse während der Photographie sowie durch Feuchteunterschiede der Probenoberfläche zu erklären.



Abbildung 3-152: Bilder der Versuchsprismen des Hinterfüllbaustoffs 07 vor Versuchsbeginn und nach Versuchsende

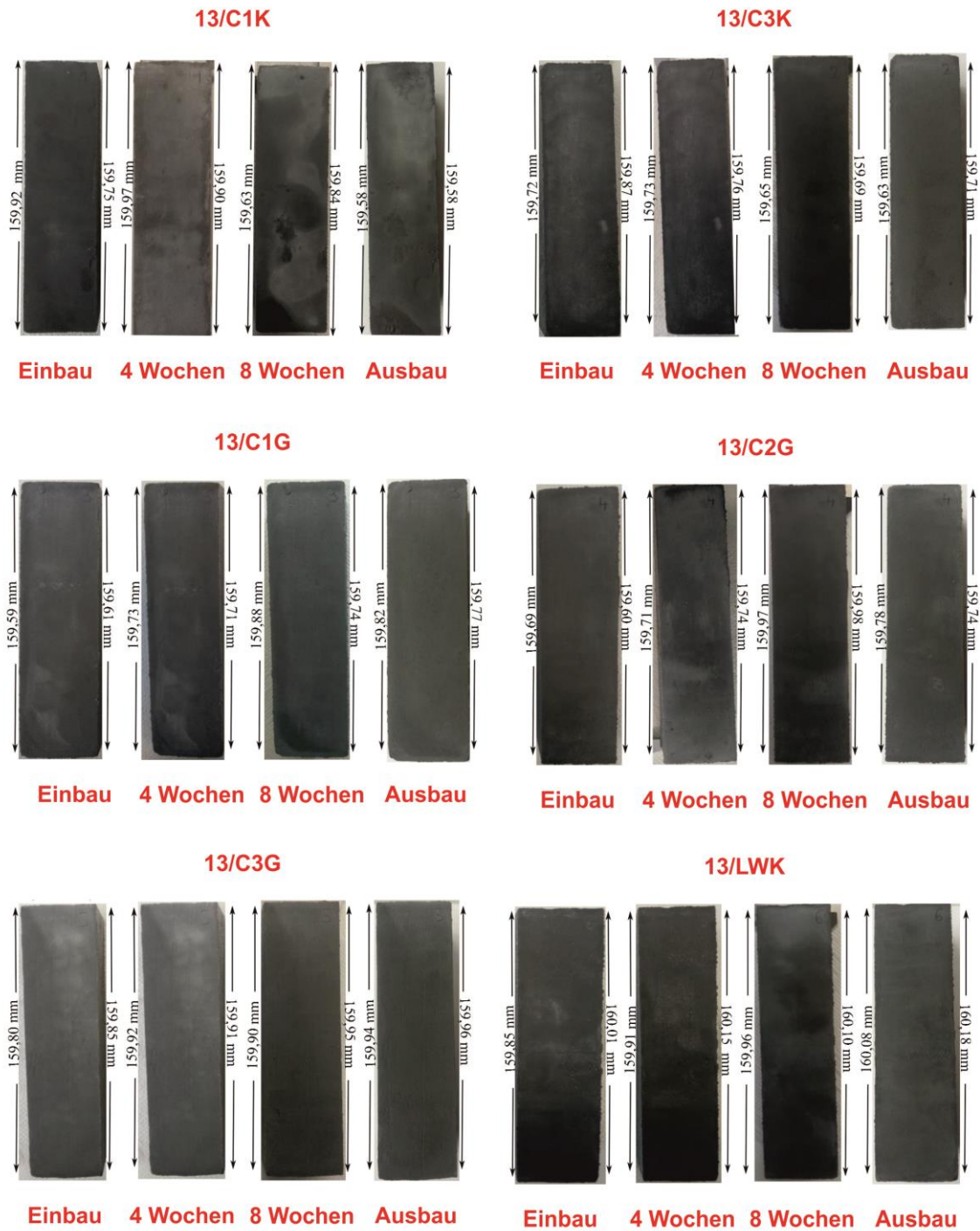


Abbildung 3-153: Bilder der Versuchsprismen des Hinterfüllbaustoffs 13 vor Versuchsbeginn und nach Versuchsende

Bei der Versuchsreihe zum Säureangriff wurden die verwendeten Wässer gemäß Tabelle 3-18 in Kapitel 3.2.3.2 angesetzt. Wie bei den Versuchen zum Sulfatangriff wurden auch in dieser Versuchsreihe unterschiedliche Umströmungsarten durchgeführt und miteinander verglichen. Hierbei wurden die Wässer C1 und C3 kontinuierlich und im geschlossenen Kreislauf zirkuliert, während das Wasser C2 aufgrund von Platzgründen lediglich im geschlossenen Kreislauf zirkulierte. Wie in den Versuchen zum Sulfatangriff, wurde auch bei den Versuchen zum Säureangriff Leitungswasser als Referenzlösung eingesetzt. Da bei den Versuchen zum Sulfatangriff für alle untersuchten Baustoffe die Referenzversuche im geschlossenen Kreislauf durchgeführt wurden, erfolgten die Referenzversuche beim Säureangriff im offenen System mit kontinuierlicher Zirkulation. Somit wurden für die untersuchten Baustoffe alle Möglichkeiten der Umströmung abgedeckt. Die Abbildung 3-154 zeigt für beide Umströmungsarten den Einfluss des Hinterfüllmaterials 07 bzw. 13 auf den pH-Wert der Reaktionslösungen. Für alle verwendeten Wässer ist, unabhängig von der Umströmungsart und vom Hinterfüllmaterial, ein deutlicher pH-Anstieg im Vergleich zum Initialwert zu erkennen, wobei der pH-Wert in den ersten Versuchswochen vom Initialwert pH=5 auf über pH=10 angestiegen war. Diese Zunahme fällt in den nachfolgenden Wochen jedoch kontinuierlich geringer aus.

Einfluss der Hinterfüllmaterialien auf die pH-Entwicklung der Wässer:

- Bei dem Hinterfüllmaterial 07 wurden stets alkalischere pH-Werte gemessen als bei dem Hinterfüllmaterial 13.
- Die während der Versuchswochen festgestellte Abnahme der pH-Werte der Wässer fällt bei dem Hinterfüllmaterial 13 stärker aus als bei dem Hinterfüllmaterial 07.

Einfluss der Umströmung auf die pH-Entwicklung der Wässer:

- Bei der geschlossenen Umströmung wurden, gegenüber der kontinuierlichen Umströmung, von Anfang an etwas alkalischere pH-Werte der Wässer gemessen. Der Grund hierfür ist, dass bei der kontinuierlichen Umströmung der Probekörper die Kontaktzeit des Wassers geringer und das umströmte Wasservolumen höher ist und damit eine geringere pH-Wertänderung bedingt.
- Bei der geschlossenen Umströmung wurde mit fortschreitender Versuchszeit eine deutliche, näherungsweise kontinuierliche Abnahme der pH-Werte der Wässer festgestellt, wohingegen die gemessenen pH-Werte bei der offenen Umströmung keine Veränderung mit der Zeit gezeigt haben, sondern nahezu konstant geblieben sind.

Die Ursache für den Anstieg der pH-Werte in den Reaktionslösungen von Initialwerten von pH 5 auf über pH 10 ist in der Wechselwirkung von Probekörper und Wasser zu finden. Bei der Hydratation des Zements bilden sich u.a. die Hydratationsprodukte Alkali- und Calciumhydroxide, die zu einer alkalischen Porenlösung führen (Stark & Wicht 2013). Diese Hydroxide, die sich im verfestigten Hinterfüllbaustoff befinden, migrieren diffusiv bei Kontakt in die Reaktionslösung und erhöhen den pH-Wert. Andererseits gelangen H^+ -Ionen aus den umströmenden Wässern durch

Diffusion in die Hinterfüllmaterialien, sodass die H^+ -Konzentration in den Reaktionslösungen geringer wird. Diese Wechselwirkungen finden durch Lösungsreaktionen v. a. an dem äußeren Bereich des Prüfkörpers statt.

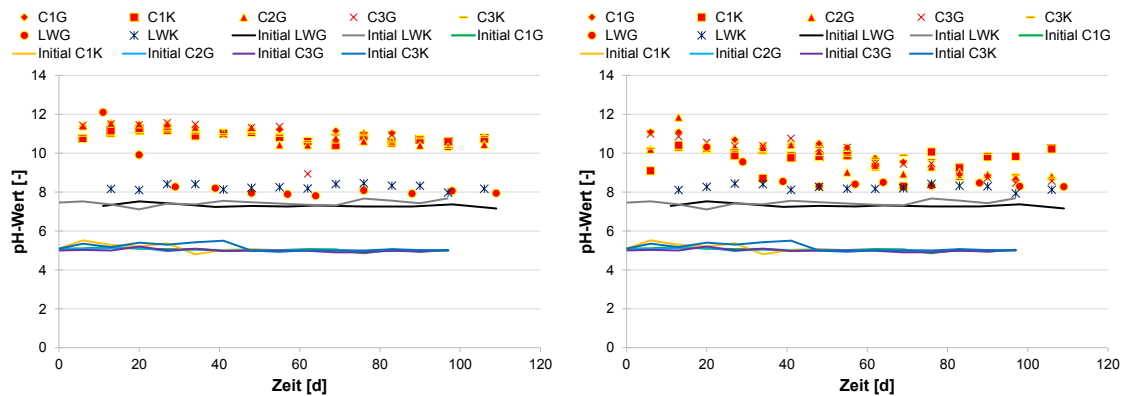


Abbildung 3-154: Entwicklung des pH-Werts innerhalb der umströmten Wässer für Baustoff 07 (links) und Baustoff 13 (rechts)

Die über die Versuchszeit fortschreitende Abnahme der pH-Werte in den Reaktionslösungen liegt an den Transportprozessen im Grenzbereich Wasser/Hinterfüllung, die mit der Ausbildung von Zonen im Probekörper einhergeht. Dabei entsteht an der Außenseite der Prüfkörper die sogenannte Auslaugungszone (Abbildung 3-156) aus unlöslichen Restprodukten, durch die der Austausch an Ionen zwischen Wasser und Hinterfüllmaterial gehemmt wird (Verein Deutscher Zementwerke 2002).

Zusätzlich zur pH-Wertmessung in den Reaktionslösungen wurde der pH-Wert innerhalb der untersuchten Hinterfüllungen einschließlich deren Blindproben gemessen. Hierbei sind die pH-Werte der Blindproben mit Werten >12 deutlich im alkalischen Bereich (Abbildung 3-155). Diese hohen pH-Werte werden durch die Anwesenheit der Alkalihydroxide und v.a. durch das bei der Hydratation gebildeten Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$, das in die Struktur des Zementsteins als Calciumhydroxidkristalle (Portlandit) eingebaut wird (Verein Deutscher Zementwerke 2002), verursacht. Durch den ständigen Säureangriff an der Prüfkörperoberfläche wird die OH^- -Konzentration der Porenlösung im oberflächennahen Bereich mit der Zeit geringer, da das Calciumhydroxid durch die kalkangreifenden Protonen in Lösung geht und so ausgelaugt wird. Damit wird die Oberfläche „entkalkt“ und besitzt dadurch einen geringeren pH-Wert als der unbeeinflusste Zement in der Mitte der Probenkörper (Abbildung 3-155) (Verein Deutscher Zementwerke 2002). In Abbildung 3-156 ist der Säureangriff und die damit einhergehende Ausbildung von Reaktionszonen gemäß Kapitel 3.2.2.4 sowie der sich einstellenden pH-Werte schematisch dargestellt. Wird dieses Modell auf die Ergebnisse der pH-Wertmessung sowie der später folgenden Untersuchungen übertragen, ergibt sich eine Übereinstimmung, die die ablaufenden Prozesse im Zuge des Säureangriffs bestätigt.

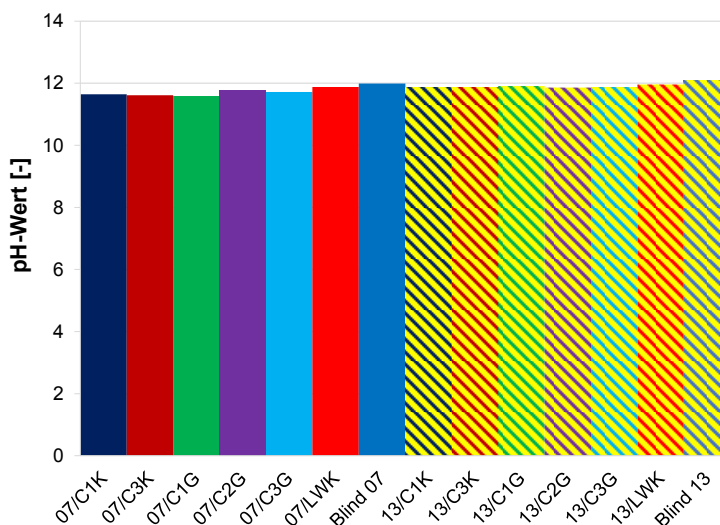


Abbildung 3-155: pH-Wert der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit sauren Wässern

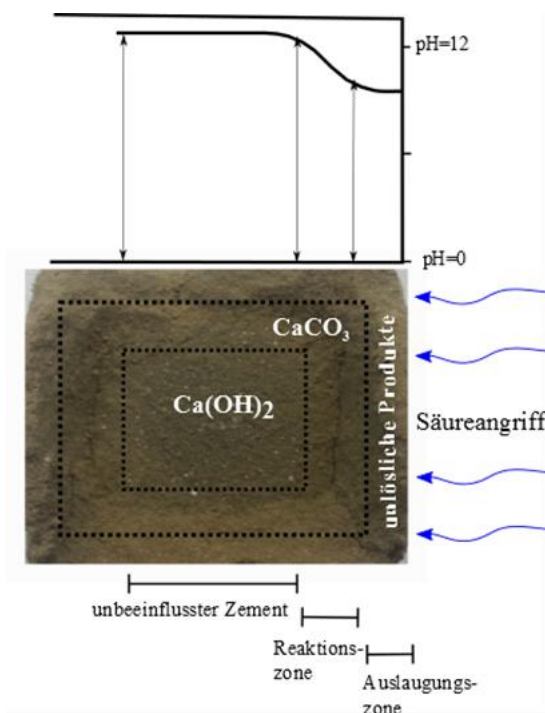


Abbildung 3-156: Verlauf des pH-Wertes im Probekörper infolge eines Säureangriffs (verändert nach Verein Deutscher Zementwerke 2002)

Wie Abbildung 3-157 zeigt, liegen die Redoxpotentiale aller initialen Reaktionslösungen im positiven Bereich und zeigen damit oxidierende Bedingungen an. In Kontakt mit den Hinterfüllmaterialien verändern sich die Eh-Werte aller Wässer jedoch signifikant. Sie liegen in den ersten Wochen bei ca. 0 mV, wobei vereinzelt bei den beiden Hinterfüllmaterialien 07 und 13 in den ersten

Tagen auch schwach negative Werte auftreten. Mit fortschreitender Versuchszeit zeigen die Wässer des Typs C1, C2 und C3 eine ansteigende Tendenz der Eh-Werte, wobei der Anstieg beim Hinterfüllmaterial 13 mit Werten zwischen 250 mV und 350 mV deutlich stärker ausgeprägt ist als dies beim Hinterfüllmaterial 07 mit Werten im Bereich von ca. 50 mV bis 250 mV der Fall ist. Beim Versuch mit Leitungswasser liegen die Eh-Werte im Bereich der Initialwerte. Lediglich in den ersten Wochen ist eine Abweichung zu verzeichnen. Weiterhin ist auffallend, dass die Eh-Werte bei den Versuchen mit kontinuierlicher Umströmung etwas höher liegen als bei geschlossener Zirkulation, was, wie bei den pH-Werten, an der Kontaktzeit und der umströmten Wassermenge liegt.

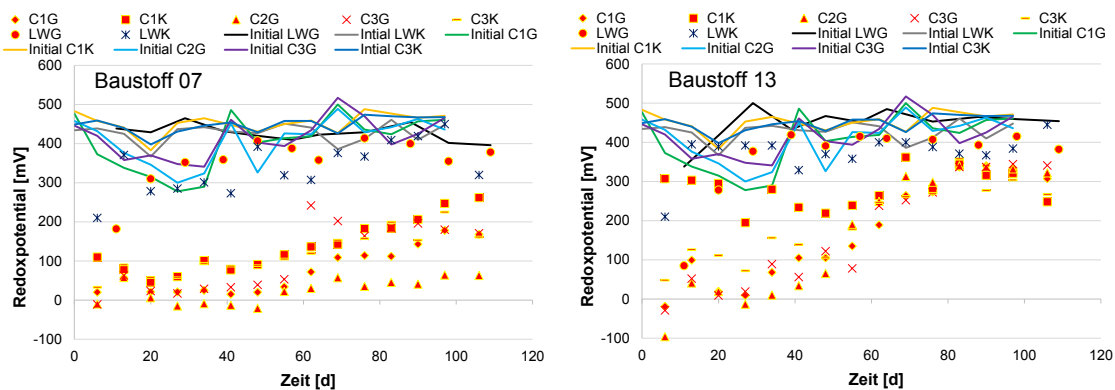


Abbildung 3-157: Entwicklung des Eh-Werts innerhalb der umströmten Wässer für Baustoff 07 (links) und Baustoff 13 (rechts)

Die Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit in den Reaktionslösungen der beiden Hinterfüllbaustoffe ist in Abbildung 3-158 dargestellt. Die unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten der Initialproben ergeben sich aufgrund ihrer unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen. So weist das Wasser des Typs C2 wegen der komplexeren Zusammensetzung sowie der hohen Ionenkonzentrationen die höchste elektrische Leitfähigkeit auf. Das Wasser des Typs C1 zeigt infolge des hohen Kaliumgehalts und der insgesamt höheren Ionenstärke (Summe an allen Ionen) höhere Leitfähigkeiten als das Wasser des Typs C3. Zudem gilt zu beachten, dass Natrium- und Calciumionen geringere Ionenbeweglichkeiten besitzen als Kaliumionen (Tabelle 3-20). Der auffallende Rückgang der elektrischen Leitfähigkeiten von der 11. zur 12. Versuchswoche bei allen Wässern ist wahrscheinlich auf einen Drift in der Messsignalverarbeitung im Messgerät selbst zurückzuführen.

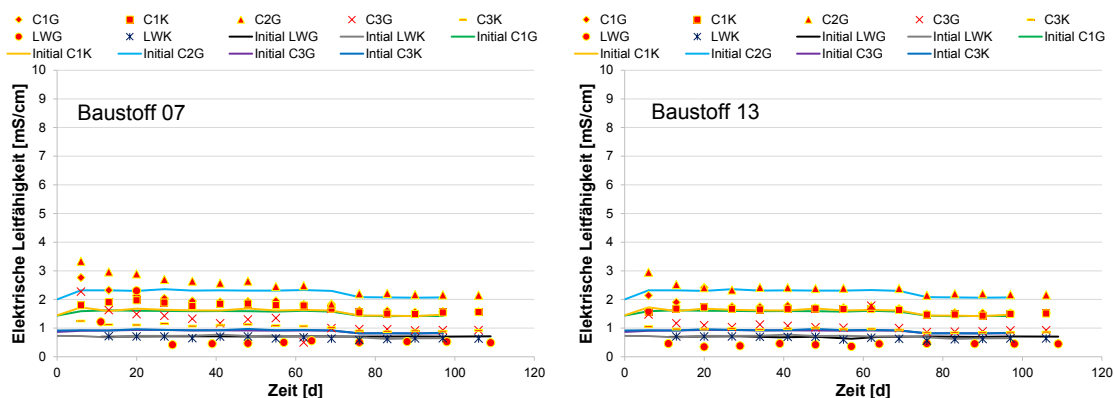


Abbildung 3-158: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit innerhalb der umströmten Wässer für Baustoff 07 (links) und Baustoff 13 (rechts)

Ein Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit zeigt, dass die Wässer des Hinterfüllmaterials 07 generell etwas höhere Werte aufweisen als beim Hinterfüllmaterial 13 und in allen Fällen über den Initialwerten liegen. Bei der geschlossenen Umströmung zeigen sich am Anfang bei beiden Hinterfüllmaterialien gegenüber den Initialwerten deutlich erhöhte Werte für die elektrische Leitfähigkeit. Beim Hinterfüllmaterial 07 nehmen diese Messwerte über den gesamten Versuchszeitraum kontinuierlich ab und nähern sich den Initialwerten an. Demgegenüber zeigen die elektrischen Leitfähigkeiten beim Hinterfüllmaterial 13 bereits ab der vierten Versuchswoche praktisch keine Abweichungen zu den Initialwerten mehr. Bei der offenen Umströmung liegen beim Hinterfüllmaterial 07 die Werte für die elektrische Leitfähigkeit in den ersten Wochen nur geringfügig über den Initialwerten. In den letzten Versuchswochen zeigt sich gegenüber den Initial-Wässern keine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit mehr. Beim Hinterfüllmaterial 13 ist bei der offenen Umströmung über den gesamten Versuchszeitraum kein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit gegenüber den Initialwerten zu erkennen.

Wie bereits erwähnt, hängt die elektrische Leitfähigkeit der Lösungen von der Konzentration und der Mobilität ihrer Ionen ab. Der gemessene Anstieg der elektrischen Leitfähigkeiten gegenüber den Initialwerten begründet sich in einem Austrag von Ionen aus den Hinterfüllmaterialien in die Reaktionslösung, wodurch sich zum Beispiel die Calcium-Konzentration und die Konzentration der OH-Ionen in den Wässern erhöht hat (z.B. Abbildung 3-154, Abbildung 3-161, Abbildung 3-163). Die besonders bei der geschlossenen Umströmung des Hinterfüllmaterials 07 gemessene Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit mit fortschreitender Versuchszeit lässt sich, analog zur pH-Wertabnahme, durch die Bildung einer Auslaugungszone an der Probekörperoberfläche, die die Wechselwirkung zwischen Wasser und Hinterfüllmaterial gehemmt hat, erklären.

Im Folgenden wird die Konzentrationsentwicklung aller Ionen in den verwendeten Wässern mit fortschreitender Versuchszeit beschrieben und anschließend diskutiert. In Abbildung 3-159 bis Abbildung 3-172 sind diese Konzentrationsveränderungen der Reaktionslösungen dargestellt. Bei der kontinuierlichen Umströmung der Hinterfüllbaustoffe 07 und 13 mit der Referenzlösung Leitungswasser ist die Entwicklung der Ionenkonzentrationen sehr ähnlich (Abbildung 3-159, Abbildung 3-160). Die Na^+ - und Mg^{2+} -Konzentration ist gegenüber den Initialwerten etwas erhöht,

was der Diffusion dieser Ionen aus den Probenkörpern geschuldet ist. Da der pH-Wert bedingt durch die kontinuierliche Umströmung lediglich Werte um 8 aufweist (Abbildung 3-154), fällt weder das Mg^{2+} als Brucit noch das Ca^{2+} als Portlandit aus (Abbildung 3-114) und verbleibt damit weitgehend in Lösung. Die K^+ sind, wie bei den Umströmungsversuchen zur Sulfatbeständigkeit, deutlich erhöht, aber auch hier sind die Konzentrationen aufgrund der kontinuierlichen Umströmung deutlich geringer als bei der geschlossenen Umströmung beim Versuch 07/LWG (Abbildung 3-111).

Die Sulfat-Konzentrationen sind bei beiden Hinterfüllmaterialien im Vergleich zu ihren Ausgangswerten geringfügig erhöht, da, in Analogie zu den Erläuterungen der Kationenentwicklung, ein diffusiver Stofftransport aus den Probenkörpern in die geringer konzentrierte Reaktionslösung erfolgt. Ein Trend in der Konzentrationsentwicklung ist allerdings nicht ersichtlich. Da die Sulfat-Konzentration im Leitungswasser mit ca. 50 mg/l weit unterhalb der Sättigungskonzentration des Gipses liegt und die Werte über den Versuchsverlauf weitgehend bei $C/C_0 \pm 1$ liegen, kann davon ausgegangen werden, dass kein Gips an der Probenoberfläche ausgefallen ist, was zusätzlich zu einer Ca^{2+} -Konzentrationsreduktion geführt hätte. Die Chloridkonzentrationen schwanken bei beiden Hinterfüllmaterialien unregelmäßig innerhalb des Bereichs $0,5 \leq C/C_0 \leq 2,0$, so dass es auch hier zu keinen nennenswerten Ionenkonzentrationsveränderungen im Laufe der Versuchszeit gekommen ist. Auch die Hydrogencarbonat-Konzentration zeigt keinen eindeutigen Trend und schwankt um $C/C_0 \pm 1$.

Im Vergleich mit den Versuchen mit geschlossener Umströmung (Abbildung 3-111, Abbildung 3-112) sind bei der kontinuierlichen Umströmung die Na^+ - und K^+ -Konzentrationen geringer und die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Konzentrationen zeigen nicht den pH-Wert bedingten Trend mit $C/C_0 < 1$ zu Versuchsbeginn wie dies im Versuch mit geschlossener Zirkulation erkennbar ist.

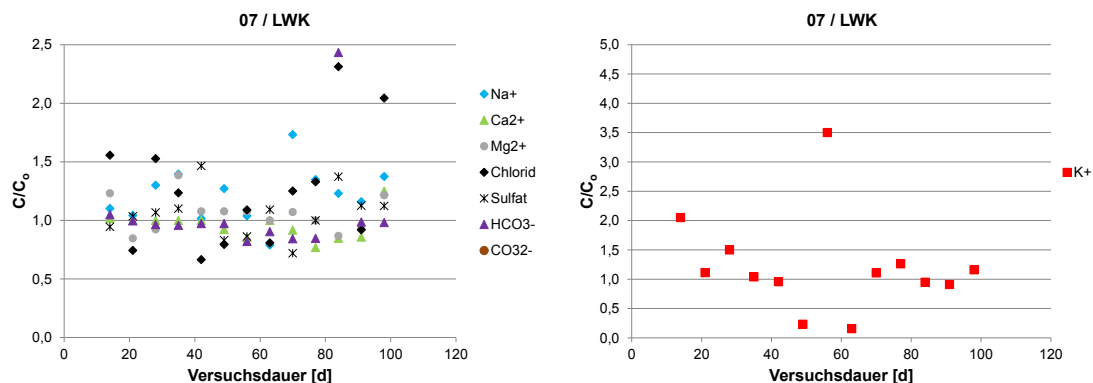


Abbildung 3-159: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung LWK im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

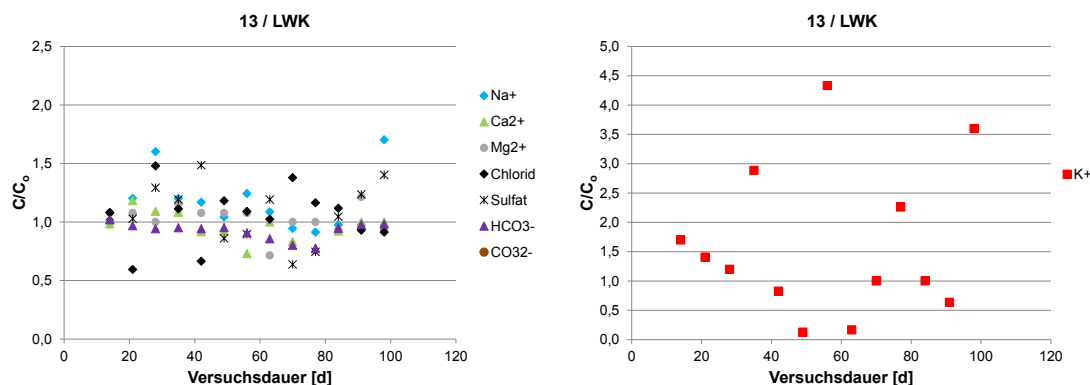


Abbildung 3-160: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung LWK im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

Im Wasser des Typs C1, in dem ursprünglich kein Ca^{2+} enthalten war, gehen, sobald das Wasser mit dem Hinterfüllmaterial reagiert, Ca^{2+} -Ionen in Lösung, wobei dieser Effekt beim Hinterfüllmaterial 07 deutlicher zu beobachten ist als bei dem Hinterfüllmaterial 13 (Abbildung 3-161 bis Abbildung 3-164). Während beim Hinterfüllmaterial 13 die Konzentrationswerte mit wenigen Ausnahmen über die gesamte Versuchszeit annähernd konstant bleiben, nehmen sie beim Hinterfüllmaterial 07 von über 60 mg/l bis auf Werte um 20 mg/l stetig ab. Der Vergleich der geschlossenen mit der offenen Umströmung zeigt in beiden Fällen die gleiche Entwicklungstendenz, wobei bei geschlossener Umströmung höhere Konzentrationen gemessen wurden. Im Vergleich mit den Versuchsergebnissen zum Sulfatangriff, sind die Ca^{2+} -Konzentrationen hier um etwa den Faktor 10 höher, was durch den Säureangriff auf die Hydratationsphasen Calciumhydroxide sowie des Calcits verursacht wird (Stark & Wicht 2013).

Die Mg^{2+} -Konzentrationen, deren Initialwert 0 mg/l betrug, ist mit Werten zwischen 0 mg/l und 0,3 mg/l bei beiden Hinterfüllmaterialien konstant und korreliert mit dem gemessenen pH-Wert von <10 , da das Magnesium in diesem pH-Wertbereich im Wesentlichen in Form von ausgefälltem Brucit vorliegt. Die Ausfällungen wurden auf der Lösung und Probe (Abbildung 3-174) sowie in den Umströmungsschläuchen beobachtet.

Die K^{+} -Konzentrationen sind geringfügig erhöht und streuen um den Wert $C/C_0 \pm 1$. Die Natriumkonzentrationen streuen während des gesamten Versuchszeitraums unregelmäßig im Bereich $0,5 \leq C/C_0 \leq 1,5$, mit Ausnahme der Versuche 07/C1G und 13/C1G, bei denen wie bei den Versuchen mit Leitungswasser zu Versuchsbeginn es aufgrund der geschlossenen Umströmung zur Anreicherung kommt, wodurch höhere Konzentrationen bestimmt werden können.

Die Sulfat-Konzentration verändert sich bei beiden Hinterfüllmaterialien und Umströmungsarten im Vergleich zu ihren Ausgangswerten praktisch nicht, sie schwankt um $C/C_0 \pm 1$. Damit kommt es hier wie im Versuch mit Leitungswasser weder zur Konzentrationsreduzierung durch Ausfällungen, noch zu einem Konzentrationsanstieg durch Lösungserscheinungen.

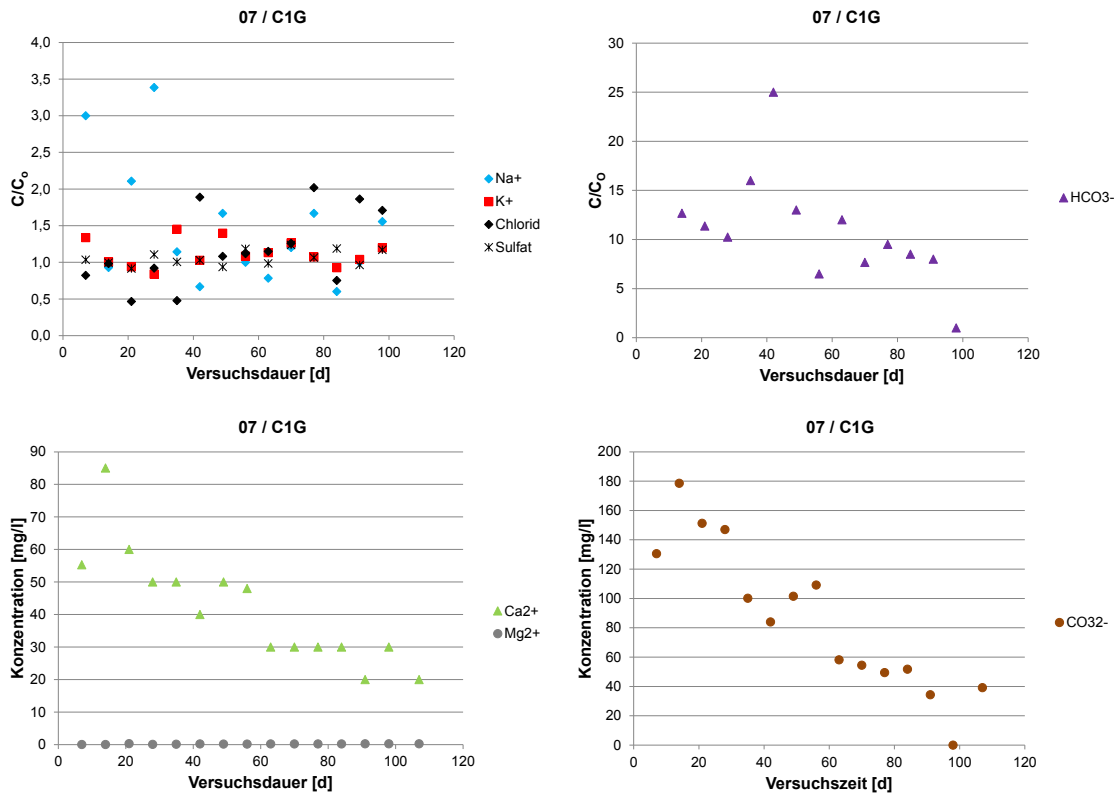


Abbildung 3-161: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung C1G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

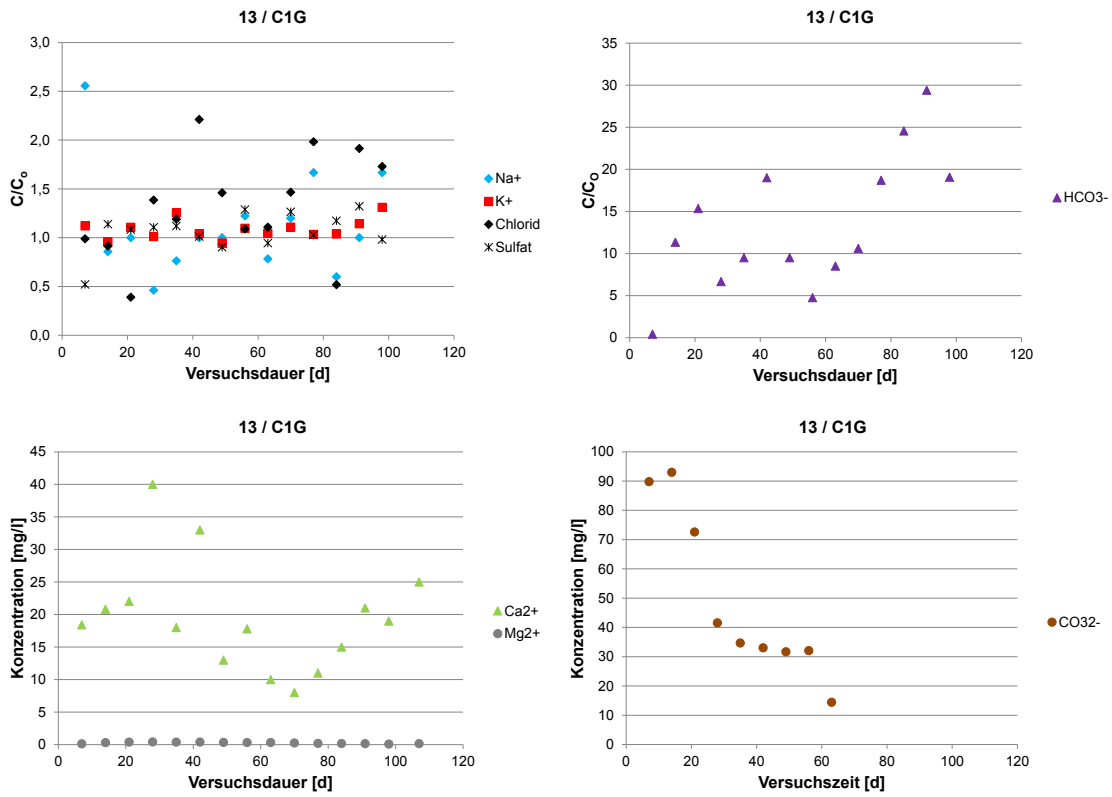


Abbildung 3-162: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung C1G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

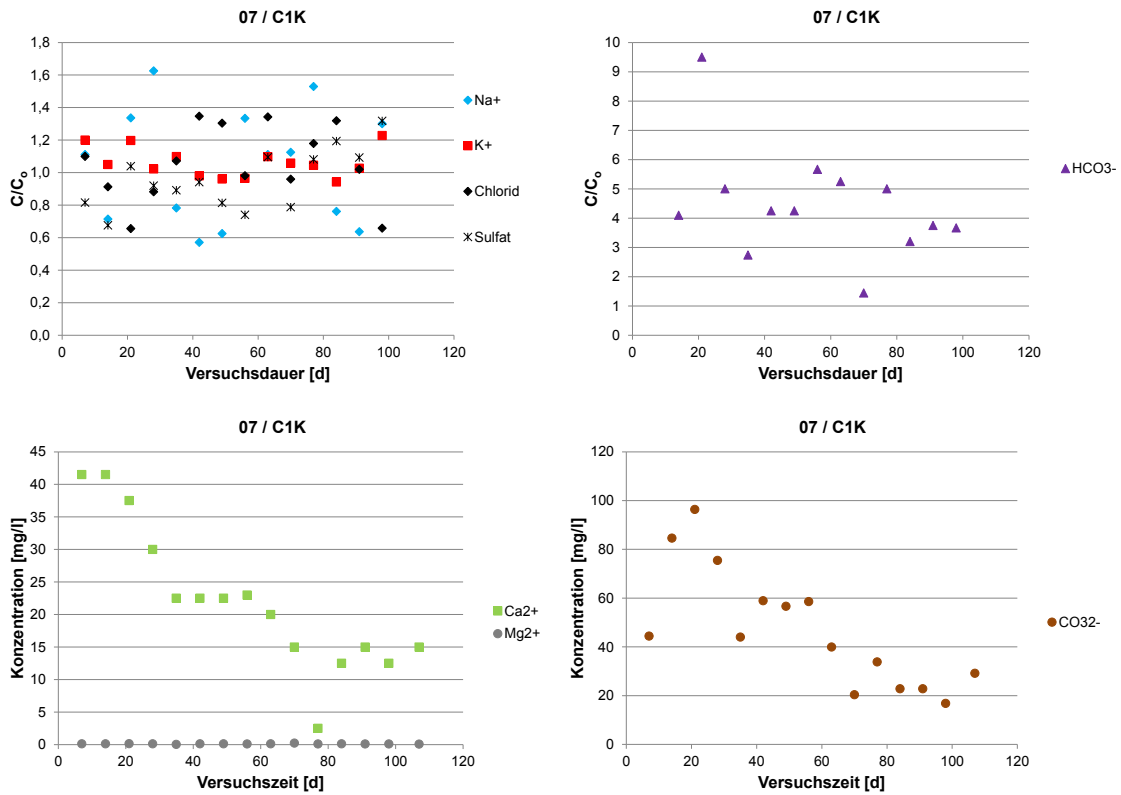


Abbildung 3-163: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung C1K im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

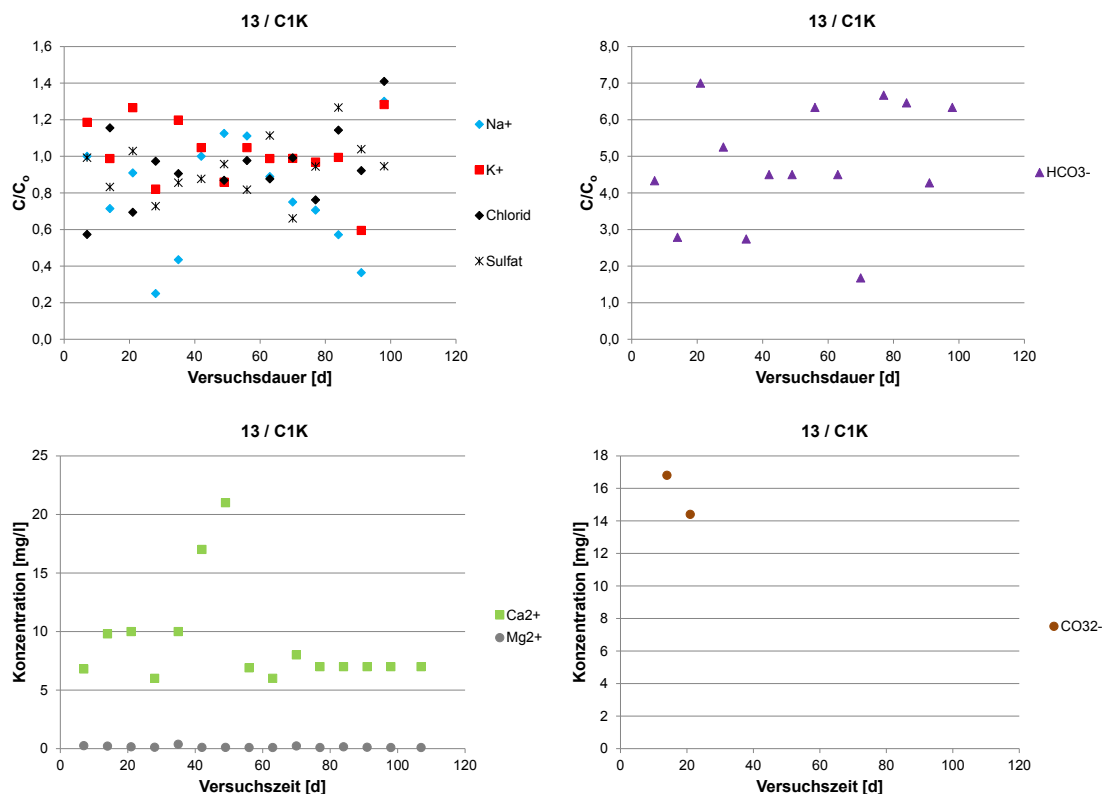


Abbildung 3-164: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung C1K im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

Die Konzentration von Hydrogencarbonat in den Wässern des Typs C erfährt, unabhängig von dem Hinterfüllmaterial und der Umströmungsart, im Vergleich zu den Initialwerten eine deutliche Zunahme (Abbildung 3-161 - Abbildung 3-164). Bei der kontinuierlichen Umströmung schwanken die Konzentrationserhöhungen bei beiden Hinterfüllmaterialien während des gesamten Versuchszeitraumes um $C/C_0 = 5$ und liegen deutlich niedriger als bei der geschlossenen Umströmung. Insgesamt ist jedoch kein steigender oder fallender Trend in der Konzentrationsentwicklung erkennbar.

Die gemessenen Carbonat-Konzentrationen für die beiden Hinterfüllmaterialien sind in mg/l aufgetragen, da in den Initialwässern aufgrund ihres pH-Wertes von 5 keine Carbonationen vorhanden waren. Auffallend ist, dass beim Hinterfüllmaterial 07 die Carbonat-Konzentrationen deutlich höher sind als beim Hinterfüllmaterial 13. Bei beiden Hinterfüllmaterialien zeigt sich unabhängig von den Umströmungsarten eine Reduzierung der Konzentration über die Versuchsdauer, wobei die Messwerte für die kontinuierliche Umströmung jeweils niedriger sind. Prinzipiell scheint der Hinterfüllbaustoff 07 stärker als der Baustoff 13 auf den Säureangriff zu reagieren, was zum einen an der Porenöffnungsweite (Abbildung 3-184) und zum anderen an der mineralogischen Zusammensetzung des Baustoffs (Abbildung 3-175) liegt und sich neben der Entwicklung der Ca²⁺-Konzentration auch am pH-Wert und an den Kohlensäurespezies zeigt. Da die Reaktionsfront des Säureangriffs immer weiter in den Probenkörper vordringt und damit der Migrationsweg für die

gelösten Ionen immer länger wird, ist die korrelierende Konzentrationsabnahme des Ca^{2+} und des CO_3^{2-} die logische Entwicklung. Die Verteilung der Kohlensäurespezies ist dabei von den physikochemischen Eigenschaften der Reaktionslösung abhängig. In Abbildung 3-165 ist die pH-Wertabhängigkeiten der Kohlensäurespezies dargestellt.

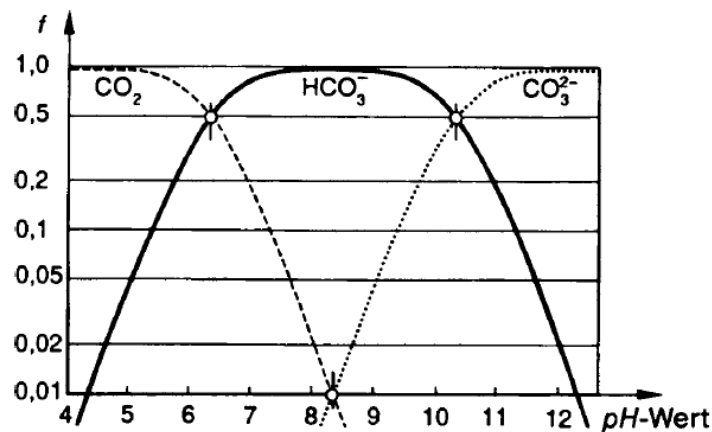


Abbildung 3-165: Anteile (f) von CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} in einer Wasserprobe in Abhängigkeit vom pH-Wert (aus Wilhelm 2008)

Für das Wasser des Typs C1 wird die Kohlensäurespezies-/pH-Wertabhängigkeit für beide Hinterfüllmaterialien in Abbildung 3-166 verdeutlicht. Hier zeigt sich für beide Baustoffe, dass die gemessenen Hydrogencarbonat- und Carbonationenkonzentrationen sich entsprechen. Die Baustoffe zeigen leichte Unterschiede bei der kontinuierlichen und geschlossenen Umströmung. Insgesamt sind beim Baustoff 13 die gemessenen pH-Werte etwas geringer als beim Baustoff 07 und deshalb bewegen sich, gemäß Abbildung 3-165, die Konzentrationsverhältnisse der Kohlensäurespezies in Richtung HCO_3^- . Die höheren pH-Werte bei der geschlossenen Umströmung können mit der längeren Kontaktzeit und den geringeren Wasservolumina sowie dem nicht kontinuierlichen Wasserwechsel bei der geschlossenen Umströmung erklärt werden. Die hohen pH-Werte bedingen insbesondere beim Baustoff 07, dass die Kohlensäurespezies zu Versuchsbeginn vorwiegend als CO_3^{2-} vorliegt und damit relativ hohe Carbonat-Konzentrationen gemessen wurden. Im weiteren Versuchsverlauf ändert sich die Speziesverteilung auch beim Hinterfüllmaterial 07 etwas mehr zum HCO_3^- . Da die pH-Wertreduzierung bei dem Hinterfüllmaterial 13 stärker ausfiel als bei dem Hinterfüllmaterial 07, können bei den Versuchen mit dem Baustoff 13 bei niedrigen pH-Werten keine CO_3^{2-} -Konzentrationen gemessen werden. Bei hohen pH-Werten muss zudem beachtet werden, dass feste Carbonatphasen ausfallen können (z. B. Calcit) und somit insgesamt die Kohlensäureionenbilanzen beeinflussen können. Dieser Effekt ist bei Baustoff 07 aufgrund der insgesamt höheren pH-Werte eher wahrscheinlich. Insgesamt zeigt der Baustoff 13 einen höheren Säurewiderstand gegenüber dem Wasser des Typs C1 als der Baustoff 07.

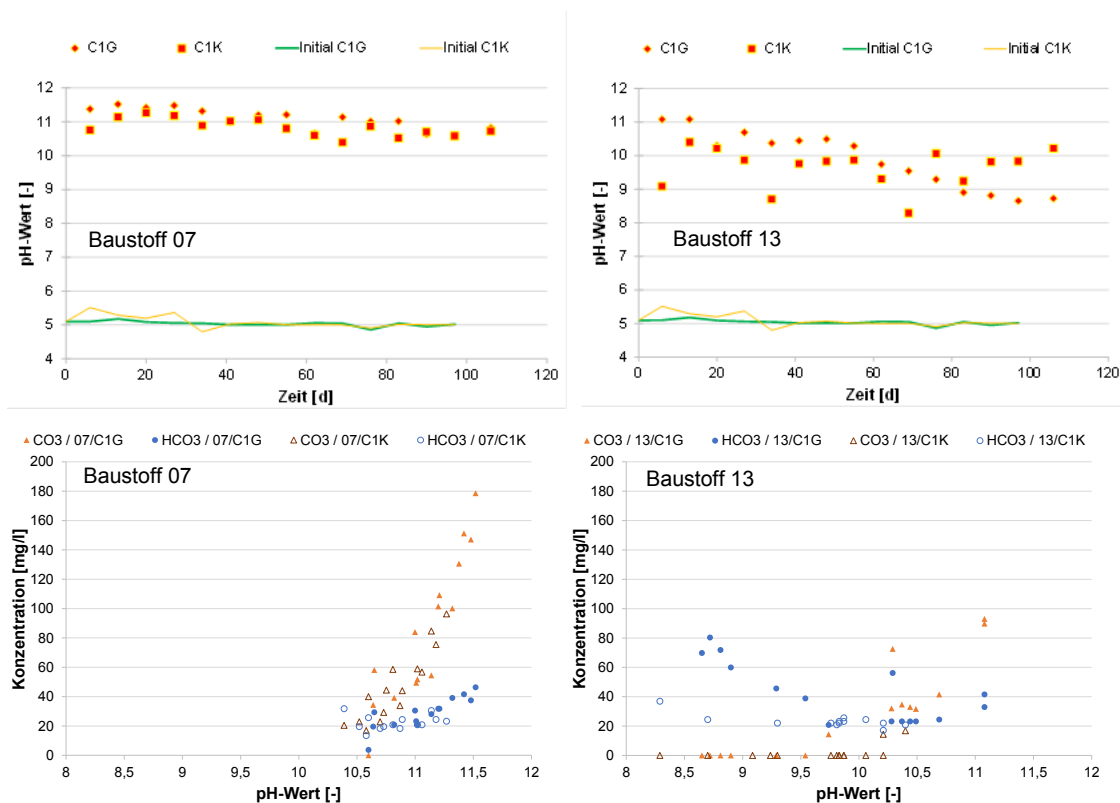


Abbildung 3-166: pH-Wert-Abhängigkeit des Wassers C1G und C1K bei den Hinterfüllmaterialien 07 (links) und 13 (rechts)

In der Sole 2 verändern sich bei beiden Hinterfüllmaterialien sowohl die Na⁺- als auch die K⁺-Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum kaum (Abbildung 3-167, Abbildung 3-168) und liegen bei C/C₀ ± 1. Mg²⁺ konnte zu Versuchsbeginn aufgrund der hohen pH-Werte bei beiden Baustoffen nicht nachgewiesen werden, da es in diesem pH-Wertfenster als Brucit in der Reaktionslösung ausfällt. Erst mit Abnahme des pH-Werts ist im Versuchsverlauf 20 bzw. 60 Tagen ein Anstieg der Mg²⁺-Konzentration zu erkennen. Die Ca²⁺-Konzentrationsentwicklung verhält sich analog zu der des Wassers des Typs C1. Es fällt besonders bei Baustoff 07 auf, dass die Ca²⁺-Konzentrationen sehr gut mit den Kohlensäurespezies übereinstimmen und damit wohl einem Säureangriff auf die Calcitphasen in der Hinterfüllung geschuldet ist. Die Chlorid- und Sulfatkonzentrationen liegen bei C/C₀ ± 1. Insgesamt besitzt auch beim Wasser des Typs C2 der Baustoff 13 einen höheren Säurewiderstand als der Baustoff 07.

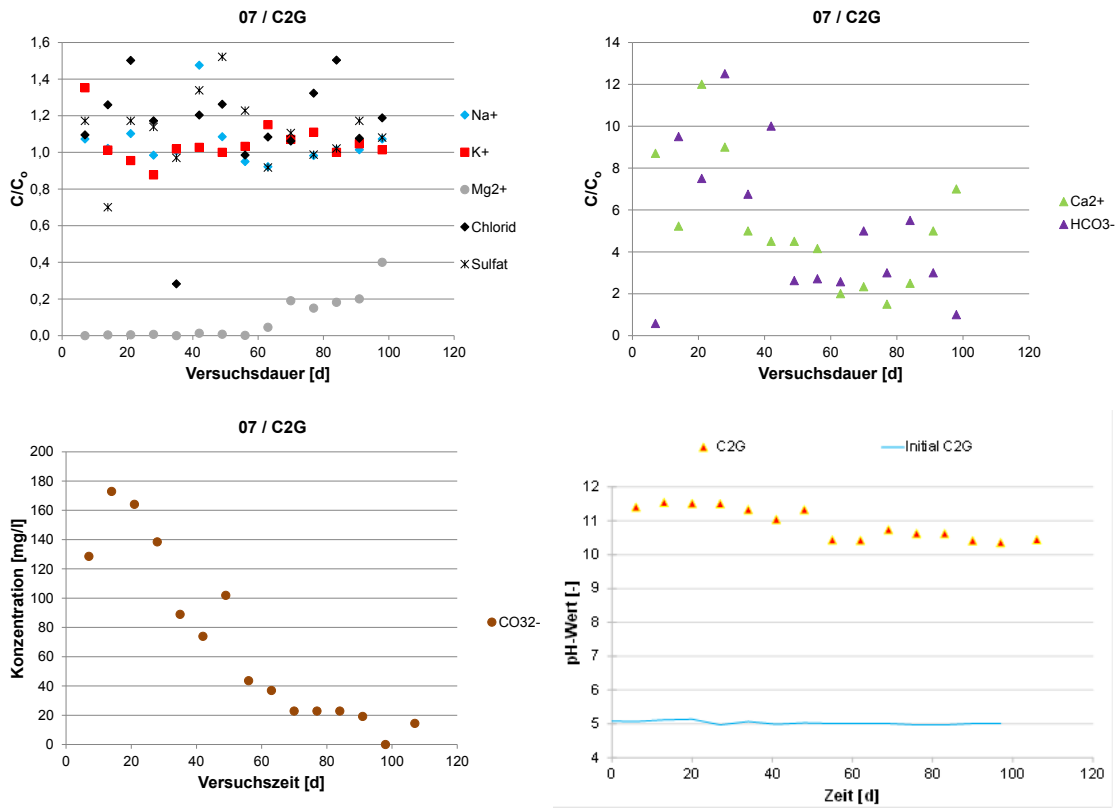


Abbildung 3-167: Entwicklung der Ionenkonzentration und des pH-Werts in der Reaktionslösung C2K im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

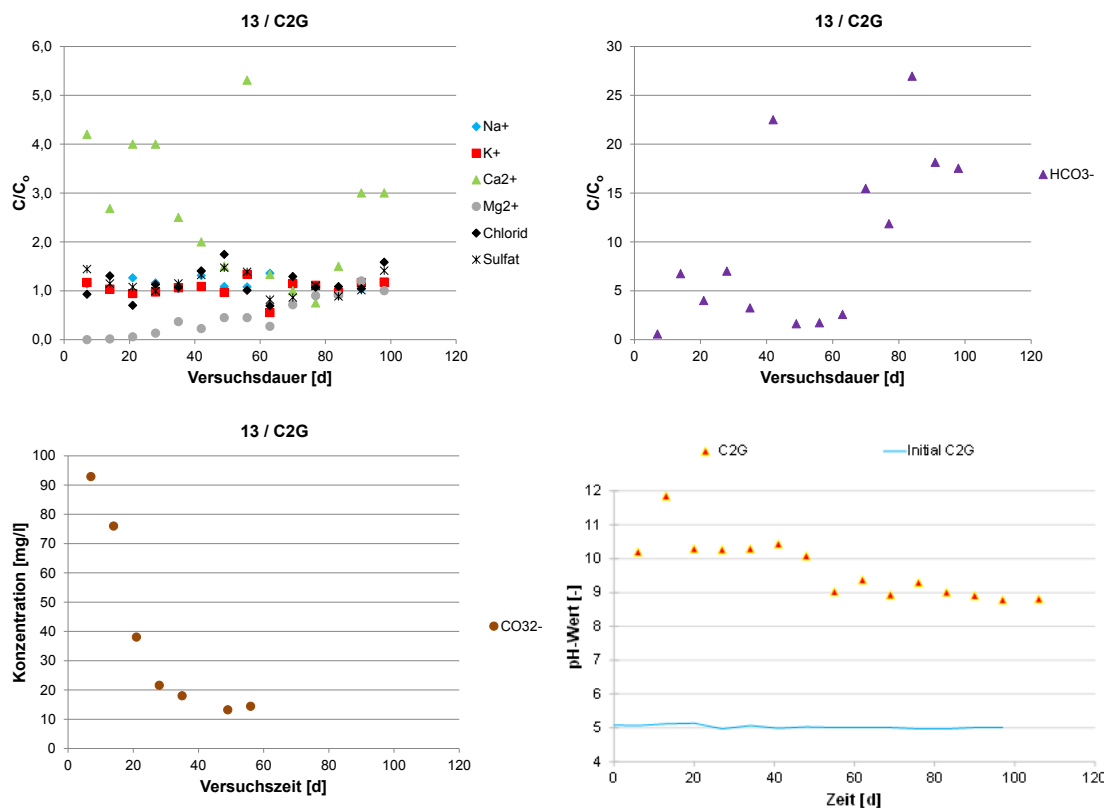


Abbildung 3-168: Entwicklung der Ionenkonzentration und des pH-Werts in der Reaktionslösung C2G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

In der Reaktionslösung C3, in der ursprünglich kein Kalium und Magnesium enthalten war, sind auch bei Kontakt mit den Hinterfüllmaterialien nur sehr geringe Magnesiumkonzentrationen nachweisbar (Abbildung 3-169 bis Abbildung 3-172), die Kalium-Konzentration hingegen zeigt zu Versuchsbeginn aufgrund der bei der Hydratation aus den Alkalisulfaten freigesetzten Alkaliionen hohe Werte, die im Versuchsverlauf unregelmäßig geringer werden, wobei dieser Effekt bei geschlossener Umströmung deutlicher ausfällt als bei kontinuierlicher Umströmung.

Die Na⁺-Konzentration schwankt, unabhängig vom Hinterfüllmaterial und der Umströmungsart, im engen Bereich um $C/C_0 \pm 1$, so dass gegenüber dem Initialwert keine Änderungen festzustellen sind.

Beim Hinterfüllmaterial 13 zeigt die Ca²⁺-Konzentration bei der geschlossenen Umströmung geringfügig erhöhte Werte, während sie bei kontinuierlicher Umströmung um $C/C_0 \pm 1$ liegt. Beim Hinterfüllmaterial 07 erkennt man bei der offenen Umströmung einen Ca²⁺-Konzentrationsanstieg im Bereich $1,3 \leq C/C_0 \leq 1,7$ und bei der geschlossenen Umströmung im Bereich $1,5 \leq C/C_0 \leq 2,5$. Die Entwicklung der Anionkonzentrationen verlaufen analog zu den bereits diskutierten Wässern. Diese Ionenkonzentrationsveränderungen in den Wässern passen zu den beschriebenen Beobachtungen bei der Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit. Generell weisen beim Baustoff 07 die verwendeten Wässer höhere Ionenkonzentrationen auf, wodurch auch deren Leitfähigkeit

stärker angestiegen ist, als dies bei den Wässern des Hinterfüllmaterials 13 der Fall ist. Im Unterschied zur geschlossenen Umströmung waren die Wässer mit offener Umströmung deutlich kürzer in Kontakt mit den Hinterfüllmaterialien, sodass hier die Wechselwirkungen weniger intensiv erfolgten, was zu einer geringeren Veränderung der Konzentrationen geführt hat. Weiterhin nimmt der Anstieg der Konzentrationserhöhung während des gesamten Versuchszeitraumes kontinuierlich ab. Insgesamt hat beim Wasser des Typs C3 in Analogie zu den Wässern des Typs C1 und C2 der Baustoff 13 einen höheren Säurewiderstand als der Baustoff 07.

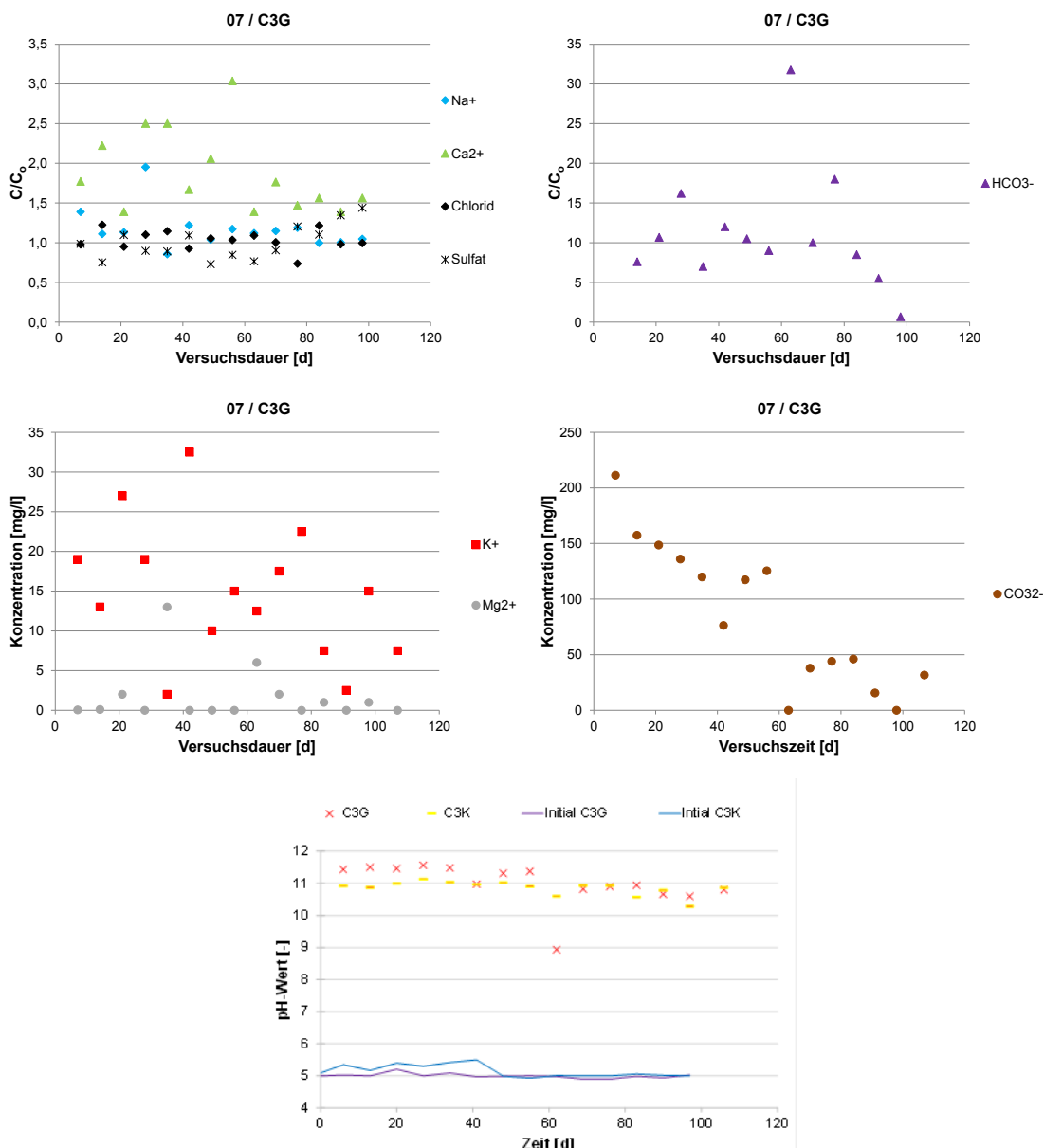


Abbildung 3-169: Entwicklung der Ionenkonzentration und des pH-Werts in der Reaktionslösung C3G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

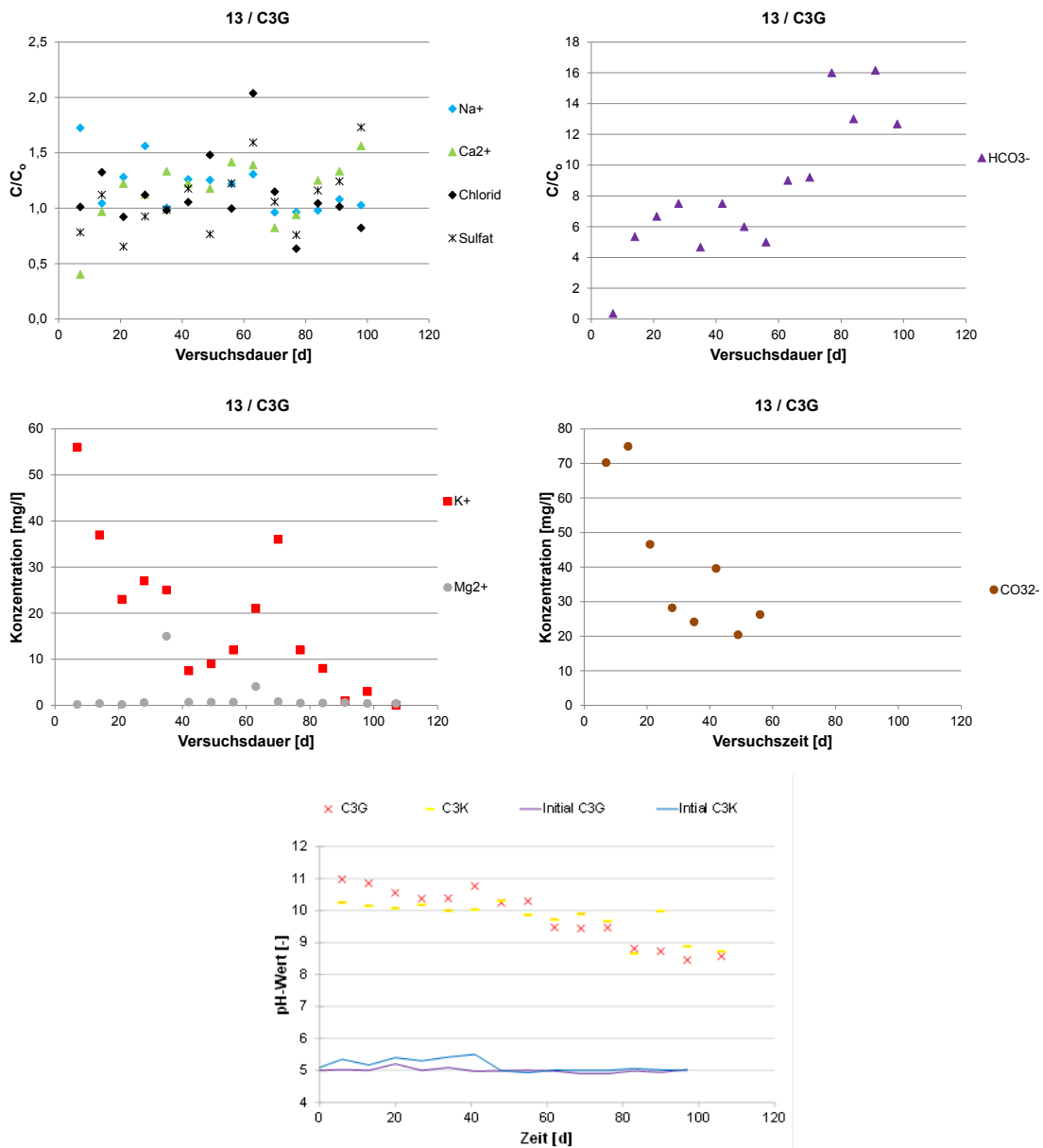


Abbildung 3-170: Entwicklung der Ionenkonzentration und des pH-Werts in der Reaktionslösung C3G im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

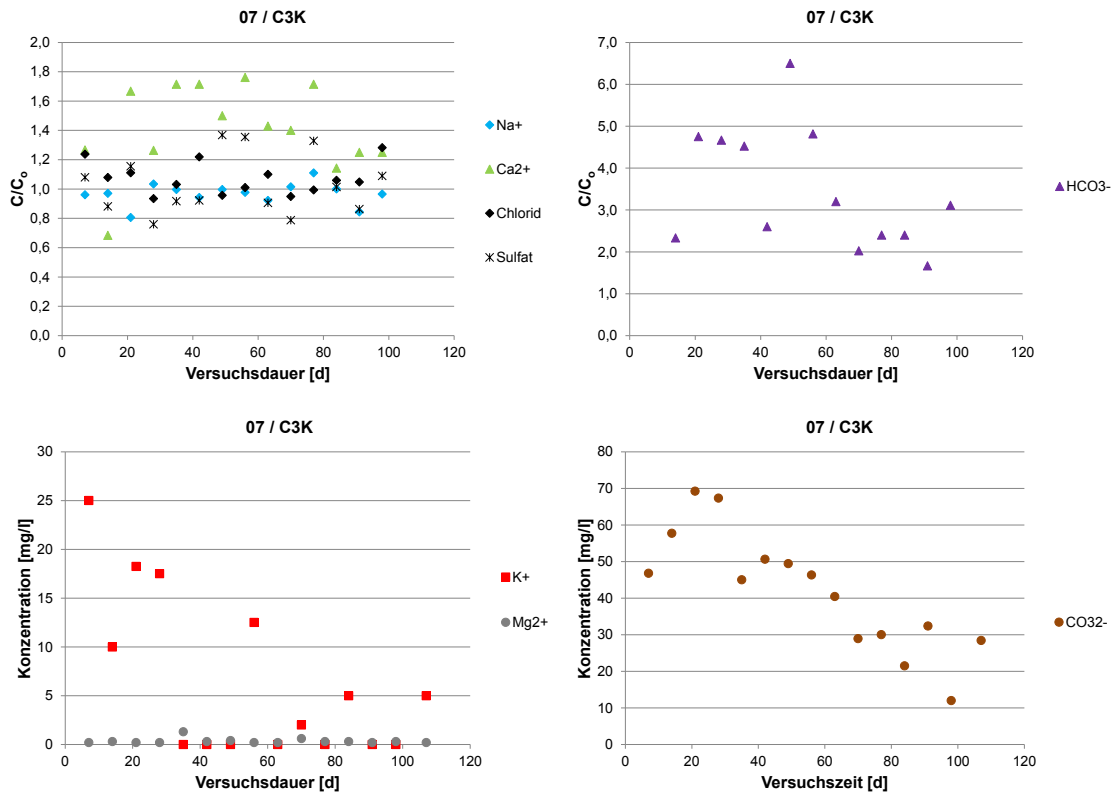


Abbildung 3-171: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung C3K im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 07

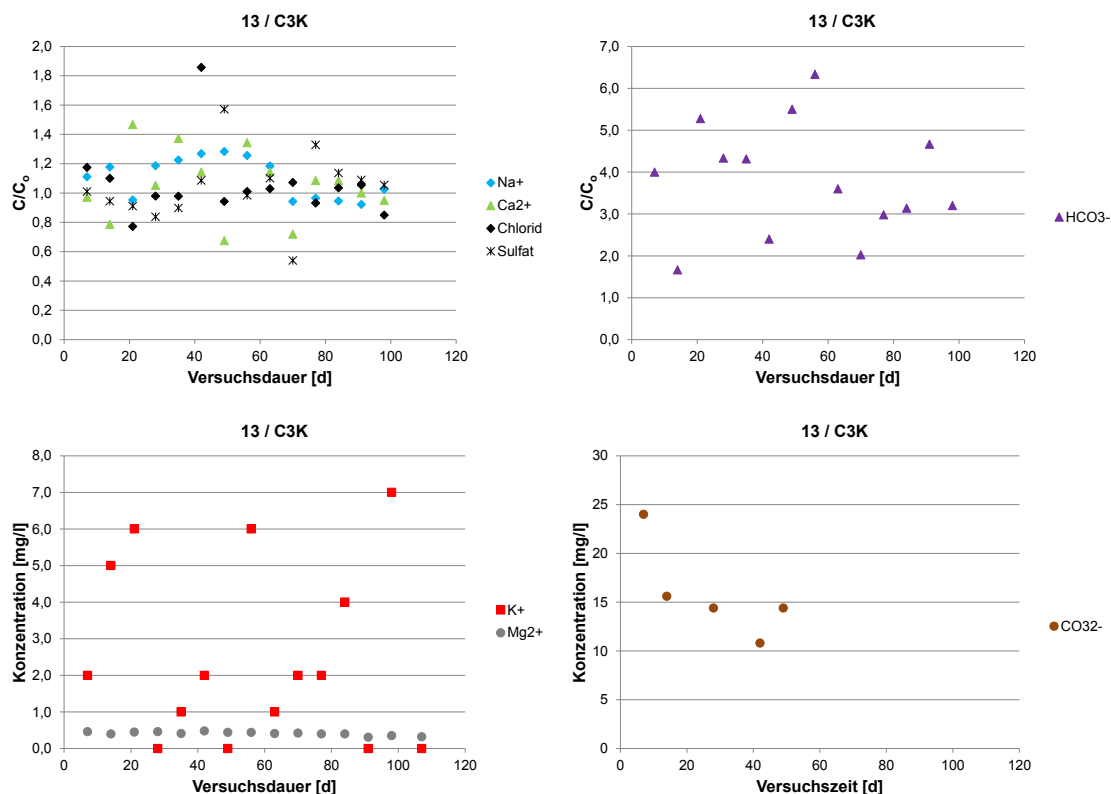


Abbildung 3-172: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung C3K im Umströmungsversuch mit dem Baustoff 13

Bei einem kalklösenden Säureangriff werden die Hydratphasen an der Zementoberfläche zersetzt, wobei hier v.a. die Calciumhydratphasen (z.B. Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Calciumsilikahydrat CSH, Calciumaluminatferrithydrat C(A,F)H) angegriffen werden, was durch den starken Anstieg der Calcium-Konzentrationen in allen Wässern gezeigt wird (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Dabei ist Calciumhydroxid dasjenige Hydratationsprodukt im Zementstein, welches am leichtesten löslich ist (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Portlandit entsteht bei der Hydratation von Tricalciumsilikat und wird als Zusatzstoff dem Zement zugegeben, um seine Festigkeit zu erhöhen (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Bei 20 °C beträgt seine Löslichkeit $1,7\text{g/l}_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ und es reagiert dabei in Lösung sehr stark alkalisch (Gestis-Stoffdatenbank). Weiterhin werden aber auch die leicht löslichen Natrium- und Kaliumhydrate der Hinterfüllbaustoffe beim Säureangriff zersetzt, was die zum Teil beobachteten Konzentrationsanstiege in den Umströmungsversuchen zeigen.

Die sauren Wässer greifen die Oberflächen der Prismenkörper an, lösen deren Bestandteile auf und verursachen damit eine von außen nach innen fortschreitende Auflösung des Gefüges. Hierbei findet zuerst eine relativ rasch ablaufende Reaktion der angreifenden Wässer mit den Calciumhydraten statt, die sich im Laufe der Zeit abschwächt. Durch diesen fortschreitenden chemischen Angriff kommt es zu einer Zonenbildung im Zementstein (Grube & Rechenberg 1987; Franke 1996), die in Abbildung 3-40 dargestellt ist.

Zu Beginn des Säureangriffs (Zeitstufe 1) greift die Lösung die noch vollständig intakte Zementsteinoberfläche an. Als Folge davon bildet sich eine Reaktionszone (Zeitstufe 2) aus, in der sich das Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in Calciumcarbonat CaCO_3 umwandelt. Durch die Auflösung dieses Calciumcarbonats findet der erste Abtransport von Calcium aus dem Zement als gelöstes Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ statt (Verein Deutscher Zementwerke 2002). Mit fortschreitender Zeit wandert die Reaktionszone weiter ins Innere (Zeitstufe 3) und hinterlässt die sogenannte Auslaugungszone aus unlöslichen Reaktionsprodukten des Zementsteins (Hydroxide, Kieselsäure, Verein Deutscher Zementwerke 2002; Locher & Sprung 1975). Die Breite der Auslaugungszone hängt von der Säurekonzentration und der Einwirkzeit ab (Franke 1996). Für den weiteren chemischen Angriff müssen die Ionen durch diese Auslaugungszone hindurch diffundieren. Durch den größer gewordenen Diffusionsweg werden die Geschwindigkeit des Säureangriffs und der damit erfolgende Schadensfortschritt verlangsamt und reduziert.

Die Ausbreitung der Auslaugungszone ins Zementsteininnere und der damit verbundene, gehemmte Säureangriff erklärt die mit fortschreitender Versuchszeit beobachtete, stetige Abnahme der gegenüber der Ausgangslösung erhöhten Ionenkonzentrationen in den Wässern. Die bei der Umströmung der Hinterfüllmaterialien mit den Wässern C1-C3 beobachtete, deutliche Ionenauslaugung konnte bei der Verwendung von Leitungswasser nicht festgestellt werden, sodass die Zonenbildung bei der Umströmung mit Leitungswasser nicht oder nur sehr schwach stattgefunden hat. Diese Zonenbildung konnte mit bloßem Auge nur beim Hinterfüllmaterial 07 beobachtet werden (Abbildung 3-173). Hier wurde bei den im Versuch verwendeten Prüfkörpern ein sehr harter, intakter Kern in der Mitte des Zementsteins beobachtet. Der äußere Bereich besteht aus der Reaktionszone und aus der Auslaugungszone, die eine poröse Gesteinskörnung aufweist.

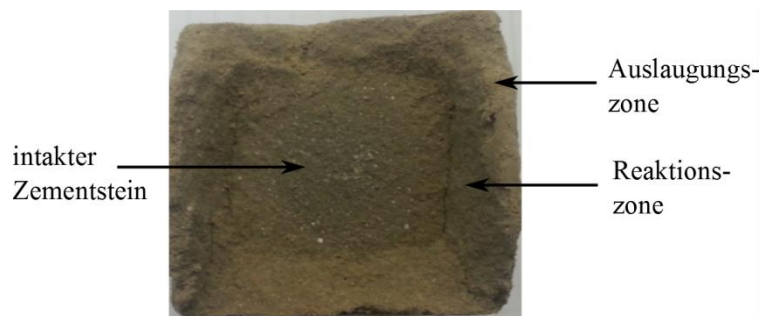


Abbildung 3-173: Zonenbildung beim Hinterfüllmaterial 07

Beim Hinterfüllmaterial 13 waren die drei Zonen makroskopisch nicht erkennbar. Aufgrund der über die Zeit erfolgten Abnahme der Ionenkonzentrationen in den Reaktionslösungen muss jedoch davon ausgegangen werden, dass diese sich auch hier gebildet haben.

Ein weiterer bei dem Hinterfüllmaterial 07 beobachteter Effekt war die Ausfällung von Feststoffen aus den Wässern. Diese Feststoffe scheiden sich u.a. als Hydroxid (z.B. Magnesiumhydroxid $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (Brucit)) oder Silikat ab und bilden an der Oberfläche der Probekörper einen dünnen Überzug (Abbildung 3-174), der den weiteren Angriff zusätzlich behindern kann (Locher & Sprung

1975). Diese Ausfällungen von Hydroxiden wurden auch innerhalb der Reaktionslösung beobachtet (Abbildung 3-174).

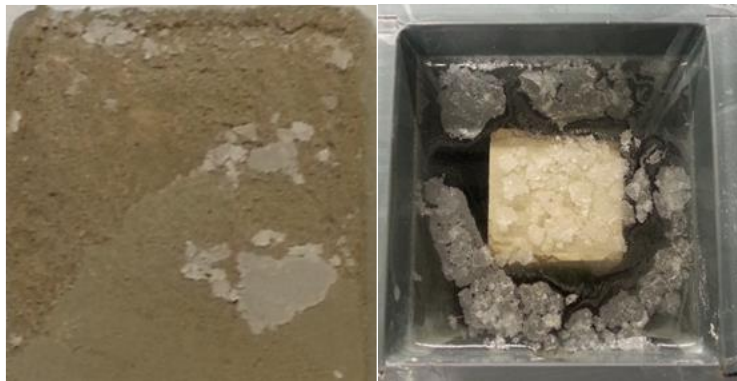


Abbildung 3-174: Ausgefällene Feststoffe an der Oberfläche des Hinterfüllmaterials 07 (links) und auf der Reaktionslösung (rechts)

In Abbildung 3-175 sind für alle Probekörper die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse dargestellt. Während beim Hinterfüllmaterial 13 Graphit und Calciumcarbonat identifiziert werden konnten, wurden beim Hinterfüllmaterial 07 als kristalline Bestandteile Quarz und Calciumcarbonat nachgewiesen. Bei den Prüfkörpern beider Hinterfüllbaustoffe ist zu erkennen, dass der Calciumcarbonatgehalt im Vergleich zu den Blind- und Initialproben angestiegen ist. Für das Hinterfüllmaterial 13 wurden die Blindprobe und der Probekörper, der mit Wasser des Typs C1K umströmt worden war, nach DIN 18129 (2011) auf den Kalkgehalt hin untersucht. Hierbei hat sich noch einmal bestätigt, dass der Gehalt von Calciumcarbonat tatsächlich um ca. 1% angestiegen ist. Durch den Säureangriff wurden neben Calcit und Portlandit auch die Calciumhydratphasen wie z.B. $C_3S_2H_3$ -Phase gelöst. Dabei wird zusätzlich Ca^{2+} in die Porenlösung freigesetzt. Aufgrund ihrer hohen Mobilität diffundieren die H_3O^+ -Ionen relativ schnell in den Probekörper und senken hier im Zuge des Säureangriffs den pH-Wert, der jedoch wegen der hohen initialen OH^- -Konzentration und des geringeren zur Verfügung stehenden Porenraums auch zu Versuchsende noch pH-Werte von > 11 aufweist (Abbildung 3-155) und somit weiterhin $Ca(OH)_2$ im Probekörper vorhanden ist. Da es sich bei der Versuchsanordnung nicht um ein geschlossenes System handelt, kann sich CO_2 in der Reaktionslösung lösen und in den Probekörper diffundieren und es kommt innerhalb der Reaktionszone zur Carbonatisierung (Stark & Wicht 2013).

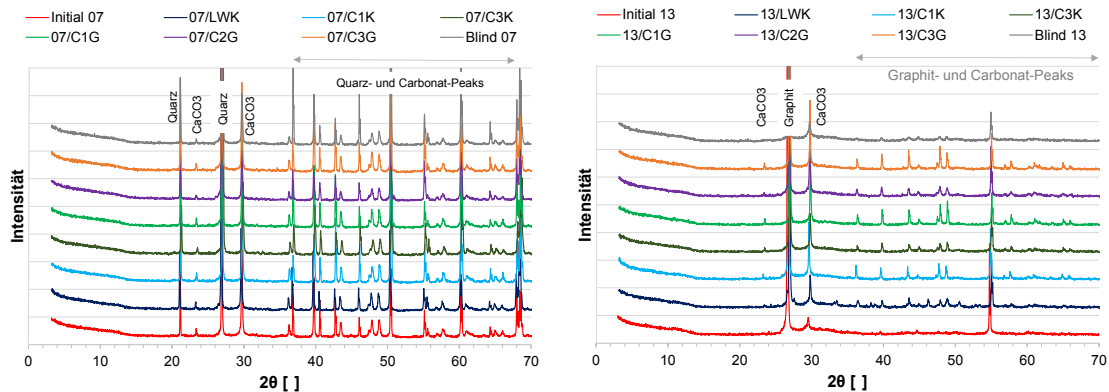


Abbildung 3-175: Mineralogische Zusammensetzung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit sauren Wässern

In Abbildung 3-176 ist das Röntgenbeugungsdiagramm einer nicht gealterten Initialprobe des Hinterfüllmaterials 07 aus einer früheren Untersuchung dargestellt. Im Unterschied zur Abbildung 3-175 zeigt diese Probe Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), der während der Hydratation entstand und mit zur Festigkeit des Hinterfüllmaterials beiträgt. Sein Fehlen kann in den Versuchen zum Säureangriff als Ursache dafür angesehen werden, dass sich das Hinterfüllmaterial 07 nicht vollständig verfestigen konnte wodurch eventuell ein zu starker Säureangriff ermittelt wurde. Hierbei muss angemerkt werden, dass Portlandit generell nicht säurestabil ist.

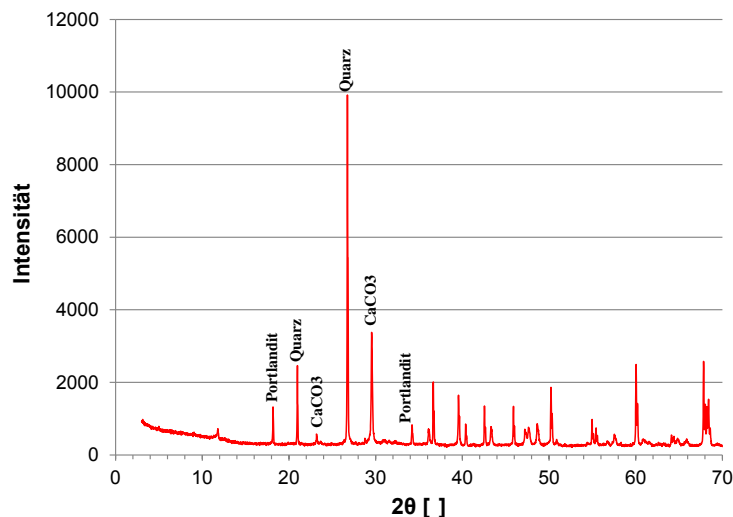


Abbildung 3-176: Mineralogische Zusammensetzung des nicht gealterten Baustoffs 07 zu Projektbeginn

Die Probekörper der beiden Hinterfüllmaterialien wurden vor dem Einbau in die Umströmungszellen sowie nach vier, acht und 16 Wochen gewogen und vermessen. Dabei mussten die Probekörper vorsichtig aus den Umströmungszellen entnommen werden, damit sie nicht zerstört

wurden. Aufgrund der mangelnden Festigkeit des Hinterfüllmaterials 07 konnten die Proben U2 (C3K), U3 (C1G) und U4 (C2G) nicht während der Versuchsdurchführung aus den Zellen entnommen werden. Deshalb liegen für diese Proben nur Messwerte zum Zeitpunkt von Ein- und Ausbau der Probekörper vor.

Die Vermessung der Längen und Breiten der Probekörper des Hinterfüllmaterials 13 ergab absolute Änderungen im niedrigen Zehntelmillimeterbereich (Abbildung 3-153). Die Vermessung der Probekörper des Hinterfüllmaterials 07 (Abbildung 3-152) ergab größere Änderungen bei den Längen und Breiten als beim Hinterfüllmaterial 13. Auffallend ist, dass es trotz des Säureangriffs, bei dem es eigentlich zu keiner treibenden Gefügeveränderung kommen sollte, zu einer „scheinbaren“ Dehnung der Probekörper kommt und diese besonders bei den Proben mit geschlossener Zirkulation auftritt. Wie schon bei den Versuchen zum Sulfatangriff erwähnt, sind bei der Längenmessung besonders die Ausfällungen auf der Probenoberfläche für den Längenzugewinn entscheidend und diese treten bevorzugt bei hohen pH-Werten sowie hohen Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Konzentrationen auf, also vor allem bei geschlossener Umströmung. Die Bewertung der relativen Längenänderung ist daher nur bei der Verwendung einer speziellen Messspitze aussagekräftig (siehe auch Kapitel 3.2.4.5.1, Längenänderung). Bei der hier durchgeführten Versuchsanordnung würde es durch die Ausfällungen zu Fehlinterpretationen kommen. Die abgetragenen Oberflächen und die teilweise abgebrochenen Ecken und Kanten können jedoch als Anzeichen eines lösenden Säureangriffs angesehen werden.

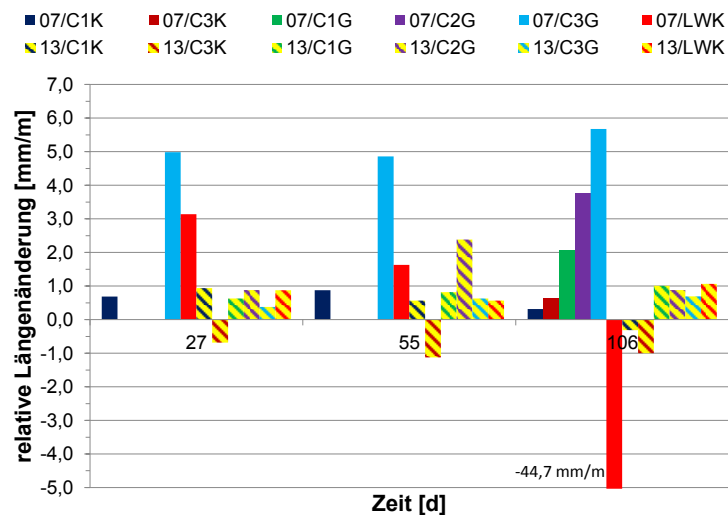


Abbildung 3-177: Relative Längenänderung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit sauren Wässern

Bei dem Hinterfüllmaterial 13 war bei allen Probekörpern eine Massenzunahme von 1,3 % bis 2 % zu beobachten (Abbildung 3-178). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Probekörper Wasser aufgenommen haben. Weiterhin kann es zu Ausfällungen an der Probekörperoberfläche gekommen sein, die zu der Massenzunahme beigetragen haben.

Beim Hinterfüllmaterial 07 hingegen hat nur der Probekörper, der mit dem Wasser des Typs C3 im geschlossenen Kreislauf umströmt wurde, minimal an Masse zugenommen. Alle anderen Probekörper haben teilweise stark an Masse verloren und zeigen damit eine deutliche Wirkung des lösenden Säureangriffes. Am meisten hat der Körper an Masse verloren, der mit Wasser des Typs C2 umströmt wurde (Abbildung 3-178). Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet, wurde hier eine Reduzierung von 8,8 % gemessen. Diese Massenreduzierung hängt im Wesentlichen mit der Lösung von Mineralphasen im Zuge des Säureangriffs zusammen und ist daher bei der gegebenen Versuchsdurchführung ein geeignetes Messverfahren zur Beurteilung des Säureangriffs.

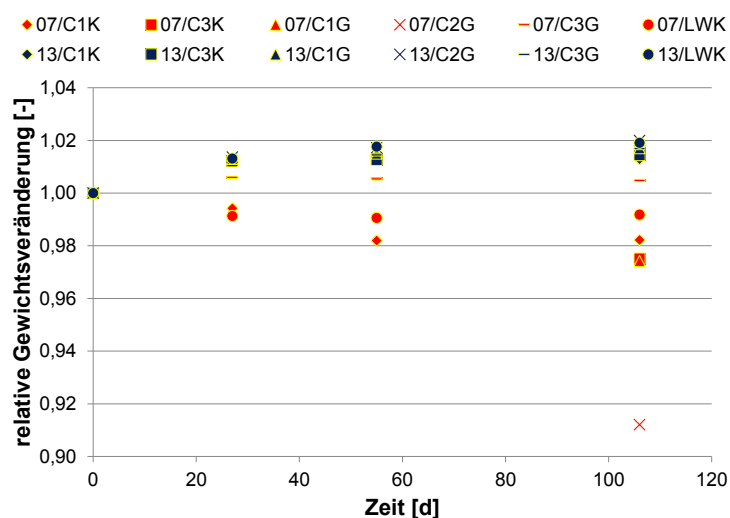


Abbildung 3-178: Relative Gewichtsänderung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit sauren Wässern

Die Bestimmung der Druck- und Biegezugfestigkeiten erfolgte an den 28 Tage alten Initialproben, den 135 Tage alten Blindprüfkörpern und an den bei den Versuchen verwendeten Probekörpern. Da beim Baustoff 07 die Festigkeitsuntersuchungen der Initialproben aufgrund der zu geringen Festigkeit der Proben nicht möglich waren, sind in Abbildung 3-179 und Abbildung 3-180 die Initialwerte aus den Versuchen zur Sulfatbeständigkeit dargestellt. Darüber hinaus entstammen auch die Werte der Probe 13/LWG (graue Balken) aus den Versuchen zur Sulfatbeständigkeit, da die Plätze im Behälter der Versuchseinrichtung für die anderen Untersuchungen belegt waren. Wie in Abbildung 3-179 zu erkennen, weisen die Probekörper des Hinterfüllmaterials 13 höhere Biegezugfestigkeiten auf als die Probekörper des Hinterfüllbaustoffs 07. Die Werte für das Hinterfüllmaterial 13 liegen im Bereich von 2,1 N/mm² bis 3,2 N/mm². Werden die Werte der Biegezugfestigkeit der Blindproben und der Versuche, die mit Leitungswasser durchgeführt wurden, mit den übrigen Versuchen verglichen, zeigt sich für den Baustoff 13 keine eindeutige Reduktion, die auf einen Säureangriff hindeuten würde. Mit Ausnahme des Probekörpers 13/C2G, dessen

Biegezugfestigkeit dem Wert der Blindprobe entspricht, sind die übrigen Messwerte alle gestiegen. Die relative Biegezugfestigkeit liegt für diesen Baustoff über 0,7.

Beim Hinterfüllmaterial 07 sind die Biegezugfestigkeiten mit Werten zwischen mit 1,0 N/mm² und 2,2 N/mm² geringer als die des Hinterfüllmaterials 13. Es zeigt sich auch deutlich, dass die mit sauren Wässern umströmten Proben deutlich geringere Biegezugfestigkeiten aufweisen als die Blindprobe und die mit Leitungswasser umströmte Probe. Die Probe 07/C1G, die auch die geringste Längenänderung und damit auch die geringsten Ausfällungen auf der Probenoberfläche aufweist, hat die geringste Biegezugfestigkeit. Durch den Säureangriff sind die Proben des Baustoffs 07 negativ beeinflusst worden, was sich in den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit deutlich zeigt. Wird hier, wie beim Sulfatangriff, die relative Biegezugfestigkeit mit einem Wert von 0,7 herangezogen, muss der „gealterte“ Baustoff 07 als nicht säurestabil eingestuft werden.

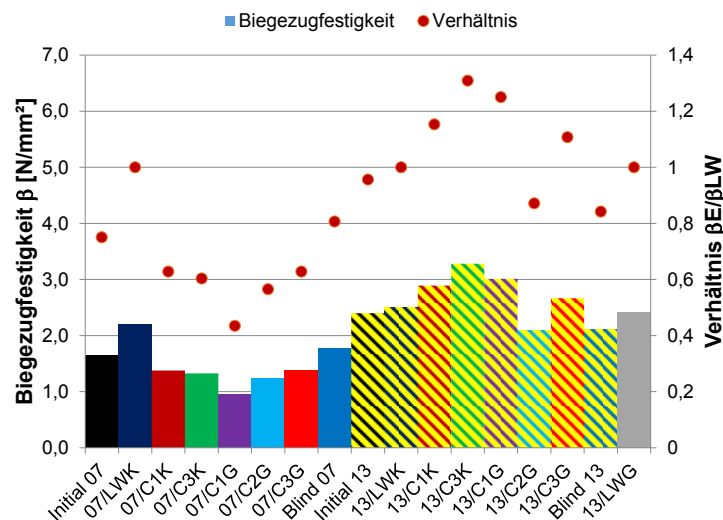


Abbildung 3-179: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit sauren Wässern

In Abbildung 3-180 ist zu erkennen, dass die Druckfestigkeiten der Blindproben beider untersuchten Hinterfüllmaterialien mit Werten von 8,4 N/mm² bzw. 9,5 N/mm² recht nah beieinander liegen. Bei den von den sauren Wässern umströmten Probekörpern zeigt sich hingegen, dass das Hinterfüllmaterial 13 deutlich höhere Druckfestigkeiten als das Hinterfüllmaterial 07 aufweist. Gegenüber der 28-Tage-Druckfestigkeit (Initialwert) zeigen die Prüfkörper des Hinterfüllmaterials 13 nach Abschluss des Versuches höhere Werte für die Druckfestigkeiten, was auf eine sogenannte Nachhärtung zurückzuführen sein könnte (Grübel et al., 2001). Sie weisen, mit Ausnahme des von Leitungswasser in einem geschlossenen Kreislauf umströmten Prüfkörpers, Werte zwischen 9,5 N/mm² und 10,6 N/mm² auf und besitzen damit ähnliche Druckfestigkeiten wie die Blindprobe. Die Werte der relativen Druckfestigkeit sind bei allen Proben > 0,7. Damit ist kein Einfluss des Säureangriffs auf die Druckfestigkeit des Hinterfüllbaustoffs 13 zu erkennen. Aufgrund der gerin-

gen Porenöffnungsweiten des Baustoffs 13 ist es jedoch bei längeren Versuchszeiten nicht ausgeschlossen, dass ein Säureangriff den Baustoff negativ hinsichtlich der Festigkeit, Durchlässigkeit usw. beeinflusst.

Der Probekörper des Hinterfüllmaterials 07, welcher von Leitungswasser umströmt wurde, zeigt eine deutlich höhere Druckfestigkeit als diejenigen Probekörper, die von den sauren Wässern umströmt wurden. Die relative Druckfestigkeit ist bei diesen Proben auch deutlich kleiner als 0,7. Obwohl der Baustoff 07 zum Messzeitpunkt noch Druckfestigkeiten größer als 2 N/mm² aufweist und damit der LQS EWS (2012) genügt, ist es sehr wahrscheinlich, dass bei Versuchszeiten über 107 Tagen dieses Kriterium nicht mehr erfüllt ist. Bei diesem Hinterfüllbaustoff kann damit auf einen Säureangriff geschlossen werden. Wie bereits erwähnt kann hier jedoch die Alterung des Probenmaterials eine Rolle spielen. Der Initialwert des Verfüllbaustoffs 07, der aufgrund der schlechten Aushärtung des Materials nicht ermittelt werden konnte, und die auffällig niedrigen Druckfestigkeitswerte der säureangegriffenen Probekörper verstärken den anfänglichen Verdacht, dass dieses Material wegen einer zu langen Lagerung und einer damit einhergehenden Alterung nicht mehr richtig aushärten konnte.

Ein Vergleich der Biegezugfestigkeiten und der Druckfestigkeiten zwischen den Ergebnissen aus den Versuchen zur Säure- und Sulfatbeständigkeit (Abbildung 3-136 und Abbildung 3-137) zeigt, dass die Biegezugfestigkeiten beim Baustoff 13 in beiden Versuchsreihen etwa die gleichen Werte aufweisen, während die Druckfestigkeiten bei den Sulfatbeständigkeitsversuchen um 2-3 N/mm² geringer sind. Beim Baustoff 07 sind bei der Versuchsreihe zur Säurestabilität sowohl die Biegezugfestigkeit als auch die Druckfestigkeit aller Proben signifikant geringer, was zum einen durch den Säureangriff bedingt ist aber zum anderen wahrscheinlich auch dem gealterten Baustoff geschuldet ist.

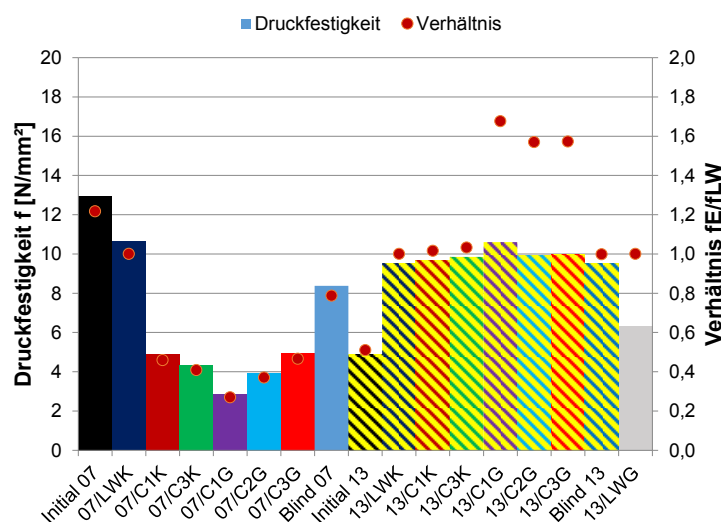


Abbildung 3-180: Entwicklung der Druckfestigkeit der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit sauren Wässern

Der Nadelpenetrometertest zur Bestimmung des NPR wurde an den Initial- und Blindproben sowie an den mit Reaktionslösungen umströmten Proben durchgeführt. Dabei wurden an jedem Probekörper mehrere Messungen durchgeführt, aus denen dann der arithmetische Mittelwert für den NPR, mit zugehöriger Standardabweichung, gebildet wurde.

In Abbildung 3-181 ist zu erkennen, dass der NPR der beiden Hinterfüllmaterialien initial sehr gering sind, im Laufe der Zeit jedoch aufgrund der fortschreitenden Aushärtung zunimmt. Beim Hinterfüllmaterial 13 erreichen alle Probekörper, unabhängig vom umströmenden Medium, sowie die Blindprobe ungefähr gleich hohe NPR-Werte. Damit kann für dieses Hinterfüllmaterial mittels des NPR kein eindeutiger Einfluss des Säureangriffs nachgewiesen werden. Das Hinterfüllmaterial 07 hingegen zeigt einen großen Streubereich mit Werten zwischen 6,0 N/mm und 25 N/mm. Auffällig dabei ist, dass die Blindprobe und der vom Leitungswasser umströmte Probekörper deutlich höhere NPR-Werte aufweisen als diejenigen Prüfkörper die von den sauren Wässern umströmt wurden. Diese gemessenen Unterschiede deuten darauf hin, dass hier der Säureangriff die Höhe des Nadelwiderstands beeinflusst hat. Wird hier der relative NPR herangezogen, so sind auch hier die relativen NPR-Werte des Baustoffs 13 größer als 0,7 während die Probekörper des Baustoffs 07, die mit sauren Wässern umströmt wurden, relative NPR-Werte deutlich unter 0,7 aufweisen.

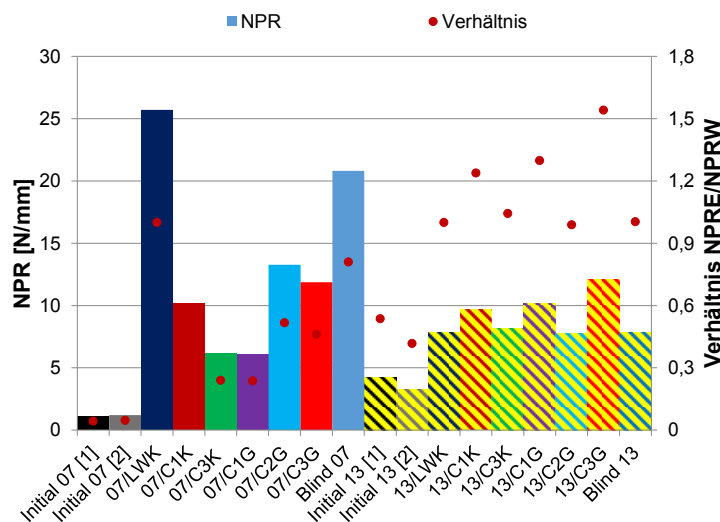


Abbildung 3-181: Entwicklung des Nadelpenetrometerwiderstands der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit sauren Wässern

Die Initialprobe des Hinterfüllmaterials 13 hat ihren dominierenden Porendurchmesser bei ungefähr $0,033 \mu\text{m}$ und weist kaum hydraulisch wirksame Porenöffnungsweiten auf, da sie nur einen sehr geringen Porenanteil mit dem Durchmesser $> 8 \mu\text{m}$ besitzt. Bei der Blindprobe wurde ein dominierender Porendurchmesser von $0,021 \mu\text{m}$ gemessen. Dieser gegenüber der Initialprobe geringere Porendurchmesser kann auf eine stattgefundene Nachhärtung zurückgeführt werden. Die Prüfkörper des Hinterfüllmaterials 13, die von sauren Wässern bzw. von Leitungswasser umströmt wurden, zeigen eine identische Porengrößenverteilung wie die Blindprobe (Abbildung

3-182 bis Abbildung 3-187). Im Falle eines Säureangriffs, der mit dem Lösen von Mineral- und Zementphasen einhergeht, wäre eine Vergrößerung der Porenöffnungsweiten zu erwarten gewesen. Da die Porenöffnungsweiten (Gelporen) dieses Baustoffs aber sehr klein sind, zeigt er einen hohen Widerstand gegenüber einem äußeren Angriff von sauren Wässern (Stark & Wicht 2013). Abbildung 3-182 bis Abbildung 3-187 zeigt, dass die Initialprobe des Hinterfüllmaterials 07 eine bimodale Porengrößenverteilung mit dem dominierenden Porendurchmesser bei ca. $1\ \mu\text{m}$ und einem zweiten, kleineren Peak bei ca. $0,02\ \mu\text{m}$ aufweist. Im Vergleich zum Hinterfüllmaterial 13 besitzt dieser Baustoff damit größere Porendurchmesser, die jedoch ebenfalls noch nicht im hydraulisch wirksamen Bereich liegen. Die beiden dominierenden Porendurchmesser liegen bei der Blind-Probe bei etwa $0,7\ \mu\text{m}$ und $0,02\ \mu\text{m}$ und treten, im Vergleich zur Initialprobe, mit geringerer Häufigkeit auf.

Bei den Probekörpern, die von den sauren Solen umströmt wurden, zeigen sich weiterhin bimodale Porengrößenverteilungen, die jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Die Probekörper 07/C3K (Abbildung 3-183), 07/C1G (Abbildung 3-184), 07/C2G (Abbildung 3-185) und 07/C3G (Abbildung 3-186) zeigen weitgehend eine ähnliche Porenverteilung. Die Porenöffnungsweiten sind dabei etwas kleiner als die der Initialproben, aber der Porenanteil ist deutlich größer als der der Blindproben, was ein Indiz für den Säureangriff darstellt. Aufgrund der größeren Porenöffnungsweiten (Kapillarporen) des Baustoffs 07 können hier die H_3O^+ -Ionen leichter in den Probekörper diffundieren und begünstigen somit den Säureangriff. Die Ausnahme bildet der Probekörper 07/C1K, der mit Wasser des Typs C1 kontinuierlich umströmt wurde. Hier treten im Vergleich zur Blindprobe vermehrt Poren mit einem Durchmesser von $0,02\ \mu\text{m}$ auf, während der Porenanteil im Bereich von $0,7\ \mu\text{m}$ abgenommen hat (Abbildung 3-182).

Die Probe, die mit Leitungswasser umströmt wurde, zeigt gegenüber der Blindprobe keine bimodale Porengrößenverteilung. Die hierbei am häufigsten vorkommenden Poren konzentrieren sich um einen Durchmesser von ca. $0,02\ \mu\text{m}$ (Abbildung 3-187). In diesem Fall wurden durch die fortschreitende Hydratation sowie durch die Ausfällungen von Carbonaten die größeren Poren verkleinert und damit das Porenspektrum hin zu kleineren Porenöffnungsweiten verschoben.

Im Vergleich zur Blindprobe treten bei den Prüfkörpern des Hinterfüllmaterials 07, die mit sauren Wässern umströmt wurden, zwar ähnliche Porendurchmesser, jedoch teilweise in einer weitaus größeren Häufigkeit auf. Damit zeigt sich hier ein negativer Einfluss des Säureangriffs auf das Porengefüge des Hinterfüllmaterial 07.

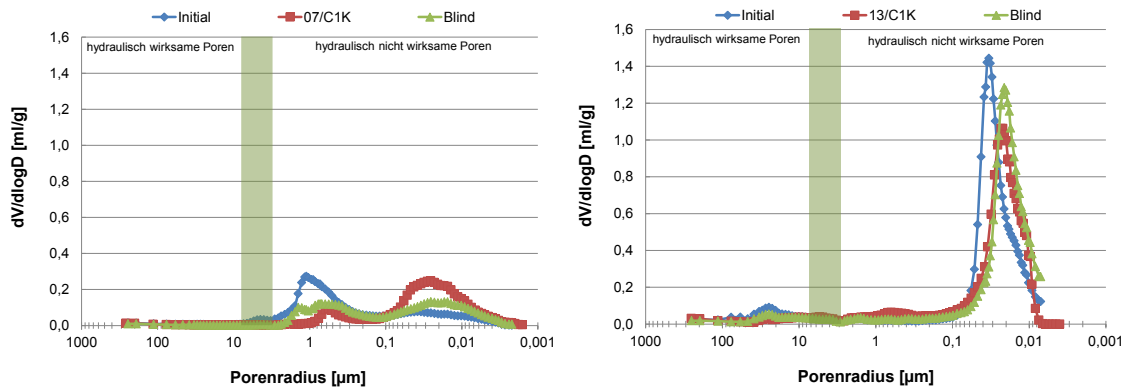


Abbildung 3-182: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs C1K

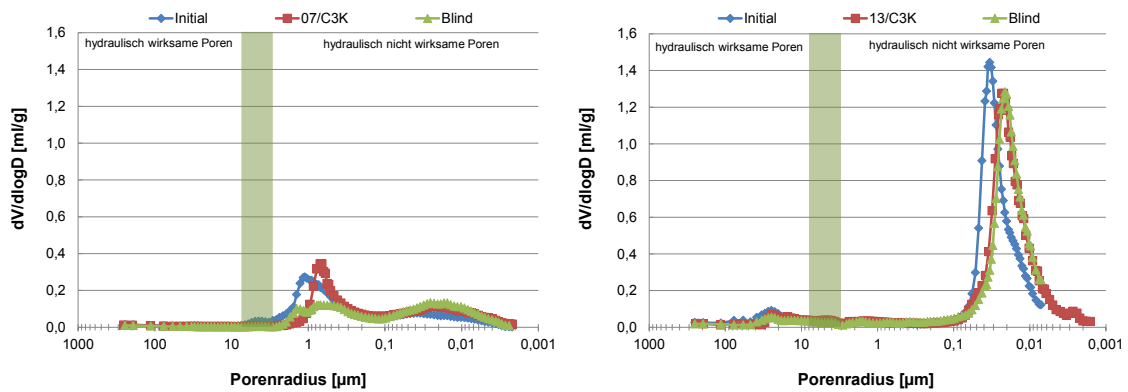


Abbildung 3-183: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs C3K

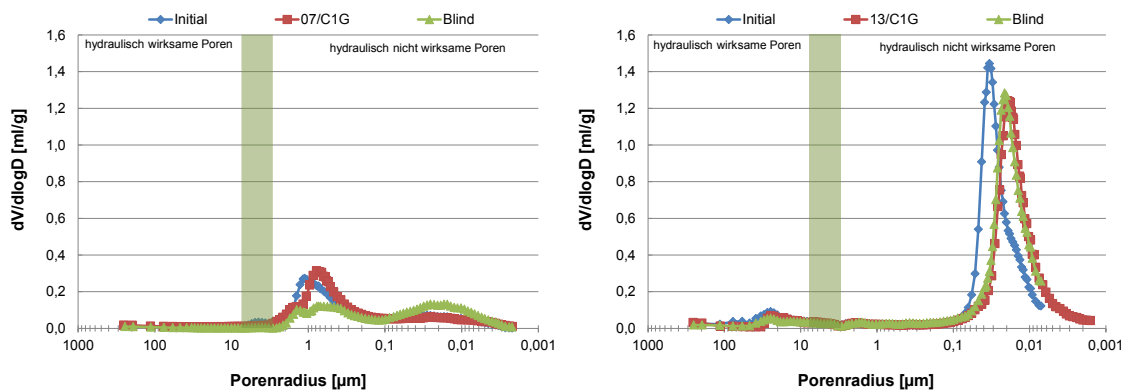


Abbildung 3-184: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs C1G

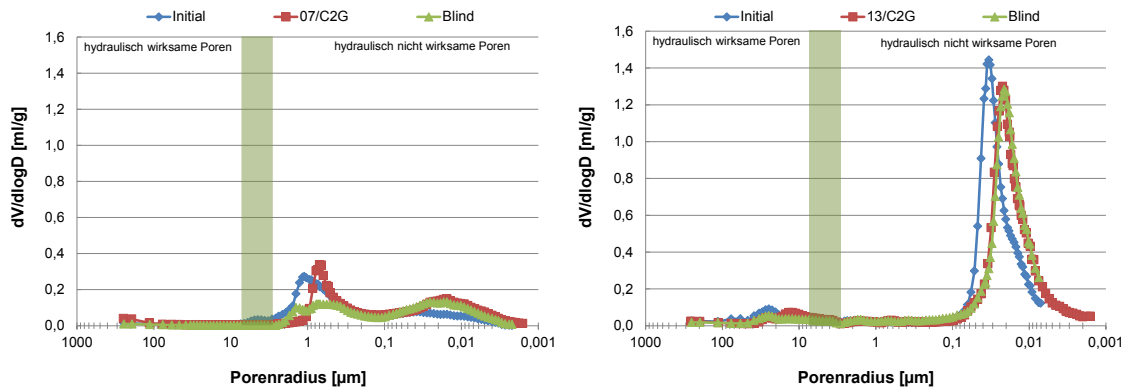


Abbildung 3-185: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs C2G

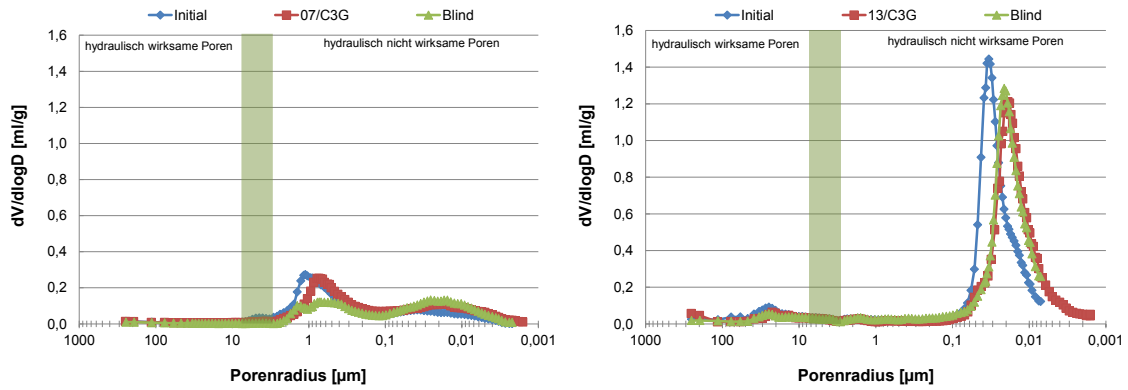


Abbildung 3-186: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs C3G

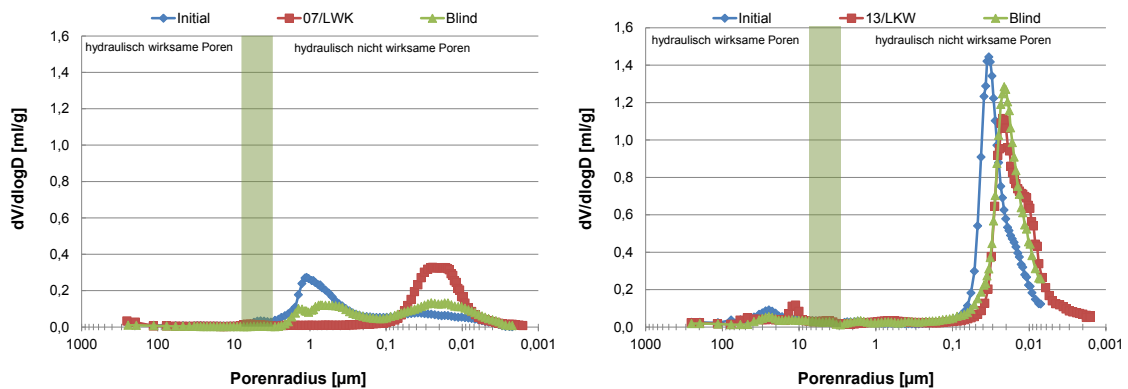


Abbildung 3-187: Porenöffnungsverteilung der Baustoffe 07 und 13 nach der Umströmung mit dem Wasser des Typs LWK

3.2.4.5.3. Zementalterung

Während des Versuchszeitraumes von ca. 1 ¼ Jahren wurde für die Materialien 01 und 07 eine Alterung des Zements beobachtet. Abbildung 3-188 zeigt den veränderten Chemismus der Gleichgewichtslösung nach Versuchsende am Beispiel von Material 07.

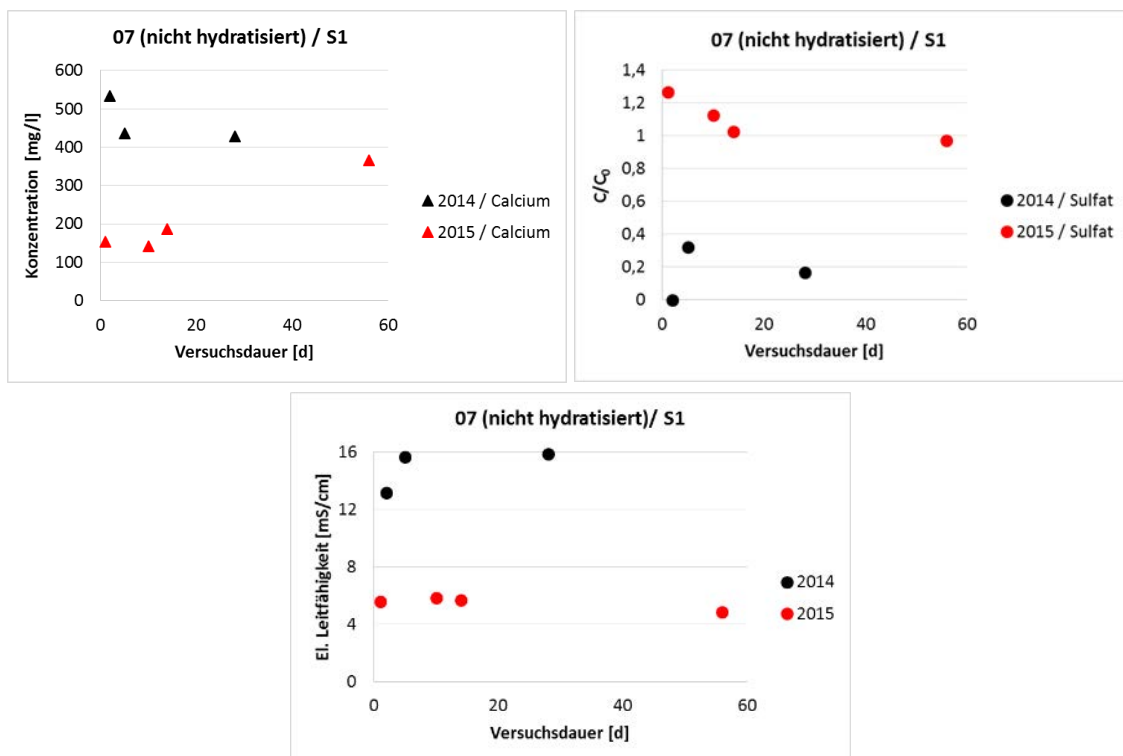


Abbildung 3-188: Zementalterung von Material 07 (nicht hydratisiert): Vergleich von Batchproben aus den Jahren 2014 und 2015

Im Vergleich zu den im ersten Versuchsjahr (Mai – Juli 2014) durchgeführten Versuchen besitzen die im zweiten Versuchsjahr (Mai – Oktober 2015) gemessenen Proben einen deutlich niedrigeren Ca^{2+} -Gehalt. Lediglich nach einer Versuchsdauer von 56 d gleicht sich der Ca^{2+} -Wert an. Die Sulfatwerte sind bei den Proben aus dem Jahr 2014 deutlich niedriger. Die Proben jüngerer Datums haben in etwa den Sulfatgehalt der Ausgangslösung. Dies weist darauf hin, dass keine Reaktionen mit Sulfat stattgefunden haben. Die wässrigen Lösungen aus 2015 zeigen zudem eine signifikant niedrigere el. Leitfähigkeit auf. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass der Hydrationsprozess nur teilweise abläuft und somit weniger Ionen in Lösung gehen, da der Zement schon während der Lagerung reagiert hat.

Nach Stark & Wicht (2013) können die während der Frühphase der Zementhydratation stattfindenden Prozesse teilweise schon durch längere oder auch unsachgemäße Lagerung eintreten. Zemente sind sehr feuchtigkeitsempfindlich und ein völliges Abschließen gegen Feuchtigkeit ist

nahezu nicht möglich. Durch die Bildung von Syngenit aus Gips oder einem anderen Calciumsulfat mit Arkanit (K_2SO_4) unter feuchten Bedingungen (Luftfeuchtigkeit) wird die spätere Verarbeitung negativ beeinflusst. Nach Angaben der Firma Heidelberg Cement ist bei folgenden Lagerungszeiten von Sackzement mit folgendem Festigkeitsverlust zu rechnen: a) nach 3 Monaten mit 10 – 20 % und b) nach 6 Monaten mit 20 – 30 % (www.betontechnische-daten.de/1-6-einfluss-der-lagerung).

Mit Projektbeginn wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit vereinbart, die Versuche mit Zementen einer Charge durchzuführen. Aufgrund der Projektdauer ist jedoch eine Alterung der Zemente unausweichlich und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse teilweise nicht gegeben.

3.2.4.5.4. Einfluss auf das Grundwasser

Die Europäische Bauproduktenrichtlinie fordert, dass alle auf dem europäischen Binnenmarkt gehandelten Bauprodukte so beschaffen sind, dass sie den Anforderungen wie z.B. Standfestigkeit und Dauerhaftigkeit entsprechen. Darüber hinaus nimmt diese Richtlinie gezielt Bezug auf den Schutz von Hygiene, Gesundheit und Umwelt (VDZ-Tätigkeitsbericht 2003-2005). Untersuchungen des Instituts für Bauforschungen zur Auslaugung (Alkali- und Chromgehalte) von Frischbeton haben ergeben, dass erhöhte Stoffkonzentrationen im Grundwasser nur in geringen Abständen zum Bauteil und nur für kurze Zeiträume auftreten. Eine dauerhafte schadhafte Veränderung des Grundwassers ist somit nicht zu erwarten (VDZ-Tätigkeitsbericht 2003-2005).

Um den Einfluss der untersuchten Zemente (nicht hydratisiert) auf das Grundwasser abschätzen zu können, sind die maximal gemessenen Konzentrationen der Alkali- und Erdalkalien, sowie Chlorid und Sulfat für die entsprechenden Reaktionslösung in Tabelle 3-33 aufgeführt.

Die Geringfügigkeitsschwellenwerte nach TrinkwV (2001) liegen für Chlorid bei 250 mg/l, für Sulfat bei 240 mg/l und für Natrium bei 200 mg/l. Diese Betrachtung ist jedoch nur für Versuche mit Leitungswasser sinnvoll, da die verwendeten Reaktionslösungen zur Ermittlung eines Sulfatangriffes bereits einen Sulfatgehalt von 1500 mg/l aufweisen. Werte, welche den Schwellenwert überschreiten, sind rot markiert. Hieraus wird ersichtlich, dass die Beeinflussung des Grundwassers in Bezug auf die kritischen Ionen nur geringfügig ist. Zudem nimmt mit zunehmendem Hydrationsfortschritt die Abgabe von Ionen ab.

Tabelle 3-33: In den Versuchslösungen S1, S2 und S3 maximal gemessene Konzentrationen [mg/l] der untersuchten Anionen und Kationen; Mg²⁺ ist nicht nachweisbar

Nicht hydratisiert	Baustoff	Ca ²⁺ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]
S1	01	627	770	580	122	2195
	07	533	790	485	110	2126
	13	121	835	490	745	485
	16	677	1385	705	66	1052
S2	01	1025	158	299	108	1451
	07	620	162	176	142	2036
	13	695	323	276	509	2036
	16	890	572	285	72	670
S3	01	1125	23	241	86	1663
	07	820	147	220	130	1747
	13	990	207	237	273	1931
	16	1004	660	245	63	1115
LW	01	925	41	248	84	725
	07	812	47	163	83	213
	13	316	194	203	319	223
	16	717	392	206	34	1,3

3.2.5. Zusammenfassung

Für Hinterfüllmaterialien von Erdwärmesonden, die über keinen ausreichenden Widerstand gegenüber Sulfationen verfügen, bedeuten sulfathaltige und saure Wässer und Böden einen Angriff auf deren Dauerhaftigkeit, der eine Schädigung der Hinterfüllung zur Folge haben kann. Dadurch kann es von Betriebsstörungen der Erdwärmesondenanlage über Veränderung der Grundwasserbedingungen und Grundwasserverunreinigungen bis hin zu massiven Bauschäden an umgebenden Gebäuden kommen. Im Projekt EWS-tech sollte unter anderem der Angriff von betonaggressiven Wässern auf die Hinterfüllmaterialien untersucht werden. Hierzu wurden vier unterschiedliche Hinterfüllmaterialien ausgewählt. Dabei handelt es sich um einen nicht thermisch verbesserten Baustoff, einen auf Quarzbasis und einen auf Grafitbasis thermisch verbesserten Baustoff. Zusätzlich wurde eine Baustellenmischung, bestehend aus Quarzsand, Aktiv Bentonit und Portlandzement CEM-I-32,5R, untersucht. Die chemische Zusammensetzung der sauren sowie der sulfathaltigen Wässer erfolgte aufgrund von Literaturstudien sowie anhand von Daten aus dem Jahresdatenkatalog Grundwasser der LUBW. Anhand der so festgelegten Rahmenbedingungen wurden die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe, Durchlässigkeits- und Systemdurchlässigkeitsversuche, Batchversuche und Umströmungsversuche durchgeführt.

Da über die gesamte Projektlaufzeit von zwei Jahren unterschiedliche Versuche durchgeführt werden sollten, stellte sich zu Beginn des Projekts die Frage, ob für jeden Versuch neues Probenmaterial verwendet werden sollte oder ob es aus einer Charge, die über die Projektlaufzeit entsprechend gelagert wird, entnommen werden soll. In einer Runde aus allen Projektpartnern

sowie den Baustoffherstellern wurde nach Abwägung der Vor- und Nachteile festgelegt, dass alle Laborversuche mit dem Material aus einer Charge durchgeführt werden sollen.

WÄRMELEITFÄHIGKEITSMESSUNG

Die zeitabhängige Wärmeleitfähigkeitsentwicklung wurde an 15 unterschiedlichen Hinterfüllmaterialien gemessen, wobei an den Baustoffen 01, 07, 13 und 16 zusätzlich eine eingehendere Untersuchung mit unterschiedlichen Wässern (Leitungswasser, destilliertem Wasser, sulfathaltigem Wasser des Typs S1-S3) erfolgte. Es zeigt sich, dass die Messwerte der Hinterfüllmaterialien 02-06, 08-12, 14 und 15 innerhalb der Messzeit weitgehend konstant bleiben. Lediglich der Baustoff 09 zeigt eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit über die Zeit. Bei den Baustoffen 02-06, die geringe Wärmeleitfähigkeiten mit Werten ≤ 1 W/mK aufweisen, handelt es sich um thermisch nicht verbesserte Hinterfüllmaterialien. Demgegenüber sind die übrigen Baustoffe thermisch verbessert. Aus dem Vergleich zwischen den Messwerten und den Herstellerangaben ergibt sich bei den Baustoffen 02, 05, 06, 08, 09 und 12 eine Diskrepanz, die auf eine Alterung des Materials zurückzuführen sein könnte. Besonders stark wurde die Abweichung bei den Baustoffen 09 und 12 festgestellt. Für den Baustoff 09 konnte die deutliche Unterschreitung der angegebenen Wärmeleitfähigkeit auch mit nicht gealtertem Material in den Realmaßstabsversuchen beobachtet werden (Tabelle 5-6), wobei hier unterschiedliche Mischtechniken zum Einsatz kamen (Kapitel 5.3 Tabelle 5-1).

Die Ergebnisse der Hinterfüllmaterialien 01, 07, 13 und 16 zeigen, dass die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Baustoffe sich je nach verwendeten Wässern unterschiedlich entwickeln. Die Wärmeleitfähigkeit des thermisch nicht verbesserten Hinterfüllbaustoffs 01 zeigt hierbei keinen zeitlichen Einfluss und liegt über die gesamte Versuchszeit unabhängig vom verwendeten Wasser bei ca. 1 W/mK. Der thermisch verbesserte Baustoff 07 hat bei der Verwendung von Leitungswasser und destilliertem Wasser konstante Wärmeleitfähigkeitswerte. Bei der Verwendung der höher konzentrierten Wässer zeigt sich unabhängig von deren Zusammensetzung bereits beim Initialwert ein etwas geringerer Wert der Wärmeleitfähigkeit, welcher über die Versuchszeit weiter abnimmt. Das ebenfalls thermisch verbesserte Hinterfüllmaterial 13 hat bei der Verwendung von destilliertem Wasser eine höhere Wärmeleitfähigkeit als wenn es mit Leitungswasser abgemischt wurde. Bei der Verwendung des Wassers des Typs S1 entsprechen die Werte etwa denen des destillierten Wassers, während sie bei der Verwendung des Wassers des Typs S3 über die Zeit etwas geringer sind. Die Wärmeleitfähigkeit der Baustellenmischung (16) ist bei allen verwendeten Wässern über die Zeit in etwa konstant. Bei der Verwendung von destilliertem Wasser und Leitungswasser liegen die Werte bei ca. 1,1 W/mK, während sie bei der Verwendung von höher mineralisierten, sulfathaltigen Wässern etwas höher liegen. Die höheren Wärmeleitfähigkeiten bei Verwendung der Wässer des Typs S1-3 lassen sich zum einen durch die höhere Kationenkonzentration gegenüber der des Leitungswassers erklären, die zu einer Verringerung der Ausdehnung der diffusen Doppelschicht während des Anmischvorgangs führt, wodurch auch der Abstand der Silicatschichten geringer wird. Zum anderen hängt die Wärmeleitfähigkeit auch

von der Aggregation der Tonteilchen ab, die vom pH-Wert und der chemischen Zusammensetzung und Konzentration der Porenlösung beeinflusst wird.

DURCHLÄSSIGKEITS- UND SYSTEMDURCHLÄSSIGKEITSVERSUCHE

Die Durchlässigkeits- und Systemdurchlässigkeitsversuche wurden an den Hinterfüllbaustoffen 01, 07, 13 und 16 gemäß DIN 18130 Teil 1 (1998) mit Leitungswasser, destilliertem Wasser sowie sulfathaltigen Wässern durchgeführt. Hierfür musste für die Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen eine geeignete Probenpräparationsvorrichtung konzipiert und gebaut sowie die Randbedingungen und der zeitliche Ablauf der Probenvorbereitung festgelegt werden. Die Durchlässigkeitsversuche haben gezeigt, dass alle untersuchten Baustoffe sehr schwach durchlässig sind. Werden die Kriterien für den Durchlässigkeitsbeiwert von $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s der LQS EWS (2012) zugrunde gelegt, entsprechen alle Baustoffe diesen Anforderungen. Nach der VDI 4640 Blatt 2 (2015) muss der Baustoff jedoch mindesten $\leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s erfüllen. Wird dieses Kriterium zugrunde gelegt, so erfüllen von den untersuchten Baustoffen lediglich die Baustoffe 07 und 13 die geforderten Werte. Die übrigen Baustoffe erfüllen diese Werte erst nach einer Versuchszeit von 50 bis 300 Tagen. Für die mit der Versuchszeit abnehmenden Durchlässigkeitsbeiwerte sind neben der andauernden Hydratation Ausfällungen von Sekundärmineralen verantwortlich. Die unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Baustoffe decken sich mit deren Porosität, die ausgehend von Baustoff 16 über 01, 07 zu 13 geringer wird. Dies korreliert mit den ermittelten Durchlässigkeiten. Die höchste Durchlässigkeit weist die Baustellenmischung (16) auf. Nach dem Ausbau der Probenkörper waren unabhängig von den verwendeten Wässern makroskopisch keine Veränderungen zu erkennen.

Zu Beginn der Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Probenherstellung einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Messwerte hat. Nach der Optimierung des Probenherstellungsverfahrens hat sich gezeigt, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte und deren Entwicklung bei den Durchlässigkeitsversuchen und den Systemdurchlässigkeitsversuchen im gleichen Bereich liegen. Die Ergebnisse der Systemdurchlässigkeitsversuche zeigen, dass mit der vorgestellten Präparationsmethode und dem entwickelten Versuchsaufbau reproduzierbare und verlässliche Durchlässigkeitsbeiwerte von Hinterfüllmaterialien in Anlehnung an die DIN 18130 T1 gemessen werden können. Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass bei der Probenherstellung äußerst sorgfältig vorgegangen werden muss. Ferner geht aus den Versuchen hervor, dass schon kleinste Risse zwischen Hinterfüllung und Sondenrohr einen erheblichen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit haben.

BATCHVERSUCHE

Ergebnisse

Im Rahmen des EWS-tech-Projektes wurden Batchversuche in Anlehnung an DIN 38 414-T4 zur Untersuchung eines möglichen Sulfatangriffes an ausgewählten Hinterfüllbaustoffen (Materialien

01, 07, 13 und 16) für Erdwärmesonden durchgeführt. Um in angemessener Zeit einen potentiellen Sulfatangriff nachweisen zu können, wurde die Probengröße verringert. Hierfür wurden gemahlene Proben (nicht hydratisiert und hydratisiert) mit den Reaktionslösungen S1-3 bzw. Leitungswasser über einen definierten Versuchszeitraum (1 – 56 d) versetzt. Nach Versuchsende wurden sowohl die Reaktionslösungen als auch der abfiltrierte Feststoff auf Veränderungen in der Zusammensetzung hin untersucht.

Untersuchung der Feststoffe:

- Die hydratisierten Proben der untersuchten Materialien 01, 07, 13 und 16 zeigten nach 56-tägiger Versuchsdauer mit dem Wasser des Typs S2 eine Neubildung von Ettringit (Nachweis mittels Röntgendiffraktometrie, XRD) und somit einen äußeren Sulfatangriff. Bei Versuchen mit Reaktionslösung S3 konnte lediglich bei den Materialien 01 und 07 eine Ettringitneubildung festgestellt werden. Wasser des Typs S1 und Leitungswasser waren unter den vorliegenden Versuchsbedingungen unkritisch. Ein potentieller Sulfatangriff ist somit deutlich von der Zusammensetzung des umgebenden Wassers abhängig (hoher Sulfatgehalt, aber auch reich an Alkalien und Erdalkalien). Versuche mit nicht hydratisierten Proben zeigten keine Ettringitneubildung. Für Material 01 konnte eine leichte Gipsbildung in allen Reaktionslösungen und Leitungswasser nach 56-tägiger Versuchsdauer festgestellt werden.
- Mittels REM-EDX konnten keine Aussagen hinsichtlich eines Sulfatangriffes getroffen werden, da die Zuordnung einzelner Mineralphasen sehr schwierig war. Morphologische Veränderungen der Kornoberflächen wurden auf die mechanische Belastung während des Schüttelvorgangs zurückgeführt.

Untersuchung der Reaktionslösung

- Nach Zugabe der Reaktionslösung zum Feststoff laufen unter den experimentellen Bedingungen komplexe Prozesse ab, die simultan stattfinden können. Die ablaufenden Reaktionsmechanismen sind nicht eindeutig einzelnen Reaktionen zuzuordnen. Ein Sulfatangriff über die Wasserchemie ist deshalb nicht feststellbar, da in der Reaktionslösung überwiegend der Hydratationsprozess der entsprechenden Zementphasen erkennbar ist.
- Alle Versuche zeigen, dass unabhängig von Material und Reaktionslösung, Na^+ -, K^+ -, Ca^{2+} und Cl^- -Ionen in Lösung gehen, wobei Ca^{2+} -Ionen verstärkt bei den nicht hydratisierten Proben gelöst werden. Die Verläufe der Anionen- und Kationenkonzentrationen aus beiden Versuchsreihen (hydratisiert und nicht hydratisiert) sind sehr ähnlich bzw. ergänzen sich. Die Lösung von Ionen sind typische Hinweise für Hydratationsprozesse im Zement. Basische Verbindungen wie NaOH und KOH bewirken einen sofortigen Anstieg des pH-Wertes in der Lösung auf pH 10 bis pH 12,5. Während der gesamten Versuchsdauer erfolgte eine weitere Verschiebung des pH-Wertes zu basischeren Werten. Ebenso ist ein deutlicher Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit in allen Batchlösungen zu beobachten. Abnehmende Sulfatkonzentrationen in den Batchlösungen können sowohl auf Fällungsprozesse (Ausfällung von Gips bei Überschreiten des Löslichkeitsproduktes) als

auch auf die Neubildung von Sulfatmineralen zurückzuführen sein. Mg^{2+} -Ionen sind bis auf sehr wenige Ausnahmen nach Versuchsende nicht mehr in der Lösung nachweisbar. Vermutlich wird Mg^{2+} aufgrund seiner geringen Löslichkeit als Hydroxid (Brucit) gefällt.

- Im Fall von Material 13 wurden mit zunehmender Versuchsdauer auffallend negative Redox-Werte gemessen (bis ca. -380 mV (NHE), entspricht -590 mV (Ag/AgCl)). Die Proben entwickeln unter diesen Bedingungen einen ausgeprägten H_2S -Geruch. Sinkende Sulfatkonzentrationen mit fortschreitender Versuchsdauer könnten somit auch ein Hinweis auf die Fällung von geringlöslichen Sulfiden sein.

Bewertung

Methodik

Ein generelles Problem besteht im Nachweis der Sulfatbeständigkeit in angemessener Zeit. In der Literatur werden Auslagerungstests von Probekörpern über mehrere Monate oder Jahre beschrieben (Van Tittelboom et al. 2013). Für die Durchführung sogenannter „beschleunigter Tests“ wird z.B. die Sulfatkonzentration des angreifenden Mediums erhöht, kleinere Probekörper eingesetzt, der Wasser-Zement-Wert verändert oder die Reaktionstemperatur erhöht. In der vorliegenden Arbeit wurde mit gemahlten Proben und einem Feststoff/Lösungsverhältnis von 1:10 gearbeitet. Die Versuche wurden im Labor aus technischen Gründen bei Raumtemperatur (20 – 22 °C) durchgeführt und weichen somit von Feldbedingungen ab, da die durchschnittliche Bodentemperatur in Deutschland bei etwa 9 °C liegt (Van Tittelboom et al. 2013). Der Reaktionsmechanismus ändert sich bei Temperaturen unterhalb von 15 °C deutlich. Unter diesen Bedingungen entsteht z. B. bevorzugt Thaumasit, welcher im Gegensatz zu Ettringit oder Gips nicht zu einer Dehnungs- und Rissbildung im Verfüllbaustoff führt, sondern zu dessen Festigkeitsverlust. So können Baustoffe bei Raumtemperatur stabil sein, aber bei niedrigeren Temperaturen jedoch innerhalb weniger Wochen oder Monate versagen (Müllauer 2013). Hier stellt sich die Frage, inwiefern die beschleunigten Tests auf Feldbedingungen übertragbar sind. Sie dienen jedoch zur Einschätzung von Materialien in Bezug auf einen potentiellen Sulfatangriff.

Umweltverträglichkeit

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen zeigen, dass in Bezug zur Abgabe von Ionen nur eine geringfügige Beeinflussung des umgebenden Grundwassers zu erwarten ist (Versuche mit Leitungswasser). Eine dauerhafte schadhafte Veränderung des Grundwassers ist somit nicht zu erwarten. Bei einem Einbau von Hinterfüllbaustoffen in aggressiven Wässern ist eine langfristige Beobachtung sinnvoll.

Fazit

- Ein Sulfatangriff von Hinterfüllbaustoffen ist bei ungünstiger chemischer Zusammensetzung der umgebenden Wässer möglich (hoher Sulfatgehalt, reich an Alkalien und Erdalkalien). Insbesondere bei bestehenden Undichtigkeiten im Ringraum einer Erdwärmesonde kann sich Sulfat im Wasser aufkonzentrieren und dort zu einem äußeren Sulfatangriff führen (Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde 2015)

- Die Prüfung und Überwachung des Langzeitverhaltens von Hinterfüllmassen, welche in sulfathaltigen Grundwässern eingebaut sind wird empfohlen

Der chemische Widerstand und die Empfindlichkeit von Hinterfüllmaterialien zur Ringraumabdichtung gegenüber Umwelteinflüssen, wie z.B. dem chemischen Angriff saurer Grundwässer, hängen einerseits von der Art und der Intensität des Säureangriffs, andererseits auch von den Eigenschaften der Verfüllbaustoffe ab. Die Hinterfüllmaterialien sollten in erster Linie eine geringe Durchlässigkeit aufweisen, so dass betonangreifende Bestandteile nur geringfügig in den Zementstein eindringen können. Eine sehr dichte Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung und kleine Porengrößen im Hinterfüllbaustoff sind hierfür entscheidend. Dadurch wird die Verdichtung des Hinterfüllbaustoffs verbessert und gleichzeitig die Durchlässigkeit für angreifende Wässer herabgesetzt.

UMSTRÖMUNGSVERSUCHE

Um den Angriff betonaggressiver Wässer auf Hinterfüllmaterialien zu untersuchen, wurde auf Grundlager einer Literaturrecherche zu Auslagerungsversuchen und unter Einbeziehung geologischer und hydrogeologischer Fragestellungen eine Versuchseinrichtung entwickelt, die die in-situ Bedingungen einer hinterfüllten Erdwärmesonde abbildet. Mitentscheidend war hierbei die Umströmungsart im Versuch, da die Wechselwirkungsprozesse zwischen Grundwasser und Hinterfüllung im stagnierenden Grundwasser, wie es z. B. in geringdurchlässigen Grundwasserleitern der Fall sein kann, aufgrund der Kontaktzeit und der Ionenstärke anders verlaufen als in fließendem Grundwasser. Die Versuchszeit betrug 107 Tage. Dabei wurden 3 Wässer mit unterschiedlichem Chemismus kontinuierlich und im geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Zusätzlich wurden Versuche mit Leitungswasser als Referenzlösung durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse haben gezeigt, dass die Versuchseinrichtung und -durchführung praxisrelevante Daten liefert.

Sulfatangriff

In den Umströmungsversuchen zum Sulfatangriff wurden die Hinterfüllmaterialien 01, 07, 13 sowie die Baustellenmischung 16 untersucht. Schon die optische Begutachtung der Proben ergab, dass die Baustellenmischung von sulfathaltigen Wässern stark angegriffen wird und durch die Bildung von Schadmineralen sehr stark beeinträchtigt wird, so dass dieser Baustoff in Gegenwart von höheren Sulfatkonzentrationen für den Einsatz als Hinterfüllung für Erdwärmesonden als ungeeignet einzustufen ist. Bei den Industrieprodukten konnte hingegen makroskopisch kein negativer Effekt des Sulfatangriffs während der Versuchszeit von 107 Tagen festgestellt werden. Auffallend waren aber Ausfällungen, die vor allem bei den Wässern, die Erdalkalitionen enthielten, auftraten. In den Reaktionslösungen wurde ein deutlicher pH-Wertanstieg in Abhängigkeit von der Umströmungsart und den Hinterfüllbaustoffen festgestellt. Die Entwicklung der Erdalkalitionen innerhalb der umströmten Wässer ist dabei an den pH-Wert gekoppelt, da diese bei hohen pH-Werten als Brucit und Portlandit ausfallen. Die Natrium- und Kaliumkonzentrationen in den Reaktionslösungen sind aufgrund der Alkalisulfate, die zu Beginn der Hydratation im zementhaltigen

Baustoff in Lösung gehen, zu Versuchsbeginn erhöht. Im Versuchsverlauf nehmen die Konzentrationen aufgrund der länger werdenden Diffusionswege jedoch stetig ab. Die Chlorid und Sulfatkonzentrationen liegen bei den meisten Versuchen bei $C/C_0 \pm 1$. Es konnte jedoch z. B. beim Baustoff 01 die Bildung von Syngenit in der Reaktionsfront der Probenkörper beobachtet werden, die dann zu geringeren Sulfatkonzentrationen in den umströmten Wässern führte. Die Beurteilung der Sulfatbeständigkeit anhand der relativen Längenänderung und relativen Gewichtsveränderung ist bei den hier durchgeführten Versuchsbedingungen nicht aussagekräftig, da eine Trennung der treibenden Dehnung und der beobachteten Ausfällungen an der Probenoberfläche nicht möglich ist und somit zu Fehlinterpretationen führt. Die Druckfestigkeits- und Biegezugfestigkeitsuntersuchungen sowie der Nadelpenetrometerwiderstand zeigen jedoch, dass die Industrieprodukte 01, 07 und 13 bei einer Versuchslaufzeit von 107 Tagen die geforderten Kriterien erfüllen, während die Baustellenmischung zu geringe relative Druck- und Biegezugfestigkeiten aufweist. Allgemein gilt es für die Bewertung der Sulfatbeständigkeit mittels Festigkeitsuntersuchungen jedoch die Laufzeit der Versuche zu berücksichtigen. In den vorliegenden Versuchen hat sich gezeigt, dass die Reaktionsfront aufgrund des langsam stattfindenden diffusiven Stofftransports, trotz einer Versuchszeit von 107 Tage, nur einige Millimeter in den Probekörper migriert ist. Dadurch ist noch ein relativ großer, unveränderter Kern der Probe vorhanden, der die Festigkeitseigenschaften der Probe stark beeinflusst. Da die Porenöffnungsweite mit einem entscheidenden Einfluss auf die Sulfatbeständigkeit hat, wurde von den umströmten Proben sowie von Blind- und Initialproben das Porenspektrum quecksilberporosimetrisch aufgenommen. Aus dem Vergleich von Blind- und Initialproben mit den behandelten Proben zeigt sich außer beim Hinterfüllmaterial 16 bezüglich eines Sulfatangriffs keine nennenswerten Veränderungen, es gab jedoch Anzeichen für die fortschreitende Hydratation, die nach 28 Tagen Vorlagerungszeit noch nicht abgeschlossen war. Beim Baustoff 16 konnte jedoch eine Porositätszunahme bedingt durch die sulfathaltigen Wässer beobachtet werden.

Die Umströmungsversuche zur Sulfatbeständigkeit haben gezeigt, dass die industriell gefertigten Produkte 01, 07 und 13 bei einer Laufzeit von 107 Tagen und einer Sulfatkonzentration von 1.500 mg/l keine Schädigung zeigen. Die Baustellenmischung hingegen hat schon innerhalb der Versuchszeit deutliche Anzeichen einer Schädigung gezeigt.

Säureangriff

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die zwei zementhaltigen Hinterfüllbaustoffe 07 und 13 hinsichtlich ihres Säurewiderstandes untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Säureangriff das Hinterfüllmaterial 13 geringer beeinflusst hat als das Hinterfüllmaterial 07. Bei der Messung der Ionenkonzentrationen in den Wässern hat sich gezeigt, dass die Ionenauslaugung des Hinterfüllmaterials 07 stärker als bei dem Hinterfüllmaterial 13 war. In Zusammenhang mit der Ionenauslaugung steht die Entwicklung der physikochemischen Parameter der Wässer. Hier haben sich in den Wässern beim Hinterfüllmaterial 07 sowohl höhere pH-Werte, als auch höhere elektrische Leitfähigkeiten nachweisen lassen. Ein weiterer Faktor, der den Säureangriff bei dem Hinterfüllbaustoff 07 verstärkt hat, waren die größeren Porendurchmesser, die den Stofftransport begünstigen. Auslaugungs- und Reaktionszonen waren beim Baustoff 13 anders als beim Baustoff 07

makroskopisch nicht erkennbar. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die kleineren Porendurchmesser, die eine geringere Ionenauslaugung mit sich bringt, sich positiv auf die Festigkeit des Hinterfüllmaterials 13 ausgewirkt hat. Bei der Druck- und Biegezugfestigkeit war hier bei den Probekörpern, die von Leitungswasser oder den sauren Wässern umströmt wurden, kein Unterschied feststellbar. Beim Hinterfüllmaterial 07 hingegen war ein deutlicher Festigkeitsunterschied zu bemerken, wobei gegenüber dem Hinterfüllmaterial 13 generell geringere Festigkeiten festgestellt wurden. Analog dazu verhalten sich die gemessenen Nadeleindringwiderstände (NPR) der Probekörper. Der NPR des Hinterfüllmaterials 13 ist für Leitungswasser oder saurem Wasser nahezu identisch, während bei dem Hinterfüllmaterial 07 der von Leitungswasser umströmte Körper einen höheren Messwert aufwies. Beim Hinterfüllbaustoff 07 war auch ein deutlicher Verfall der Prüfkörper zu erkennen, da hier zum Teil die Oberflächen stark abgeplatzt und Ecken abgebrochen waren. Diese Erscheinungen waren beim Hinterfüllbaustoff 13 bei keinem der sechs Probekörper zu bemerken.

Als weiteres wichtiges Ergebnis der Untersuchung wurde festgestellt, dass das Hinterfüllmaterial 07 aufgrund von alterungsbedingter Lagerung signifikant an Festigkeit verloren hatte. Dies hatte sich bereits bei der Herstellung der Probekörper angedeutet, aber erst bei den Festigkeitsuntersuchungen und im Vergleich mit Daten aus den Sulfatangriffsversuchen bestätigt. Damit hat sich gezeigt, dass die Hinterfüllbaustoffe durch zu lange Lagerung wichtige Eigenschaften verlieren und dadurch nicht mehr zur Ringraumverfüllung verwendet werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurde der chemische Angriff betonaggressiver Grundwässer auf zementhaltige Hinterfüllmaterialien untersucht. Die Dauerhaftigkeit und Durchlässigkeit von Hinterfüllbaustoffen, die bei der Ringraumverfüllung von Erdwärmesonden verwendet werden, können sowohl äußeren als auch inneren Einflüssen unterliegen. Zu den äußeren Einflüssen zählen neben dem chemischen Angriff betonaggressiver Grundwässer zum Beispiel auch die Umgebungsbedingungen, wie Feuchtigkeit und Temperatur, sowie der mechanische und biologische Angriff. Da die Intensität und die ablaufenden Prozesse des Angriffs temperaturabhängig sind, wären Untersuchungen mit angepassten, realen Temperaturbedingungen sinnvoll (Verein Deutscher Zementwerke, 2002). Um die Umgebungsbedingungen des Hinterfüllmaterials bei solchen Untersuchungen möglichst realitätsnah zu gestalten, sollte angedacht werden, die Probekörper zum Beispiel mit Sand zu umgeben. Weiterhin ist mit einer Verstärkung des Angriffs bei mechanischem Abrieb und Erosion durch schnelle Strömungsverhältnisse und mitgeführten Fremdstoffen zu rechnen. Auch der Einfluss dieser Effekte könnte mit einem angepassten Versuchsaufbau in weiteren Untersuchungen ermittelt werden.

4. TECHNIKUMSVERSUCHE (SOLITES)

4.1. Untersuchungsziele

Bei den, von Solites durchgeführten Technikumsversuchen handelt es sich um Verfüllversuche in 6 m hohen transparenten Kunststoffrohren, die einen Teil eines Bohrlochs simulieren sollen. Ziel der Technikumsversuche ist, das Wissen zum Ablauf des Verfüllvorgangs und der Entstehung von Fehlstellen und Strukturen im Ringraum von Erdwärmesonden, die negativen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit haben können, zu erweitern. Mit insgesamt 36 Verfüllversuchen soll der Einfluss zahlreicher Faktoren wie zum Beispiel der Art des Baustoffs, der Art der Anmischbedingung, der Verfüllgeschwindigkeit etc. untersucht werden.

4.2. Erstellung der Technikumsversuchsanlage

Vor der Durchführung der eigentlichen Technikumsversuche wurde eine detaillierte Marktrecherche bezüglich geeigneter transparenter Kunststoffrohre durchgeführt. Aufgrund optischer, mechanischer, und preislicher Eigenschaften kamen hierfür folgende Materialien in Frage:

- Polymethylmethacrylat-Rohre (im Folgenden PMMA-Rohre genannt; diese werden auch unter dem Namen Plexiglas®, Acrylglas u.a. angeboten)
- Polycarbonat-Rohre (PC-Rohre)
- Polyvinylchlorid-Rohre (PVC-Rohre).

In Zusammenarbeit mit der Firma Gertec Maschinen- und Anlagenbau GmbH und der Firma HDG Umwelttechnik GmbH wurden an den drei in Frage kommenden Arten von transparenten Kunststoffrohren Vorversuche zur Beurteilung der optischen Eigenschaften durchgeführt (siehe Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Verfüllvorgang des PVC-Rohrs während der Vorversuche (linkes Rohr im linken Bild) und Ansicht der drei in den Vorversuchen verfüllten PMMA-, PVC- und PC-Rohre (von links nach rechts im rechten Bild)

Auf Basis der Vorversuche wurde entschieden, die Technikumsversuche mit 6 m langen transparenten Rohren aus dem Material PMMA der Dimension 160 x 5 mm durchzuführen. Im Vergleich mit den anderen Materialien waren im Wesentlichen die etwas besseren optischen Eigenschaften als auch die sehr gute Recyclingfähigkeit von PMMA dafür ausschlaggebend. Trotz der besseren mechanischen Eigenschaften von PC wurde von einer Verwendung dieses Materials aufgrund dessen kontrovers diskutierter Umwelteigenschaften (PC wird aus Phosgen hergestellt und setzt die hormonell wirksame Substanz Bisphenol A frei) abgesehen. Auch im Hinblick auf die durchzuführenden Analysen und die Schadstofffreisetzung beim Zersägen der Versuchsstücke bergen PVC als auch PC mögliche gesundheitliche Gefahren.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung des Einflusses einer rauen Bohrlochwand gegenüber der bei der Verfüllung in Kunststoffrohren üblichen glatten Bohrlochwand auf die Verfüllqualität vorgesehen. Da innerhalb des Projektkonsortiums keine Erfahrungen hinsichtlich der Innenbesandung von Rohren vorlag, wurde die Abteilung „Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien“ des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) hierfür beratend eingebunden. Am ZAE Bayern liegen bereits umfangreiche

Erfahrungen zur Innenbesandung von Rohren für die Durchführung von Systemdurchlässigkeitsversuchen an Erdwärmesonden vor (Reuß und Kuckelkorn 2011). Um die Eignung von transparenten Kunststoffrohren für eine Besandung zu untersuchen, wurden Besandungsversuche an ca. 30 bis 40 cm langen Rohrstücken mit jeweils drei verschiedenen Klebern durchgeführt (siehe Abbildung 4-2). Es hat sich gezeigt, dass für die Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Bohrlochwandrauigkeit auf die Fehlstellenbildung ein 2-Komponenten-Kleber (Epoxydharz und Härter) in Kombination mit Quarzsand der Körnung 0,1 – 0,5 mm am besten geeignet ist.



Abbildung 4-2: Bilder der Besandungsversuche

Aufbauend auf den bei der Firma Gertec Maschinen- und Anlagenbau GmbH durchgeführten Vorversuchen wurde eine 6 m hohe Versuchsanlage zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden in der Versuchshalle der Projektpartner vom Institut für Angewandte Geowissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie geplant und realisiert. Die Versuchsanlage erlaubt den Einbau von vier Erdwärmesonden in einer Versuchsreihe. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

Bei der Versuchsdurchführung werden die Verfüllbaustoffe in handelsüblichen Misch- und Verfüllanlagen angemischt und mit Hilfe eines Verfüllrohrs im Kontraktorverfahren in die „Bohrlöcher“ gepumpt. Beim Kontraktorverfahren wird das Bohrloch durch ein beim Einbau der Sondenrohre knapp oberhalb des Sondenfußes angebrachtes Verfüllrohr von unten nach oben verfüllt. Das bei der Mehrzahl der Versuche in den „Bohrlöchern“ vorhandene Wasser wird dadurch verdrängt und gelangt über Ablaufschläuche in einen Überlaufbehälter. Während eines Verfüllvorgangs werden die für dessen Charakterisierung relevanten Daten (Verfüllsuspensionsdichte, Verfüllvolumenstrom, Verfülldruck und Temperatur der Verfüllsuspension) kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Hierzu werden ein Coriolis-Messgerät und ein Drucksensor verwendet, die zwischen der Misch- und Verfüllanlage und dem „Bohrloch“ in die Verfüllleitung eingebaut sind. Aufgrund der

starken Sensitivität des Coriolis-Messgeräts hinsichtlich möglicher in der Verfülleitung befindlicher Luftpneinschlüsse, wurde zur Entlüftung der Verfülleitung ein Zirkulationssystem eingebaut. Dieses besteht aus einem zusätzlichem Druckschlauch, mit dem die Verfüllsuspension vor dem eigentlichen Verfüllvorgang bis zum Umlegen eines 3-Wege-Kugelhahns zurück in den Vorratsbehälter der Misch- und Verfüllanlage gepumpt werden kann (siehe Abbildung 4-3). Bei den Versuchen, die mit dem Durchlaufmischer durchgeführt wurden konnte keine Zirkulation zur Entlüftung durchgeführt werden, da diese Mischer keinen Vorratsbehälter besitzen. Eine detaillierte Beschreibung der Anmischbedingung folgt in Kapitel 4.4. Abbildung 4-4 zeigt die in der Versuchshalle des Projektpartners vom Institut für Angewandte Geowissenschaften am KIT fertiggestellte Versuchsanlage.

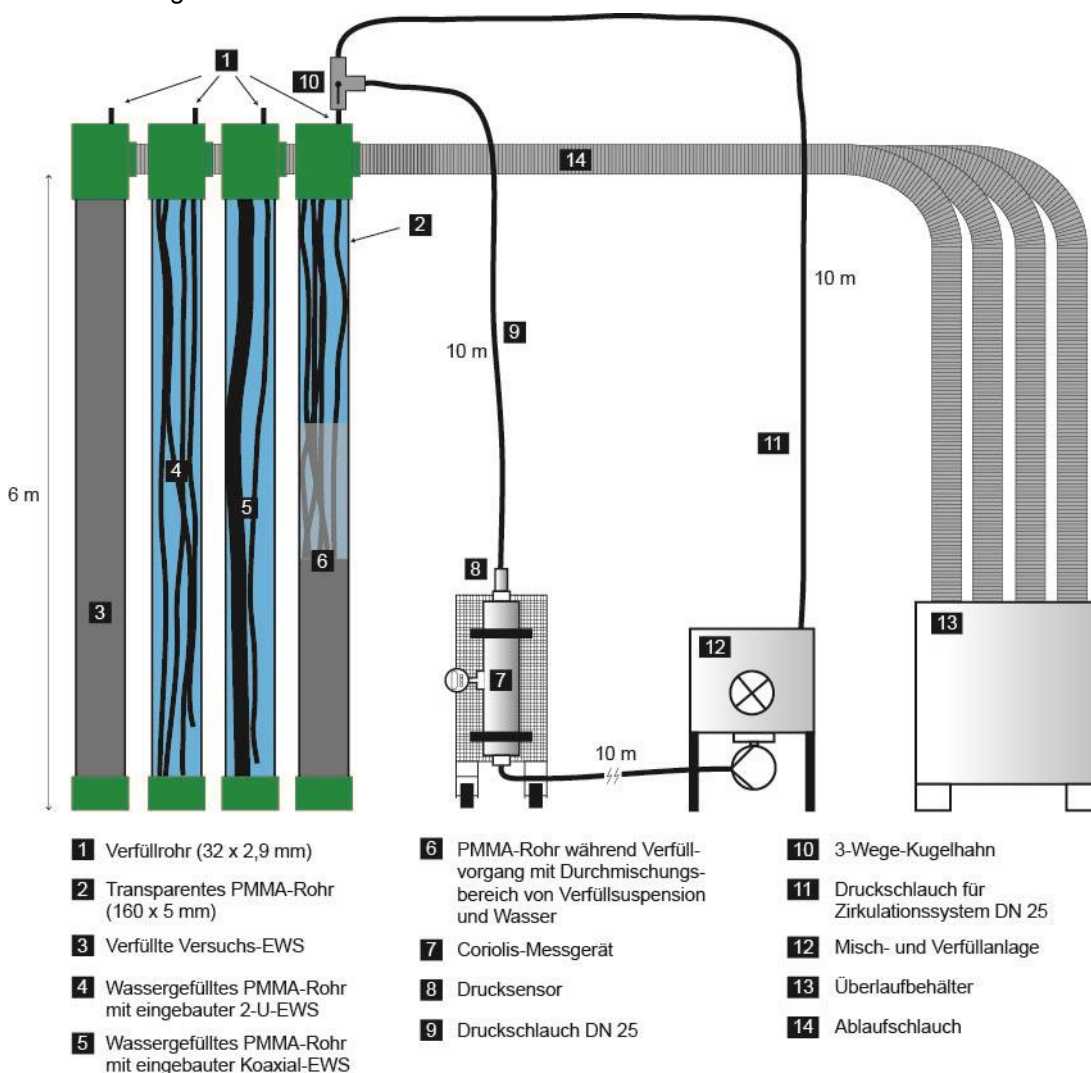


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Neben einer messtechnischen Dokumentation der Verfüllvorgänge aller Erdwärmesonden erfolgt zusätzlich eine Videobeobachtung. Hierzu wurde eine 6 m hohe Linearführung aufgebaut, mit

deren Hilfe eine kleine, leichte Videokamera bei den Verfüllvorgängen entsprechend des ansteigenden Suspensionsspiegels im PMMA-Rohr so verfahren werden kann, dass eine qualitativ hochwertige Videoaufzeichnung der Verfüllvorgänge entsteht. Die aufgezeichneten Videos eignen sich neben der visuellen Dokumentation der Strömungsvorgänge bei der EWS-Verfüllung auch sehr gut zur Veranschaulichung des Versuchsablaufs und der auftretenden Effekte bei Präsentationen. Um die Entstehung möglicher Verfüllqualitätsmängel nach Verfüllende dokumentieren zu können, wurde eine Vorrichtung für eine Kameradokumentation konzipiert, mit der eine Langzeitdokumentation der verfüllten „Bohrlöcher“ möglich war. Mit dieser Vorrichtung wurden bei Versuchsreihe 5, 7 und 8 ab ca. 3-5 Stunden nach Verfüllende die darauffolgenden 10-24 Stunden fotografisch in zeitlich definierten Abständen festgehalten. Nach Auswertung der ersten Langzeitdokumentation hat sich gezeigt, dass eine 24-stündige Dokumentation keinen erheblichen Mehrwert gegenüber einer 10-stündigen Dokumentation ergibt, sodass die Dauer der Langzeitdokumentation daraufhin angepasst wurde. Eine exemplarische Langzeitdokumentation von EWS 8-3 für die Zeit zwischen 5 – 10 Stunden nach Verfüllende ist in Anhang 7 dargestellt.

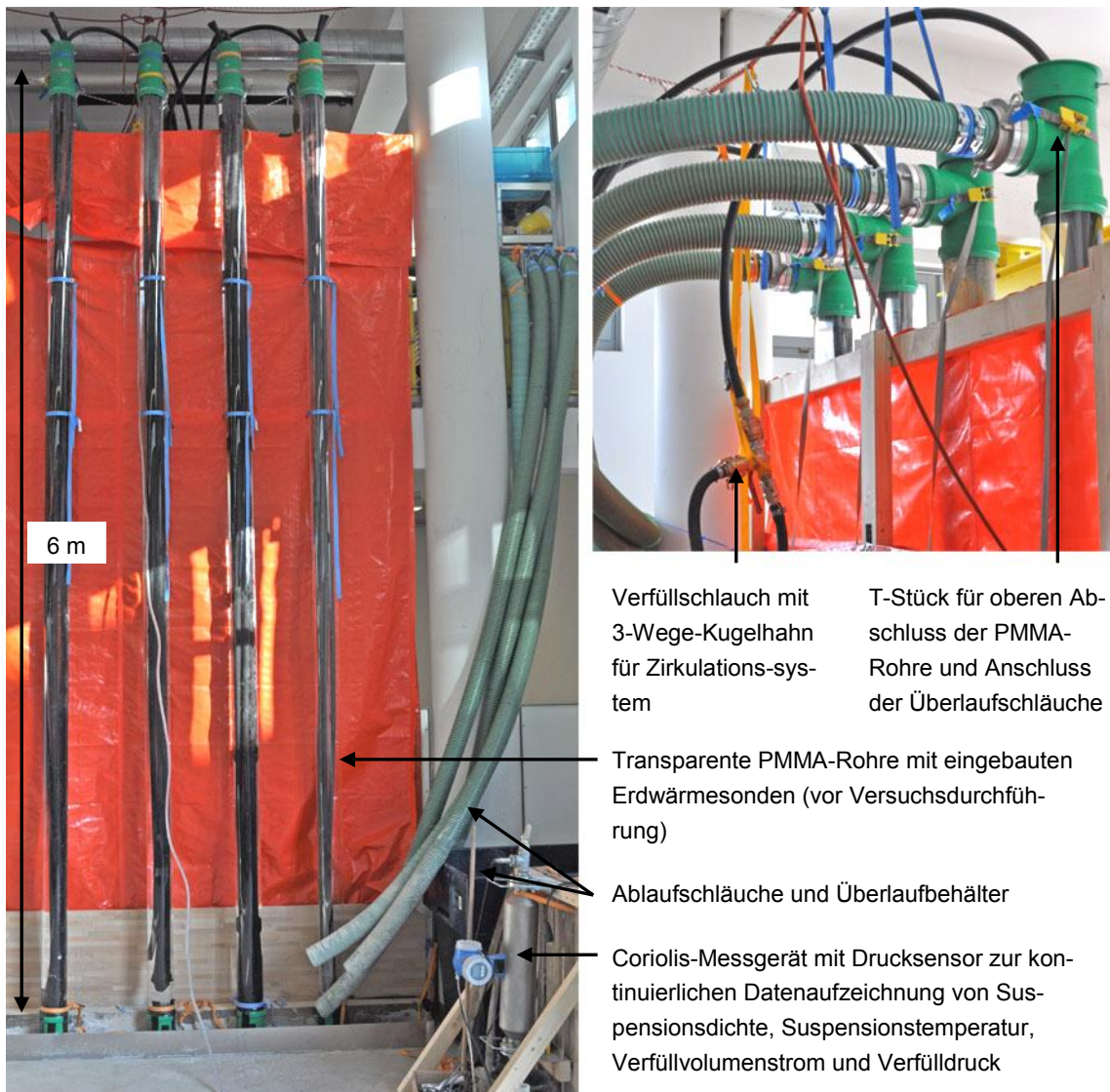


Abbildung 4-4: Ansicht der fertiggestellten Technikumsversuchsanlage

4.3. Übersicht der durchgeführten Versuche

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 36 Technikumsversuche in neun Versuchsreihen mit je vier Versuchen durchgeführt. Die Standard-Versuchsbedingungen sind in Tabelle 4-1 erläutert.

Tabelle 4-1: Standard-Versuchsbedingungen der Technikumsversuche

PMMA-Rohr: - 160 x 5 mm - wassergefüllt - innen nicht besandet
EWS: - 2-U-EWS der Maße (32 x 2,9 mm) aus PE 100 - keine Abstandshalter / Zentrierhilfen
Anmischbedingung: - Chargen-/ Kolloidalmischer - W/F- Verhältnis nach Herstellerangabe - Nachmischzeit nach Herstellerangabe
Verfüllvorgang: - Kontraktorverfahren - Verfüllvolumenstrom ca. 40 l/min - Im Bohrloch verbleibendes Verfüllrohr (32 x 2,9 mm)

Ausgehend von den Standard-Versuchsbedingungen wurden bei den 36 Technikumsversuchen die Einflüsse folgender Faktoren auf die Verfüllqualität untersucht:

- 7 unterschiedliche Verfüllbaustoffe + 3 Modifikationen des Originalproduktes
- Variation der Misch- und Verfülltechnik (Kolloidalmischer, Durchlaufmischer) (Erläuterung siehe Abschnitt 4.4)
- Für Kolloidalmischer Variation der vom Hersteller angegebenen Nachmischzeit (längere Nachmischzeit, kürzere Nachmischzeit) (Erläuterung siehe Abschnitt 4.4)
- Variation des EWS-Typs (2-U-EWS aus PE 100, 2-U-EWS aus PE-Xa, Koaxial-EWS mit glattem Außenrohr, Koaxial-EWS mit gewelltem Außenrohr)
- Variation des vom Hersteller angegebenen W/F-Verhältnisses (Erhöhung)
- Unterschiedliche Verfüllgeschwindigkeiten (schnell (~60 l/min), mittel (~40 l/min), langsam (~20 l/min))
- Variation der Rauigkeit der Plexiglasrohre (besandet, nicht besandet)
- Variation des Sondenverlaufs im Plexiglasrohr (Zentrierungen im Abstand von 1 m, Beabstandung zum Plexiglasrohr mit Gummidichtringen im Abstand von 50 cm an jedem Sondenrohr und am Verpressrohr)
- Nicht wassergefülltes Bohrloch (mit eingebauter Sonde und ohne eingebauter Sonde)

Mit Ausnahme des Versuchs EWS 2-1, bei dem es zu einer Undichtigkeit am unteren Ende des Versuchsaufbaus kam, können alle durchgeführten Versuche uneingeschränkt zur Auswertung und Korrelation mit weiteren Versuchsergebnissen aus den Labor- und Realmaßstabsversuchen herangezogen werden.

Eine Übersicht der durchgeführten Technikumsversuche ist in Tabelle 4-2 dargestellt. In der ersten Spalte der Tabelle ist die Versuchsbezeichnung aufgeführt. Die erste Ziffer bezeichnet dabei

die jeweilige Versuchsreihe (zwischen 1 und 9), die zweite Ziffer die in dieser Versuchsreihe verfüllte Versuchs-EWS (zwischen 1 und 4). Beispielsweise ist EWS 2-4 die vierte Versuchs-EWS der zweiten Versuchsreihe. In der zweiten Spalte ist die Baustoffnummer nach der in Kapitel 2.3 erläuterten Bezeichnungssystematik angegeben. Die in der Tabelle orange geschriebenen Eigenschaften beschreiben die Variationen gegenüber den oben beschriebenen Standard-Versuchsbedingungen.

Tabelle 4-2: Übersicht der durchgeführten Technikumsversuche (orange: Variation gegenüber der Standard-Versuchsbedingung)

	Verfüll- baustoff	Nachmischzeit	W/F-Verhältnis	Verfüllge- schwindigkeit	Weitere Variationen in den Versuchsrandbedingungen
EWS 1-1	8	90 s	nach Datenblatt	ca. 45 l/min	
EWS 1-2	8	90 s	nach Datenblatt	ca. 45 l/min	besandetes "Bohrloch"
EWS 1-3	8	90 s	nach Datenblatt	67 l/min	
EWS 1-4	8	90 s	nach Datenblatt	ca. 26 l/min	
EWS 2-1	8	90 s	nach Datenblatt	ca. 41 l/min	
EWS 2-2	8	90 s	nach Datenblatt	41 l/min	
EWS 2-3	8	90 s	nach Datenblatt	41 l/min	besandetes "Bohrloch"
EWS 2-4	8	90 s	nach Datenblatt	40 l/min	besandetes "Bohrloch"
EWS 3-1	2	120 s	nach Datenblatt	44 l/min	
EWS 3-2	2	120 s	110%	44 l/min	
EWS 3-3	2	keine	Dichte nach Datenblatt	ca. 35 l/min	Durchlaufmischer
EWS 3-4	2	keine	ca. 155%	ca. 35 l/min	Durchlaufmischer, max. Wasserzugabe
EWS 4-1	8	120 s	nach Datenblatt	39 l/min	Gummiringe an SR (Abstand: 0,5 m) & lange Nachmischzeit
EWS 4-2	8	90 s	nach Datenblatt	ca. 41 l/min	Zentrierhilfen (Abstand: 1,0 m)
EWS 4-3	2*	90 s	nach Datenblatt	41 l/min	
EWS 4-4	2*	120 s	nach Datenblatt	41 l/min	
EWS 5-1	8	60 s	nach Datenblatt	40 l/min	Koaxial-EWS (glatt) & kurze Nachmischzeit
EWS 5-2	8	90 s	nach Datenblatt	41 l/min	trockenes "Bohrloch"
EWS 5-3	3	60 s	nach Datenblatt	ca. 39 l/min	
EWS 5-4	3	keine	Dichte nach Datenblatt	ca. 35 l/min	Durchlaufmischer
EWS 6-1	7	120 s	nach Datenblatt	42 l/min	
EWS 6-2	7*	120 s	nach Datenblatt	42 l/min	
EWS 6-3	13	60 s	nach Datenblatt	41 l/min	
EWS 6-4	13	240 s	nach Datenblatt	42 l/min	
EWS 7-1	13	5 s	nach Datenblatt	43 l/min	
EWS 7-2	13*	90 s	nach Datenblatt	41 l/min	
EWS 7-3	13*	90 s	nach Datenblatt	ca. 26 l/min	
EWS 7-4	13*	90 s	nach Datenblatt	ca. 65 l/min	
EWS 8-1	15	90 s	nach Datenblatt	43 l/min	
EWS 8-2	15	90 s	nach Datenblatt	43 l/min	2-U-EWS aus PE-Xa
EWS 8-3	15	90 s	nach Datenblatt	43 l/min	Koaxial-EWS (gewellt, Ø:63mm)
EWS 8-4	15	91 s	nach Datenblatt	43 l/min	Koaxial-EWS (glatt, Ø:63mm)
EWS 9-1	9	40 s	nach Datenblatt	41 l/min	
EWS 9-2	9	40 s	nach Datenblatt	41 l/min	2-U-EWS aus PE-Xa
EWS 9-3	9	40 s	nach Datenblatt	40 l/min	ohne EWS
EWS 9-4	9	40 s	nach Datenblatt	42 l/min	ohne EWS, trockenes "Bohrloch"

*: gegenüber dem entsprechenden Originalprodukt durch den Hersteller modifizierter Verfüllbaustoff

4.4. Exemplarische Darstellung eines Versuchsablaufs

In diesem Abschnitt werden der Versuchsablauf und die Versuchsauswertung an Hand von exemplarischen Bildern und Diagrammen erläutert. Bei der Auswahl der hier dargestellten Bilder und Diagramme liegt das Hauptaugenmerk auf der Vermittlung des Ablaufs und nicht auf der Darstellung eines vollständigen Versuchs. Daher stammen die Bilder und Diagramme teilweise von verschiedenen Technikumsversuchen.

Beim Aufbau der Versuche wurden die transparenten Versuchsrohre am unteren Ende mit einer Bodenkappe abgedichtet. Anschließend wurden die Sondenrohre gemeinsam mit dem Verfüllrohr in das Versuchsrohr eingeschoben und mit dem T-Stück am oberen Ende des Versuchsrohrs gegen den Auftrieb beim Verfüllvorgang befestigt. Das T-Stück dient darüber hinaus für den Anschluss des Ablaufschlauches (siehe Abbildung 4-4 rechts).

Da bei den Technikumsversuchen die Untersuchungen hinsichtlich der Verfüllqualität im Vordergrund standen und in den Sondenrohren somit kein Fluid zirkuliert werden musste, konnte auf den Einsatz von Sondenfüßen verzichtet werden. Als kostengünstige Alternative wurden zwei 12 m lange Verfüllrohre in der Mitte geknickt und gemeinsam mit einem weiteren, am unteren Ende der geknickten Verfüllrohre befestigten, 6 m langen Verfüllrohr in die PMMA-Rohre eingebaut (Abbildung 4-5, links und Mitte).



Abbildung 4-5: Einbau der Sondenrohre in das PMMA-Rohr (links und Mitte) und Ansicht der beiden, bei den Technikumsversuchen verwendeten Misch- und Verfüllanlagen (links: Durchlaufmischer, rechts: Kolloidmischer)

Die Verfüllung des „Bohrlochringraums“ erfolgte mit Ausnahme von EWS 3-3, EWS 3-4 und EWS 5-4 mit der Misch- und Verfüllanlage IS-38-E der Firma GERTEC Maschinen- und Anlagenbau GmbH. Für diese Art von hochtourigem Chargenmischer wird in der Geothermie-Branche häufig der Begriff „Kolloidmischer“ verwendet. Auch wenn das Wort Kolloid, das nach Hofmann et al. (2003) für Partikel mit einer Größe von 1-1000 nm verwendet wird, dies nahelegt, weisen die mit

einem Kolloidalmischer hergestellten Verfüllsuspension größere Partikel auf. Der Begriff Kolloidalmischer ist somit nicht klar definiert, sondern umschreibt qualitativ die gegenüber einem Durchlaufmischer intensivere Anmischung, also die Herstellung eines „kolloidalen Systems“, das aus einem Dispersionsmedium (in diesem Fall Wasser) besteht, in dem eine disperse Phase (z.B. Tonpartikel) gleichmäßig verteilt ist. Diese gleichmäßigere Verteilung der Feststoffpartikel wird bei Kolloidalmischern durch das intensive Anmischen der Verfüllsuspension mit einem Rührwerk in einem Anmischbehälter erreicht. Die Versuche EWS 3-3, EWS 3-4 und EWS 5-4 wurden mit dem Durchlaufmischer G 4 der Firma Knauf PFT GmbH & Co. KG durchgeführt. Beim Durchlaufmischer wird der Baustoff in eine Vorratskammer geschüttet, von wo er mit einem schräg angeordneten Zellenrad zur Misch- und Pumpzone befördert wird und mit Hilfe einer manuell regelbaren Wasserarmatur auf die gewünschte Dichte eingestellt werden kann. Bei einem Kolloidalmischer kann der Baustoff mit Wasser in einem separaten Anmischbehälter mit Rührwerk nach dem vom Hersteller angegebenen W/F-Verhältnis angemischt und nach einer definierten Nachmischzeit (Mischzeit nach Zugabe des letzten Baustoffsacks) in einen größeren Vorratsbehälter befördert werden, von wo die Suspension anschließend in das Bohrloch gepumpt werden kann. In Abschnitt 5.5.2 wird auf eine Problematik eingegangen, die sich in Abhängigkeit bestimmter Faktoren wie z.B. der verwendeten Nachmischzeit oder des Verfüllvolumenstroms ergeben kann und unter Umständen dazu führt, dass ein kontinuierlicher Verfüllvorgang mit einem Kolloidalmischer nicht zu realisieren ist.



Abbildung 4-6: Darstellung eines Verfüllvorgangs einer Verfüllsuspension einer Verfüllsuspension

Bei einem Kolloidalmischer kann der Baustoff mit Wasser in einem separaten Anmischbehälter mit Rührwerk nach dem vom Hersteller angegebenen W/F-Verhältnis angemischt und nach einer definierten Nachmischzeit (Mischzeit nach Zugabe des letzten Baustoffsacks) in einen größeren Vorratsbehälter befördert werden, von wo die Suspension anschließend in das Bohrloch gepumpt werden kann. In Abschnitt 5.5.2 wird auf eine Problematik eingegangen, die sich in Abhängigkeit bestimmter Faktoren wie z.B. der verwendeten Nachmischzeit oder des Verfüllvolumenstroms ergeben kann und unter Umständen dazu führt, dass ein kontinuierlicher Verfüllvorgang mit einem Kolloidalmischer nicht zu realisieren ist.

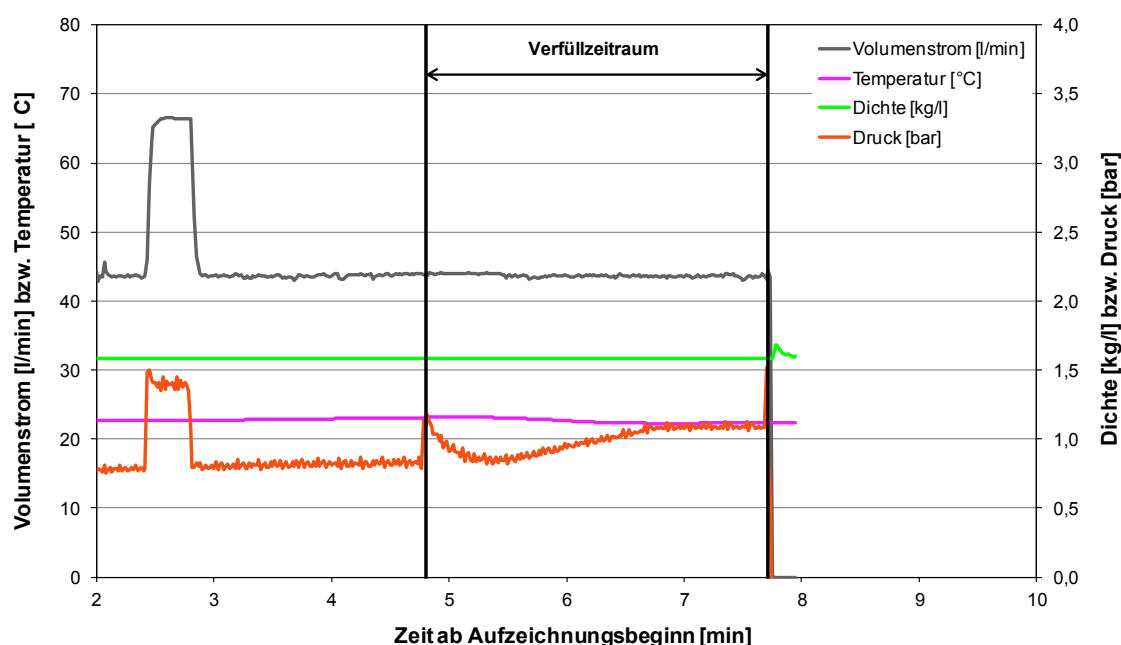
In Abbildung 4-5 (rechts) sind beide bei den Technikumsversuchen eingesetzten Misch- und Verfüllanlagen dargestellt. Um einen einfachen Transport des Kolloidalmischers zwischen Technikums- und Realmaßstabsgelände zu ermöglichen, wurde dieser auf einem Handpritschenwagen gelagert.

Beim Verfüllvorgang wird die Zementsuspension mit der jeweiligen Misch- und Verfüllanlage durch das Verfüllrohr in das Bohrloch eingebracht. Eine exemplarische Visualisierung eines Verfüllvorgangs ist in Abbildung 4-6 zu sehen. Die Beendigung der Verfüllversuche erfolgte erst, wenn der in der Abbildung zu erkennende Durchmischungsbereich, der in seiner Ausprägung vor allem vom Verfüllvolumenstrom, dem verwendeten Verfüllbaustoff und der Anmischintensität abhängt, komplett aus dem „Bohrloch“ verdrängt wurde und die Dichte der oben austretenden Suspension mit den Angaben des Herstellers übereinstimmt.

In Abbildung 4-7 sind die während einer exemplarischen Versuchsdurchführung kontinuierlich erfassten Messwerte dargestellt.

Um das Coriolis-Messgerät vollständig zu entlüften und eine korrekte Messwerterfassung sicherzustellen, findet vor dem eigentlichen Verfüllen der Versuchs-Erdwärmesonden eine Zirkulation der Verfüllsuspension mit kurzfristig hohen Volumenströmen statt.

Der in Abbildung 4-7 dargestellte exemplarische Verfüllvorgang wird vor allem durch den Druckverlauf geprägt. Dieser zeigt nach Abklingen der Anfangseffekte (plötzlicher Druckanstieg und anschließender Druckrückgang), die sich durch das Umschalten von der Verfüllsuspensions-Zirkulation auf die Verfüllung des transparenten Rohrs ergeben, erwartungsgemäß einen mit zunehmendem Suspensionspiegel ansteigenden Verfülldruck. Sobald das PMMA-Rohr vollständig gefüllt ist, erreicht der Verfülldruck einen annähernd konstanten Wert. Die übrigen Messgrößen (Verfüllsuspensionsdichte, Verfüllvolumenstrom und Temperatur der Verfüllsuspension) sind im vorliegenden Fall während des gesamten Verfüllvorgangs nahezu konstant.



Versuchsdauer: 2,91 min

Mittlere Suspensionsdichte: 1,58 kg/l

Mittlere

Suspensionstemperatur: 22,6 °C

Mittlerer Verfüllvolumenstrom: 43,7 l/min

Eingebrachtes Suspensionsvolumen: 127 l

Abbildung 4-7: Kontinuierliche Datenaufnahme während eines Verfüllvorgangs

Ergänzend zu der erläuterten Messwerterfassung wurden baustellentaugliche Messverfahren zur Bestimmung der Suspensionsdichte, der Filtratwasserabgabe (Filterpressenversuch), der Marsh-Zeit und des Wasserabsetzmaßes eingesetzt (Abbildung 4-8). Ziel ist es zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen den genannten Parametern und der ermittelten Verfüllqualität vorliegt. Die Probe zur Bestimmung der Suspensionsdichte wurde direkt aus dem Vorratsbehälter des Kolloidalmischers bzw. im Falle eines Durchlaufmischers an einem Ablasshahn direkt nach dem Mischer entnommen. Um sicherzustellen, dass das „Bohrloch“ komplett verfüllt ist, wurde am Überlauf des Plexiglasrohres eine weitere Probe zur Bestimmung der Suspensionsdichte entnommen. Bei der Dichtebestimmung der Verfüllsuspension wurde neben der in der Praxis häufig

verwendeten Spülungswaage (Abbildung 4-8, Bild 4) zusätzlich auch ein Aräometer verwendet. Das Probenmaterial für die Bestimmung der Marsh- und Restauslaufzeit, für den Filterpressenversuch sowie für die Bestimmung des Absetzmaßes wurde ebenso aus dem Vorratsbehälter des Kolloidalmischers bzw. im Falle eines Durchlaufmischers an einem Ablasshahn direkt nach dem Mischer entnommen. Die Bestimmung der Marsh- und Restauslaufzeit sowie der Filterpressenversuch erfolgten nach DIN 4127. Die Filterpresse für den Filterpressenversuch stammt von der Firma Friedrich Leutert GmbH & Co. KG (Abbildung 4-8, Bild 1). Für die Bestimmung der Marsh- und Restauslaufzeit wurde ein Marsh-Trichter mit einem Auslaufdurchmesser von 4,76 mm verwendet (Abbildung 4-8, Bild 3). Das Absetzmaß wurde in einem 1000 ml Messzylinder (hohe Form, $d = 6$ cm) nach 24 Stunden bestimmt (Abbildung 4-8, Bild 2). Die Bestimmung der Fließgrenze mit Hilfe der Kugelharfe (Abbildung 4-8, Bild 5) kam im späteren Projektverlauf für die Ergebniskorrelation von Labor- und Großversuchen zum Einsatz (siehe Kapitel 6).

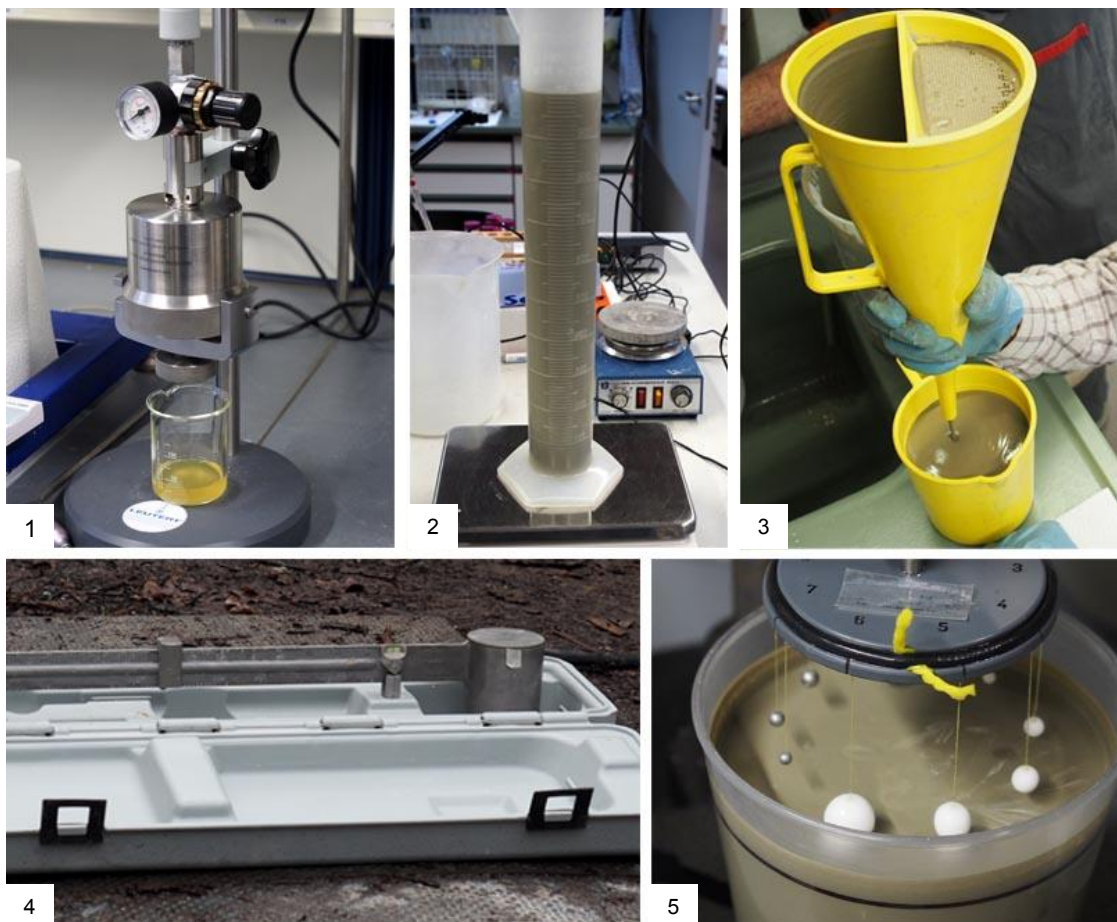


Abbildung 4-8: Übersicht der baustellentauglichen Messverfahren zur Bestimmung von Suspensionseigenschaften, die im Zuge des Forschungsvorhabens eingesetzt wurden. 1: Bestimmung der Filtratwasserabgabe mit dem Filterpressenversuch; 2: Bestimmung des Absetzmaßes in einem 1000 ml Messzylinder; 3: Bestimmung der Marsh- und Restauslaufzeit, 4: Bestimmung der Suspensionsdichte mit einer Spülungswaage, 5: Bestimmung der Fließgrenze mittels Kugelharfe

Die Analyse der Verfüllqualität erfolgte frühestens eine Woche nach Versuchsdurchführung. Auch wenn zu diesem Zeitpunkt die Baustoffe ihre maximale Festigkeit noch nicht erreicht hatten, ist davon auszugehen, dass systemrelevante Verfüllqualitätsmängel, wie zum Beispiel Fehlstellen, Kanalstrukturen, Entmischungen, Rissstrukturen (siehe Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-13 auf Seite 242 bis Seite 243), nach einer Aushärtezeit von einer Woche nicht neu entstehen können. Für den Rückbau der Versuchs-EWS wurden diese mit einer eigens gebauten Holzkonstruktion auf mobile Transportwagen abgelassen und vor der Technikumsversuchshalle in 25 cm lange Einzelstücke zersägt und systematisch auf Verfüllqualitätsmängel visuell untersucht, die Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit haben können (s. Abbildung 4-9). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden schriftlich als auch fotografisch dokumentiert.



Abbildung 4-9: Exemplarischer Ablauf einer Analyse der Verfüllqualität nach einer Aushärtezeit von mindestens einer Woche

4.5. Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Technikumsversuche sind in Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-6 aufgeführt.

Der Aufbau der Ergebnistabellen ist ähnlich zu der Übersichtstabelle der durchgeführten Versuche (Tabelle 4-2). In den obersten zwei Zeilen ist der Versuchsname sowie der in diesem Versuch verwendete Verfüllbaustoff aufgeführt. In der darunter befindlichen Zeile wird angegeben, ob der

Versuch mit den Standard-Versuchsbedingungen durchgeführt wurde (vgl. Tabelle 4-1) oder ob und wenn ja welcher Parameter im Vergleich dazu variiert wurde.

Die Anmischbedingungen werden in den darauffolgenden Zeilen der Ergebnistabellen durch die Angabe der verwendeten Misch- und Verfüllanlage, des verwendeten Wasser-Feststoff-Verhältnisses sowie der Nachmischzeit charakterisiert. Die mit dem Coriolis-Messgerät erfassten Verfüllgeschwindigkeiten, Suspensionsdichten und Suspensionstemperaturen beschreiben jeweils die Mittelwerte der Verfüllzeiträume (vgl. Abbildung 4-7).

Zum Teil ist der Verlauf der Verfüllgeschwindigkeit durch starke Schwankungen geprägt, sodass in der Tabelle Zirkaangaben gemacht wurden. Der Grund hierfür ist vermutlich die durch die Verfüllpumpe verursachte Schwingung, die insbesondere bei dem Durchlaufmischer eine Beeinträchtigung der Datenerfassung zur Folge hatte. Um diesen Effekt zu reduzieren wurde nach der ersten Versuchsreihe ein zusätzlicher 10 m langer, flexibler Mörtelschlauch zwischen der Misch- und Verfüllanlage und dem Coriolis-Messgerät eingesetzt. Die mit dem Coriolis-Messgerät bestimmten Werte von EWS 5-3 sowie EWS 5-4 sind eingeschränkt auswertbar, da das in diesen Versuchen verwendete Material Einfluss auf die Datenerfassung hatte und insbesondere im Bezug auf die Suspensionsdichte keine plausiblen Werte liefert.

Die weiteren Materialkennwerte (Marsh- und Restauslaufzeit, Werte aus dem Filterpressenversuch sowie das Absetzmaß nach 24 Stunden) geben die Ergebnisse der versuchsbegleitenden Datenerfassung wieder.

Die Ergebnisse der Analyse der Verfüllqualitätsmängel, die negativen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit der verfüllten EWS haben könnten, sind im unteren Drittel der Tabelle aufgeführt. Zu den Verfüllqualitätsmängeln zählen vor allem große, wassergefüllte Fehlstellen sowie aufgrund stattfindender Entmischungsvorgänge innerhalb der Suspensionssäule sich bildende Aufstiegskanäle. Nachfolgend wird auch der Begriff „Kanalstrukturen“ gleichbedeutend zu dem Begriff „Aufstiegskanal“ verwendet. Darüber hinaus wurden flächige Rissstrukturen bzw. Sackungen sowie Entmischungen der Suspension als mögliche Einflussfaktoren auf die Systemdurchlässigkeit betrachtet. Beispielbilder für die hier beschriebenen Verfüllqualitätsmängel sind in Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-13 dargestellt. Häufig konnten Entmischungen gemeinsam mit Aufstiegskanälen beobachtet werden (Abbildung 4-12 links), wobei vereinzelt auch größere Entmischungsbereiche aufgetreten sind, die nicht in Verbindung mit einem Aufstiegskanal standen (Abbildung 4-12 Mitte). Im Falle der Fehlstellen konnte eine objektive Bewertung durch eine größenabhängige Auftretshäufigkeit stattfinden. Für jeden Versuch ist dafür in den Tabellen die Anzahl der Fehlstellen mit Größen von 0 -10 cm, 10 – 20 cm, 20 – 30 cm, 30 – 50 cm und > 50 cm aufgeführt. Die Bewertung der Auftretshäufigkeit und Relevanz für die Systemdurchlässigkeit der Aufstiegskanäle, der Rissstrukturen/Sackungen sowie der Entmischungen ist hingegen subjektiv und erfolgte gemäß dem in Tabelle 4-3 dargestellten Bewertungsschema.

Tabelle 4-3: Erläuterung zum Aufbau des Bewertungsschemas. Falls in Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-6 bei einem Verfüllqualitätsmangel kein Kästchen grau ausgefüllt ist, bedeutet dies, dass der entsprechende Verfüllqualitätsmangel in dieser Versuchs-EWS nicht aufgetreten ist

Auftreten von Mängeln mit möglichem negativem Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit	Sehr selten	Selten	Mittel	Häufig	Sehr häufig
--	-------------	--------	--------	--------	-------------

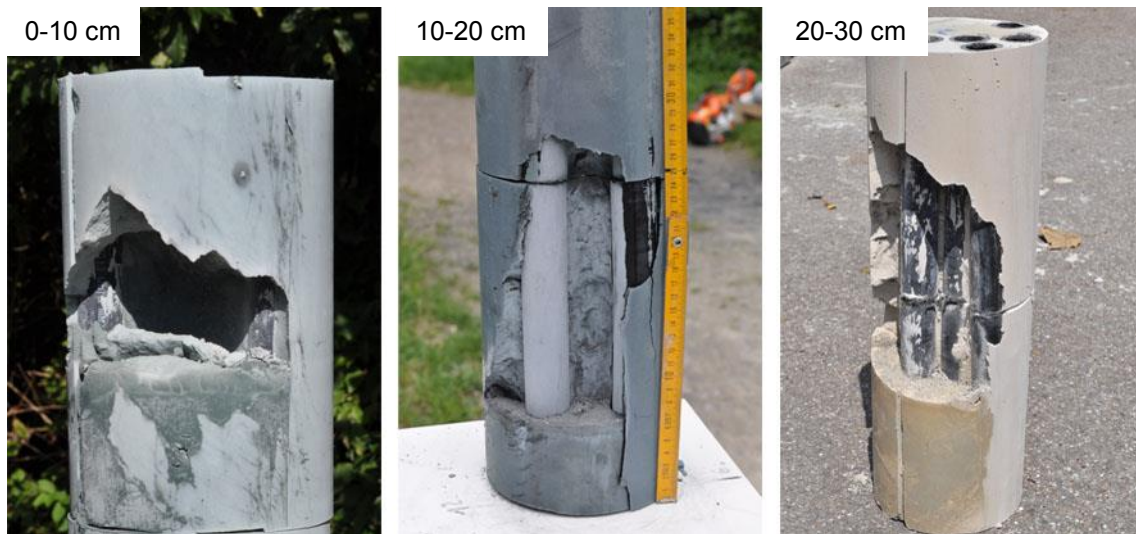


Abbildung 4-10: Beispielbilder zur Fehlstellenkategorisierung



Abbildung 4-11: Unterschiedliche Varianten von Aufstiegskanalstrukturen. Links: An "Bohrlochwand" ohne Kontakt zum Sondenrohr. Mitte: Aufstiegskanal „an Bohrlochwand“ entlang Sondenrohr. Rechts: Aufstiegskanal im Zentrum von Versuchszylinder (ohne eingebauter EWS)



Abbildung 4-12: Beispielbilder von Entmischungen. Links und Mitte: Entmischung von quarzsandbasierten Verfüllbaustoffen. Rechts: In Aufstiegskanal angereichertes Graphit



Abbildung 4-13: Beispielbilder von Rissstrukturen und Sackungen

Um eine vergleichbare Bewertung dieser Strukturen zu gewährleisten, wurden für die Analysen detaillierte Dokumentationsblätter ausgefüllt und zusätzlich sämtliche Verfüllqualitätsmängel bildlich festgehalten. Nach Abschluss aller Analysen wurden die Ergebnisse gesamtheitlich miteinander verglichen. In Abhängigkeit der Bewertung für die einzelnen Bereiche wurde anschließend die Verfüllqualität für jeden Versuch mit einer Gesamtnote von 1 (sehr gut) bis 6 (ungenügend) bewertet. In die Bewertung ist ausschließlich der verfüllte Teil der Sonde mit eingeflossen. Falls ein außergewöhnlich großes Absetzen im oberen Bereich der Sonden auftrat (nicht im Absetzzylinder), wurde dies mit einer Abwertung und einer zweiten, eingeklammerten Note berücksichtigt.

Tabelle 4-4: Versuchsergebnisse der Versuchsreihen 1 bis 3

	EWS 1-1	EWS 1-2	EWS 1-3	EWS 1-4	EWS 2-1	EWS 2-2	EWS 2-3	EWS 2-4	EWS 3-1	EWS 3-2	EWS 3-3	EWS 3-4
Verfüllbaustoff	8	8	8	8	8	8	8	8	2	2	2	2
Variation in den Versuchsrandbedingungen	Standard	Rohr innen besandet	hoher Vol.-strom	niedriger Vol.-strom	Standard	Standard	Rohr innen besandet	Rohr innen besandet	Standard	WF-Wert erhöht	Durchlaufmischer	Durchlaufmischer
Verwendete Misch- und Verfüllanlage	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Durchlaufmischer	max. H ₂ O-Zugabe
W/F-Verhältnis [kg/kg]	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.7	0.77	0.7	ca. 1,1
Anmischzeit [s]	90	90	90	90	90	90	90	90	120	120	-	-
Verfüllgeschwindigkeit [l/min]	ca. 45	ca. 45	67	ca. 26	ca. 41	41	41	41	44	44	ca. 35	ca. 35
Soll-Suspensionsdichte [kg/l]	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.59	1.59	1.59	1.59
gemessene Mischer [kg/l]	1.75	-	-	-	1.75	1.75	1.76	1.81	1.61	1.59	1.59	1.44
Suspensionsdichte	1.80	1.80	1.79	1.80	1.79	1.78	1.78	1.79	1.61	1.58	1.58	1.47
Übertauf [kg/l]	1.77	1.77	1.77	1.68	-	-	-	-	-	-	-	-
Suspensions temperatur [°C]	21.0	21.1	21.2	21.5	28.1	29.3	24.2	23.6	23.4	22.6	17.3	17.3
Marshzeit [s]	92	-	-	-	71	46	54	128	40	38	39	35
Restlaufzeit [s]	-	-	-	-	59	-	-	-	72	67	67	59
Filter-	145***	-	-	-	145***	145***	-	-	-	-	-	-
pressen-	56***	-	-	-	56***	56***	-	-	-	-	-	-
versuch	200***	-	-	-	200***	200***	-	-	-	-	-	-
Absetzmaß nach 24 h [%]	2.5	2.0	4.0	4.0	2.5	4.0	2.5	2.0	2.5	4.0	5.5	28.5
Fehlstellenanzahl großabhängig [cm]												
0-10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10-20	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20-30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30-50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
>50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bewertung der Relevanz von Verfüllqualitätsmängeln mit möglichem negativem Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit												
Fehlstellen	4	3	4	4	3	4-5	4	4	4	4-5	3 [4]	4 [6]
Aufstiegskanäle	4	3	4	4	3	4-5	4	4	4	4-5	3 [4]	4 [6]
Risstrukturen/Sackungen	4	3	4	4	3	4-5	4	4	4	4-5	3 [4]	4 [6]
Entmischungen	4	3	4	4	3	4-5	4	4	4	4-5	3 [4]	4 [6]
Gesamtrote	4	3	4	4	3	4-5	4	4	4	4-5	3 [4]	4 [6]
Kommentar					Versuch nur zum Teil auswertbar, da eine Undichtigkeit am Versuchsaufbau auftritt						Wasser-absetzen im "Bohrloch": 40 cm	Wasser-absetzen im "Bohrloch": 00 cm

***: übernommen von EWS 4-2

Tabelle 4-5: Versuchsergebnisse der Versuchsreihen 4 bis 6

	EWS 4-1	EWS 4-2	EWS 4-3	EWS 4-4	EWS 5-1	EWS 5-2	EWS 5-3	EWS 5-4	EWS 6-1	EWS 6-2	EWS 6-3	EWS 6-4
Verfüllbaustoff	8	8	2*	2*	8	8	3	3	7	7*	13	13
Variation in den Versuchsrandbedingungen	Gummringe & lange Nachmischzeit	Zentrierhilfen	Standard	lange Nachmischzeit	Koaxial-EWS glatt & kurze Nachmischzeit	trockenes "Bohrloch"	Standard	Durchlaufmischer	Standard	Standard	Standard	lange Nachmischzeit
Verwendete Misch- und Verfüllanlage	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Durchlaufmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer	Kolloidmischer
W/F-Verhältnis [kg/kg]	0.44	0.44	0.8	0.8	0.44	0.44	0.8	0.8	0.3	0.3	0.8	0.8
Anmischzeit [s]	120	90	90	120	60	90	90	-	120	120	60	240
Verfüllgeschwindigkeit [l/min]	39	ca. 41	41	41	40	41	(39)	(35)	42	42	41	42
Soll-Suspensionsdichte [kg/l]	1.79	1.79	1.59	1.59	1.79	1.79	1.46	1.46	1.94	1.94	1.46	1.46
gemessene Mischer [kg/l]	1.79	1.77	1.54	1.55	1.77	1.77	1.50	1.45	1.93	1.92	1.54	1.52
Suspensionsdichte	1.79	1.80	1.58	1.58	1.80	1.79	(1,61)	(1,68)	1.95	1.96	1.54	1.53
Überlauf [kg/l]	1.79	1.79	1.55	1.55	1.80	1.80	1.52	1.48	1.95	1.95	1.54	1.53
Suspensionstemperatur [°C]	-	16.3	12.7	12.7	16.0	13.9	(12,5)	(12,2)	17.4	17.4	18.6	18.1
Marshzeit [s]	zu viskos	73	77	71	56	54	40	37	>390	127	49	53
Restauslaufzeit [s]	zu viskos	83	61	56	53	50	26	24	-	134	43	46
Filterpressenversuch	-	145	7	8	-	-	-	-	54	73	112	126
Filterkuchen [mm]	-	56	2	2	-	-	-	-	54	-	48	44
Versuchszeit [s]	-	200	450	450	-	-	-	-	450	450	83	116
Absetzmaß nach 24 h [%]	1.5	2.5	2.0	2.0	5.5	5.0	3.0	17.5	0.5	0.5	2.5	1.0
Fehlstellenanzahl größenabhängig [cm]												
	0-10	10-20	20-30	30-50	>50							
Bewertung der Relevanz von Verfüllqualitätsmängeln mit möglichem negativem Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit												
Fehlstellen												
Aufstiegskanäle												
Risstrukturen/Sackungen												
Entmischungen												
Gesamtnote	3-4	4	5	5	2 [2-3]	3-4 [4]	2	2-3 [5]	3	2	2-3	2
Kommentar					Wasser-absetzen im "Bohrloch"; 20 cm	Wasser-absetzen im "Bohrloch"; 20 cm	Probleme bei der Daten-aufnahme mit dem Coriolis-Messgerät					

*: gegenüber dem entsprechenden Originalprodukt durch den Hersteller modifizierter Verfüllbaustoff

Tabelle 4-6: Versuchsergebnisse der Versuchsreihen 7 bis 9

	EWS 7-1	EWS 7-2	EWS 7-3	EWS 7-4	EWS 8-1	EWS 8-2	EWS 8-3	EWS 8-4	EWS 9-1	EWS 9-2	EWS 9-3	EWS 9-4
Verfüllbaustoff	13	13*	13*	13*	15	15	15	15	9	9	9	9
Variation in den Versuchsrandbedingungen	kurze Nachmischzeit	Standard	niedriger Vol.-strom	hoher Vol.-strom	Standard	2-U-EWS aus PE-Xa	Koaxial-EWS gewellt	Koaxial-EWS glatt	Standard	2-U-EWS aus PE-Xa	ohne EWS	ohne EWS, trockenes
Verwendete Misch- und Verfüllanlage	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer
W/F-Verhältnis [kg/kg]	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4
Anmischzeit [s]	5	90	90	90	90	90	90	90	40	40	40	40
Verfüllgeschwindigkeit [l/min]	43	41	ca. 26	ca. 65	43	43	43	43	41	41	40	42
Soll-Suspensionsdichte [kg/l]	1.46	1.46	1.46	1.46	1.53	1.53	1.53	1.53	1.90	1.90	1.90	1.90
gemessene Mischer [kg/l]	1.53	1.53	1.53	1.54	1.54	1.55	1.54	1.55	1.79	1.81	1.83	1.82
Suspensionsdichte	1.55	1.54	1.54	1.54	1.53	1.54	1.54	1.54	1.83	1.82	1.82	1.82
Überlauf [kg/l]	1.55	1.52	1.49	1.48	1.53	1.54	1.54	1.54	1.8	1.76	1.82	1.83
Suspensionstemperatur [°C]	15.8	20.0	20.6	19.2	26.8	26.0	25.4	24.2	19.9	18.9	21.0	20.6
Marshzeit [s]	54	zu viskos	zu viskos	zu viskos	40	41	42	40	57	67	64	68
Restauslaufzeit [s]	42	zu viskos	zu viskos	zu viskos	31	31	32	31	53	58	58	64
Filterpressen- versuch	122	106	106	fehligeschlagen	143	135	130	142	100	fehligeschlagen	100	101
Filterkuchen [mm]	45	41	38	fehligeschlagen	45	43	34	40	49	fehligeschlagen	51	52
Versuchszeit [s]	68	405	263	fehligeschlagen	158	126	201	80	93	fehligeschlagen	59	72
Absetzmaß nach 24 h [%]	3.0	1.0**	1.0	1.0	2.0	1.5	2.0	2.0	4.0	4.0	3.0	4.0
Fehlstellenanzahl größenabhängig [cm]												
	0-10	10-20	20-30	30-50	>50							
	3	1	1	2		1	2	1	1			
Bewertung der Relevanz von Verfüllqualitätsmängeln mit möglichem negativem Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit												
Fehlstellen	[Bar chart showing defect counts for various categories]											
Auftiegskanäle	[Bar chart showing defect counts for various categories]											
Risstrukturen/Sackungen	[Bar chart showing defect counts for various categories]											
Entmischungen	[Bar chart showing defect counts for various categories]											
Gesamtnote	2	2	2-3	2-3	3	3	3	2	3 [3-4]	3-4 [4]	1-2 [3]	1-2 [3]
Kommentar	[Detailed comments for each category]											

*: gegenüber dem entsprechenden Originalprodukt durch den Hersteller modifizierter Verfüllbaustoff

Aus der visuellen Beobachtung des Verfüllvorgangs konnten keine direkten Rückschlüsse auf die Verfüllqualität gezogen werden. Obwohl es zum Teil zu deutlichen Unterschieden in Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffs und der Verfüllgeschwindigkeit kam (zum Teil bildet sich ein klar definierter Grenzbereich zwischen dem Wasser im „Bohrloch“ und der aufsteigender Suspensionssäule, zum Teil kommt es zu einer großen Durchmischungszone, vgl. Abbildung 4-6) konnten keine Zusammenhänge dieser Aspekte mit der Verfüllqualität beobachtet werden.

Auf Basis der durchgeführten 36 Technikumsversuche konnten drei Haupteinflussfaktoren identifiziert werden, die im Folgenden erläutert werden. Es gilt zu bedenken, dass die Versuche für die einzelnen Randbedingungen nur singular durchgeführt wurden. Lediglich für zwei unterschiedliche Versuchsrandbedingungen wurde ein Wiederholungsversuch durchgeführt. Bei dem ersten Wiederholungsversuch EWS 2-1 / EWS 2-2 trat eine Undichtigkeit am Versuchsaufbau auf, sodass ein vollständiger Ergebnisvergleich nicht möglich war. Der direkte Vergleich zwischen EWS 1-1 und EWS 2-2 ist aufgrund unterschiedlicher Suspensionstemperaturen nicht möglich. Der zweite Wiederholungsversuch (EWS 2-3 / EWS 2-4) zeigt ähnliche Ergebnisse (siehe Tabelle 4-4).

Haupteinflussfaktor 1: Verfüllbaustoff

Ein entscheidender Einflussfaktor auf die Verfüllqualität ist die Wahl des Verfüllbaustoffs. Es hat sich gezeigt, dass es produktabhängige Qualitätsunterschiede gibt, die nicht eindeutig im Zusammenhang mit der Baustoffkategorie (siehe Abschnitt 2.3) stehen. Thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe auf Quarzsandbasis tendieren jedoch eher zum Entmischen und zur Bildung von Aufstiegsstrukturen als thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe auf Graphitbasis. Zwischen Standardbaustoffen und thermisch verbesserten Verfüllbaustoffen konnte bezogen auf die Verfüllqualität keine Tendenz festgestellt werden.

Haupteinflussfaktor 2: Misch- und Verfülltechnik

Neben der Wahl des Verfüllmaterials hat die verwendete Misch- und Verfülltechnik einen wesentlichen Einfluss auf die Verfüllqualität. Verfüllsuspensionen, die mit einem Kolloidalmischer angemischt werden, zeigten ein geringeres Absetzmaß als die gleichen, mit einem Durchlaufmischer angemischten Verfüllsuspensionen. Der bei der „kolloidalen“ Anmischung höhere Grad des Aufschlusses der in den Verfüllsuspensionen enthaltenen Tonpartikel, wird hier hauptverantwortlich sein. Weiter wurde festgestellt, dass der Einfluss der Mischintensität zudem stark baustoffabhängig ist. So zeigte Verfüllbaustoff 2 mit einer Erhöhung des Absetzmaßes von 2,5 % (EWS 3-1) mit dem Kolloidalmischer auf 5,5 % (EWS 3-4) mit dem Durchlaufmischer eine deutlich geringere Sensitivität hinsichtlich der Anmischart als Verfüllbaustoff 3, bei dem die Variation des Mixers zu einer Erhöhung des Absetzmaßes von 3,0 % (EWS 5-3; Kolloidalmischer) auf 17,5 % (EWS 5-4; Durchlaufmischer) führte.

Neben der höheren Anmischintensität ist es bei Kolloidalmischern zusätzlich möglich, die Suspensionseigenschaften, wie zum Beispiel die Suspensionsdichte, während des gesamten Verfüllvorgangs durch eine einfach durchzuführende Probenahme aus dem Vorratsbehälter zu überwachen.

Haupteinflussfaktor 3: Sondenrohrposition

Es hat sich gezeigt, dass auch die Sondenrohrpositionen einen großen Einfluss auf die Fließbewegungen innerhalb des Bohrlochs und auch auf die Verfüllqualität haben. Die asymmetrische Sondenrohrverteilung im Bohrloch führt dazu, dass die aufsteigende Suspension meist nicht gleichmäßig, sondern bevorzugt in einem Bereich aufsteigt, in dem keine Sondenrohre vorhanden sind. Teilweise lagen auch sämtliche Sondenrohre nebeneinander an der Bohrlochwand (siehe Abbildung 4-14 rechts). In solchen Fällen bildete sich meist bereits beim Verfüllvorgang eine deutliche Grenze zwischen dem bevorzugten Fließbereich und dem Bereich in dem die Verfüllsuspension kaum bzw. nur sehr langsam aufsteigt („Stagnationsbereich“). Bei der späteren Analyse der Verfüllqualität zeichnete sich diese Grenze durch einen Farbunterschied und zum Teil auch durch Rissstrukturen ab (Abbildung 4-14).

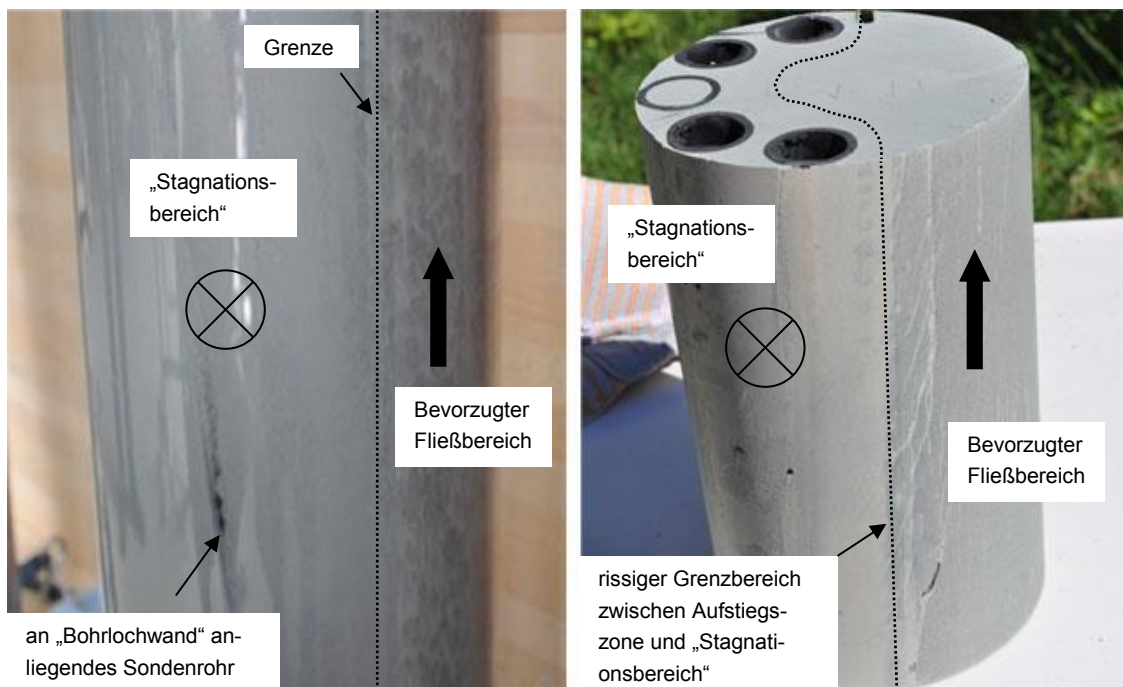


Abbildung 4-14: Links: Unterschiedliches Fließverhalten der Verfüllsuspension während des Verfüllvorgangs, Rechts: Im ausgehärtetem Zustand durch Farbgebung und Rissstrukturen wiedererkennbarer Grenzbereich

Der in Abbildung 4-14 (rechts) erkennbare bevorzugte Sondenverlauf entlang der Bohrlochwand ist ähnlich zu den Ergebnissen des Forschungsvorhabens EWSplus (Riegger 2013) ein bei den Technikumsversuchen häufig beobachtetes Phänomen. Grund für den bevorzugten Sondenverlauf entlang der Bohrlochwand ist die Anlieferung der Sondenrohre auf Ringbunden und die relativ große Steifheit des Sondenrohrmaterials.

Ein Vorgang, der nach Abschluss des Verfüllvorgangs am „Bohrlochrand“ zu beobachten war, ist die Ausbildung von schmalen (~ 2-5 mm breiten) Aufstiegskanälen, in denen sich in den ersten Stunden nach Verfüllvorgang aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Wasser und Verfüllsu-

suspension nach oben gerichtete Wasserfließbewegungen einstellen und die auf Entmischungsvorgänge („Ausbluten“) der Verfüllsuspension schließen lassen. Es hat sich gezeigt, dass sich Aufstiegskanäle bevorzugt dort bilden, wo die Sondenrohre direkt an der „Bohrlochwand“ anliegen. Diese Aufstiegskanäle bleiben im ausgehärteten Zustand als Kanalstrukturen erkennbar, die eine erhöhte Systemdurchlässigkeit erwarten lassen. Um zu überprüfen, ob die Bildung von Aufstiegskanälen durch die glatte Oberfläche des PMMA-Rohres hervorgerufen wird, wurden in den ersten Versuchsreihen die Innenseite dreier PMMA-Rohre besandet. Bei diesen Versuchen (EWS 1-2, EWS 2-3 und EWS 2-4) hat sich gezeigt, dass sich bei innen besandeten PMMA-Rohren ebenso Aufstiegskanäle bilden. Darüber hinaus hat sich bei Analysen von EWS in unbesandeten PMMA-Rohren gezeigt, dass Aufstiegskanäle auch im Inneren der Verfüllsäule sowohl entlang der Sondenrohre als auch unabhängig dieser auftreten können. Demnach ist die glatte Oberfläche der PMMA-Rohre nicht hauptverursachend für die Bildung von Aufstiegskanälen. In Abbildung 4-15 ist der untere Teil einer Fehlstelle zu sehen, der durch eine Vielzahl von dort endenden Aufstiegskanälen gekennzeichnet ist.

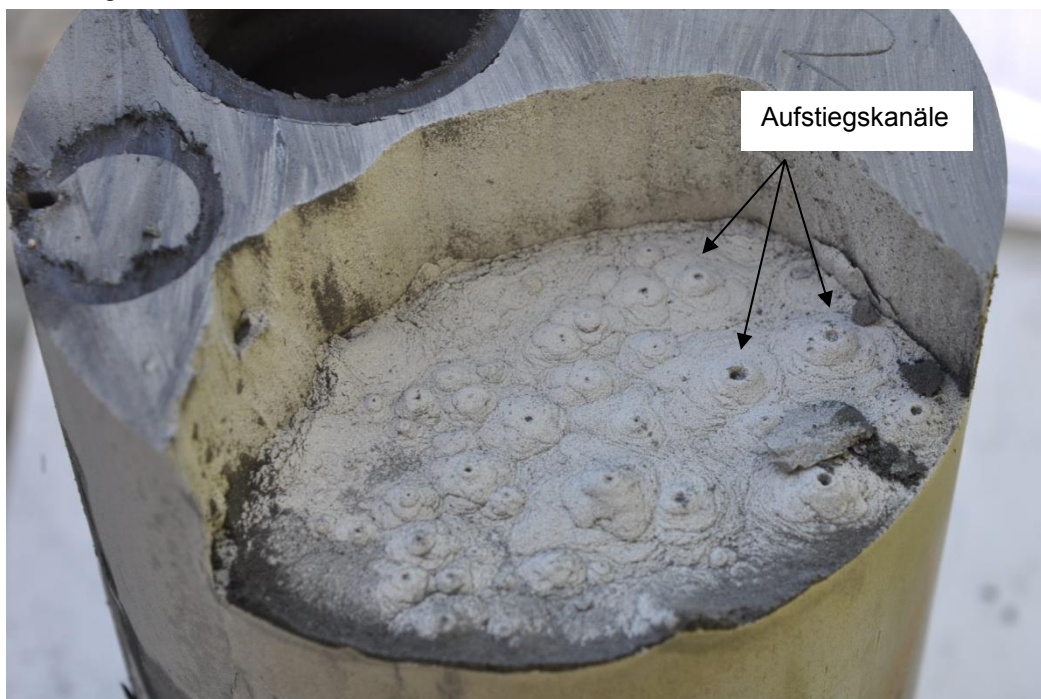


Abbildung 4-15: Aufstiegskanäle in EWS 8-3, die von unten in eine Fehlstelle führen

In wie weit der direkte Kontakt von Sondenrohren und Bohrlochwand Einfluss auf die Ausbildung von Aufstiegskanälen hat, wurde in Versuch EWS 4-1 und EWS 4-2 im Vergleich mit den Versuchen EWS 1-1 und EWS 2-2 untersucht. Bei Versuch EWS 4-1 wurden an jedem der vier Sondenrohre und am Verfüllrohr im Abstand von 50 cm Gummiringe angebracht, die einen Mindestabstand von ~ 2 mm zwischen den Sondenrohren und der Bohrlochwand sicherstellen (Abbildung 4-16 links). Bei Versuch 4-2 wurden Zentrierungen im Abstand von 1 m eingesetzt, die das gesamte Rohrbündel im Bohrloch zentrieren und einen Abstand von ca. 3 cm zur Bohrlochwand

sicherstellen sollen (Abbildung 4-16 rechts). Die Anbringung von Gummiringen reduzierte die Anzahl von Aufstiegskanälen am „Bohrlochrand“, konnte die ganzheitliche Verfüllqualität allerdings nur unwesentlich verbessern. Im Falle von Versuch EWS 4-2 führte der Einbau der Zentrierungen zu keiner erheblichen Reduzierung der Aufstiegskanäle am „Bohrlochrand“, vielmehr stellten die Zentrierungen geometrische Unregelmäßigkeiten dar, die nach Beendigung des Verfüllvorgangs zur Bildung einiger kleiner Fehlstellen in der direkten Umgebung der Zentrierungen führten.

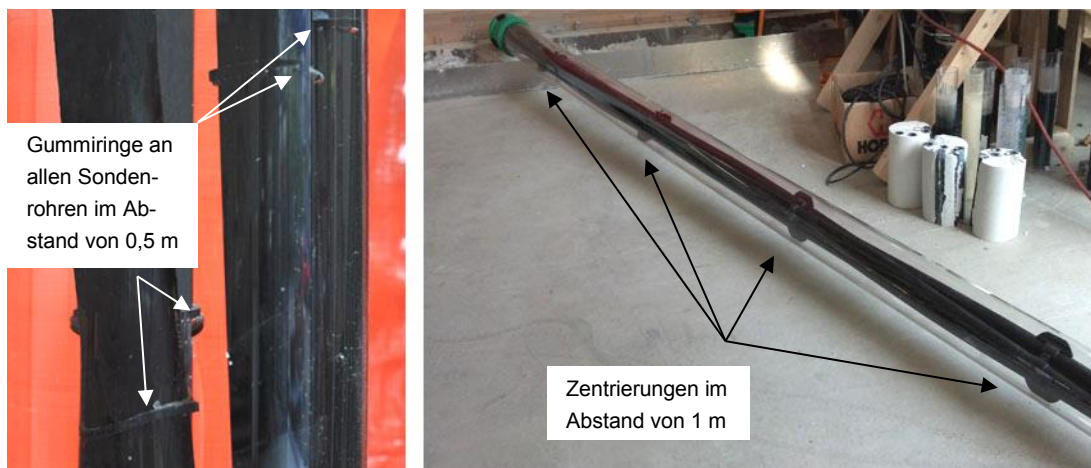


Abbildung 4-16: Versuche zur Beurteilung des Einflusses der Sondenrohrposition im Bohrloch mit Gummiringen (EWS 4-1) und Zentrierungen (EWS 4-2)

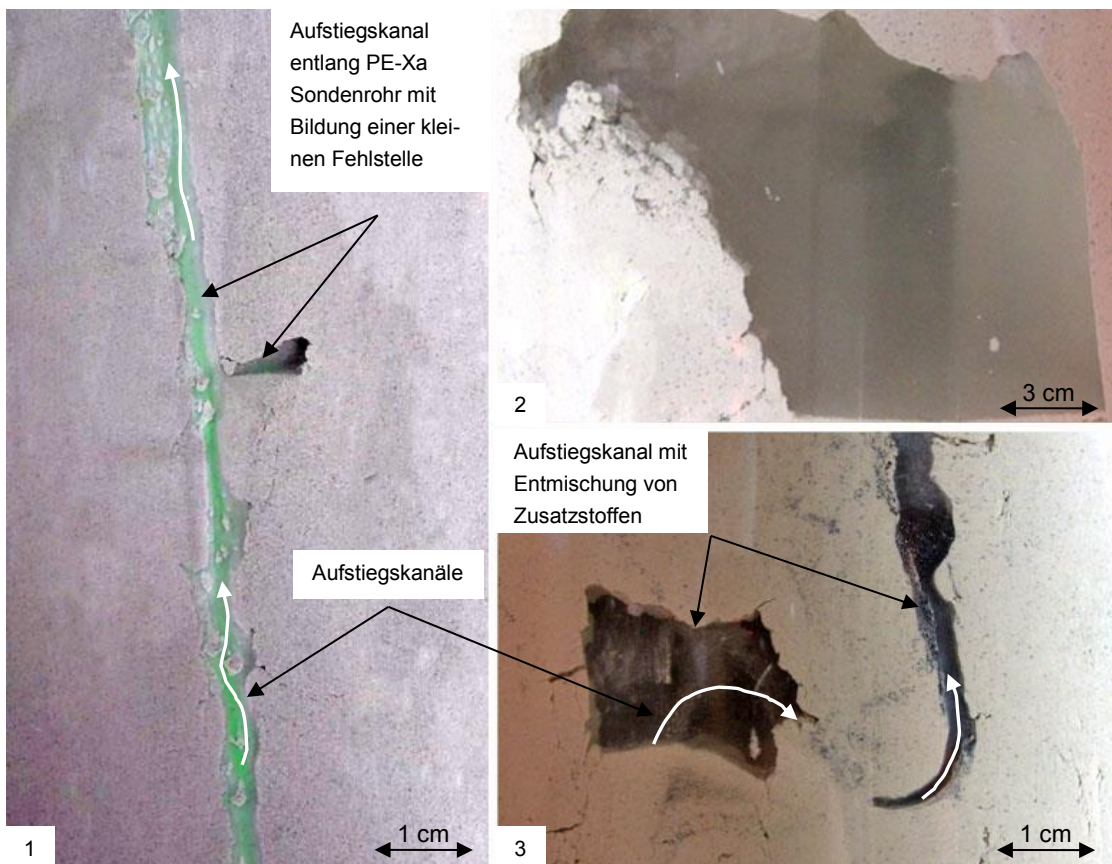


Abbildung 4-17: Beispiele von Aufstiegsbewegungen von Filtratwasser entlang von schmalen Aufstiegskanälen an Sondenrohren (1 und 3). Bildung einer Fehlstelle aufgrund von Brückenbildung (2)

Entmischungsprozesse und Wasseraufstiegsbewegungen konnten baustoffabhängig unmittelbar nach Abschluss des Verfüllvorgangs bis wenige Stunden nach Ende des Verfüllvorgangs beobachtet werden. Die Bilderfolgen der Langzeitdokumentationen zeigen, dass sich die in den Versuchs-EWS bereits nach kurzer Zeit entstandenen Verfüllqualitätsmängel in den folgenden 12 Stunden nicht weiter vergrößert haben. In Anhang 7 ist eine exemplarische Langzeitdokumentation des Aushärtvorgangs von EWS 8-3 für den Zeitraum von 5 Stunden bis 10 Stunden nach Verfüllende dargestellt.



Abbildung 4-18: Vollständige Verdrängung des im „Bohrloch“ befindlichen Wassers

Die Bildung von größeren, wassergefüllten Hohlräumen (d.h. von Fehlstellen) ist ebenso wie bei den Aufstiegskanälen ein Prozess, der auf die ersten Stunden nach Verfüllende beschränkt ist. Grund für die Ausbildung dieser, meist in der oberen Hälfte der Versuchs-EWS auftretenden Fehlstellen sind vermutlich Brückenbildungen innerhalb der Suspension, die das Aufsteigen entmischten Wassers aus dem Baustoff verhindern. Zum Teil konnte beobachtet werden, dass Fehlstellen, die sich kurz nach Verfüllende ausgebildet haben, sich abrupt durch das Absacken des darüber befindlichen Baustoffs wieder schließen. Aufgrund des Auftretens von großen Fehlstellen in zuvor nicht wassergefüllten Versuchssonden (EWS 5-2) kann ausgeschlossen werden, dass es sich bei dem Wasser in den Fehlstellen als auch dem Wasser, das nach dem Verfüllvorgang in den Aufstiegskanälen zu beobachten war, um nicht vollständig verdrängtes Wasser aus dem Bohrloch handelt. Das deckt sich mit den Beobachtungen der Verfüllvorgänge, bei denen teilweise eine deutliche Grenzschicht zwischen der Verfüllsuspension und dem aus dem „Bohrloch“ verdrängten Wasser vorhanden war (Abbildung 4-18). Es hat sich gezeigt, dass die Sondenometrie bzw. der Sondenrohrverlauf bei der Ausbildung von Fehlstellen eine entscheidende Rolle

spielt. So kann unter Umständen ein ungünstiger Sondenverlauf dazu führen, dass das nach oben aufsteigende Wasser in einem Bereich, in dem beispielsweise alle Sondenrohre zusammenlaufen und dicht zusammenliegen „hängen bleibt“ und eine Fehlstelle bildet. Diese Beobachtungen decken sich mit den Versuchen der neunten Versuchsreihe, die gezeigt haben, dass bei Technikumsversuchen ohne eingebauter Erdwärmesonde weniger Fehlstellen auftreten, das Absetzen im oberen Bereich des „Bohrlochs“ dafür allerdings größer ist (EWS 9-3 und EWS 9-4). Im Vergleich dazu bildete sich bei EWS 9-1 mit eingebauter 2-U-EWS, unter ansonsten gleichbleibenden Versuchsrandbedingungen, eine Fehlstelle bei gleichzeitiger Häufung von Aufstiegskanälen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass aus dem Baustoff entmischtes Wasser bei dem Technikumsversuch ohne Erdwärmesonden ungestört bis nach oben aufsteigen konnte und bei dem Technikumsversuch mit eingebauter Erdwärmesonde aufgrund des dortigen (womöglich ungünstigen) Sondenrohrverlaufs nicht bis nach ganz oben aufsteigen konnte und im oberen Drittel der Versuchs-EWS zur Bildung einer Fehlstelle geführt hat. Bei den Versuchen ohne Erdwärmesonde bildeten sich vermutlich durch das Fehlen der Sondenrohre kaum Fließkanäle an der „Bohrlochwand“. Das entmischte Wasser steigt in diesem Fall also entweder diffus verteilt oder über schwer visuell erkennbare, im „Bohrlochinneren“ vorliegenden Aufstiegskanäle auf. In weniger ausgeprägter Form kann das beschriebene Aufstiegsverhalten von Wasser und die verminderte Bildung von Fehlstellen bei der Verwendung von Koaxial-EWS beobachtet werden (Versuchsreihe 8).

So führte die Verwendung von Koaxial-EWS bei zwei von drei Versuchen zu einer Verbesserung der Verfüllqualität gegenüber entsprechenden 2-U-EWS. Bei EWS 5-1 (Verfüllbaustoff 8) und

EWS 8-4 (Verfüllbaustoff 15) ist die Gesamtnote durch die Verwendung einer Koaxial-EWS im Vergleich zu den entsprechenden, mit Standard-Versuchsbedingungen untersuchten 2-U-EWS (EWS 1-1 und EWS 2-2 bzw. EWS 8-1) um ein bis zwei Noten besser. Grund für die bessere Verfüllqualität ist womöglich die einfachere Sondengeometrie von Koaxial-EWS gegenüber 2-U-EWS (1 Sondenrohr anstelle von 4 Sondenrohren). Bei EWS 8-3, bei der eine Koaxial-EWS mit gewelltem Außenrohr zum Einsatz kam, wurde die Verfüllqualität im Vergleich zu den Standard-Versuchsbedingungen gleich bewertet. Demnach ist durch den Einsatz von Koaxial-EWS tendenziell eine bessere Verfüllqualität zu erzielen, wobei aufgrund der geringen Gesamtanzahl von Versuchen bisher keine allgemeingültige Empfehlung ausgesprochen werden kann.

Bei dem Vergleich der Verfüllqualität von 2-U-EWS aus PE 100 und 2-U-EWS aus aufgerautem PE-Xa konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Obwohl die Anhaftung des Baustoffs bei den aufgerauten PE-Xa-EWS im Vergleich zu den EWS aus PE 100 besser ist, kann das Entmischen der Baustoffe dadurch erwartungsgemäß nicht verhindert werden.

Der Einfluss der Verfüllgeschwindigkeit auf die Verfüllqualität ist vernachlässigbar (siehe Versuch EWS 1-1, EWS 1-3 und EWS 1-4). Wie die Versuche EWS 6-3, EWS 6-4 und EWS 7-1 zeigen, spielt die Nachmischzeit ebenso eine untergeordnete Rolle für die resultierende Verfüllqualität. Bei diesen Versuchen wurde für Verfüllbaustoff 13 kein erheblicher Qualitätsunterschied zwischen Nachmischzeiten von 5 Sekunden, 60 Sekunden und 240 Sekunden festgestellt. Wichtig dabei zu erwähnen ist, dass sowohl die Verfüllgeschwindigkeit als auch die Nachmischzeit nur für einen Verfüllbaustoff untersucht wurde. Aufgrund der großen Heterogenität der Verfüllbaustoffe ist nicht auszuschließen, dass andere Verfüllbaustoffe womöglich sensitiver auf Veränderungen der Nachmischzeit oder der Verfüllgeschwindigkeit reagieren.

4.5.1. Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass der gewählte Technikumsversuchsaufbau geeignet ist, das Verständnis der Fehlstellenentstehung bei der Verfüllung von Erdwärmesonden wesentlich zu verbessern. Die Ergebnisse von Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-6 zeigen, dass die Verfüllqualität in Abhängigkeit der Versuchsrandbedingungen stark variieren kann und insbesondere vom verwendeten Verfüllmaterial abhängt. Abbildung 4-19 zeigt eine Übersicht der Notenbewertung der Verfüllqualität aller 11 unter Standardbedingungen durchgeführten Technikumsversuche. Bei diesen 11 Technikumsversuchen wurden 10 verschiedene Verfüllbaustoffe untersucht (VB 8: EWS 1-1 bzw. EWS 2-2, VB 2: EWS 3-1, VB 2 modifiziert: EWS 4-3, VB 3: EWS 5-3, VB 7: EWS 6-1, VB 7 modifiziert: EWS 6-2, VB 13: EWS 6-3, VB 13 modifiziert: EWS 7-2, VB 15: EWS 8-1 und VB 9: EWS 9-1), wobei drei der Materialien durch den Hersteller gegenüber der ursprünglichen Rezeptur modifiziert waren. Mögliche Abwertungen aufgrund eines hohen Absetzens im Bohrloch sind hier nicht berücksichtigt, sodass die Übersicht rein die Qualität des verfüllten Bereiches widerspiegelt. Es hat sich gezeigt, dass insgesamt sieben dieser Baustoffe (entsprechen 64 %) mit *gut* bis *befriedigend* und vier dieser Baustoffe (entsprechen 36 %) mit *ausreichend* bis *mangelhaft* bewertet wurden. Damit wird deutlich, dass die Anzahl an „guten“ EWS (schlechtestenfalls Note 3) größer ist als die „schlechten“ EWS (Note 4 und schlechter).

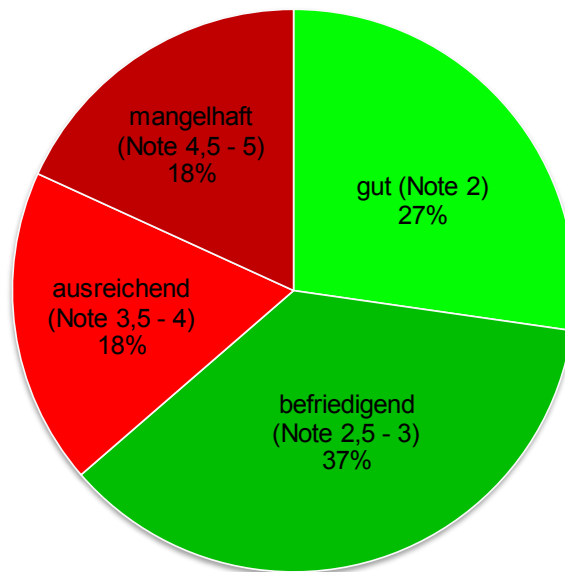


Abbildung 4-19: Prozentuale Verteilung der Noten der 11 unter Standardversuchsbedingungen durchgeführten Technikumsversuche

In Abbildung 4-20 sind beispielhaft Versuchsstücke mit sehr guter Verfüllqualität dargestellt. Der einzige mit der Note 5 bewertete Verfüllversuch führte laut Baustoffhersteller zu einer Anpassung der Rezeptur.

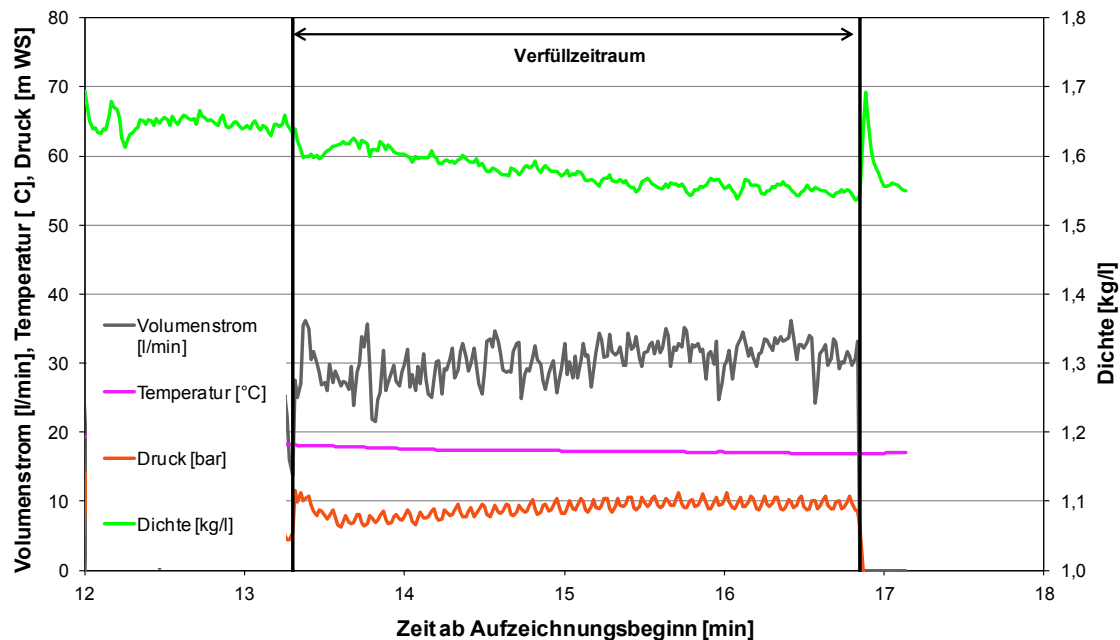


Abbildung 4-20: Exemplarische Darstellung von Versuchsstücken mit sehr guter Verfüllqualität (von links nach rechts: EWS 5-3, EWS 6-2, EWS 8-2)

Mit Hilfe der durchgeführten Technikumsversuche konnte gezeigt werden, dass die Verfüllqualität im Wesentlichen durch die **Wahl des Verfüllbaustoffs**, die **Wahl der Misch- und Verfüllanlage** sowie die **Sondengeometrie** bestimmt wird.

Im Falle der Verfüllbaustoffe sind deutliche produktabhängige Qualitätsunterschiede erkennbar, wobei kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Verfüllqualität und Baustoffkategorie erkennbar ist. Thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe auf Quarzsandbasis tendieren jedoch eher zum Entmischen und zur Bildung von Kanalstrukturen als Standardverfüllbaustoffe und durch andere Zusätze thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe.

Bezogen auf die Untersuchungen hinsichtlich der Misch- und Verfülltechnik hat sich gezeigt, dass der Einsatz eines Kolloidalmischers im Vergleich zu einem Durchlaufmischer zu geringeren Absetzmaßen führt. Zusätzlich ist es mit Kolloidalmischern möglich, Suspensionsdichten durch die Probenahme aus dem Vorratsbehälter einfacher zu überprüfen als bei Durchlaufmischern. Bei einem Versuch mit einem Durchlaufmischer hat sich beispielsweise bei der späteren Analyse der während des Verfüllvorgangs aufgenommenen Daten gezeigt, dass sich ohne Änderung der Wasserzugabe die Suspensionsdichte im Laufe des Verfüllzeitraums stetig von 1,65 kg/l auf 1,54 kg/l verringert hat (Abbildung 4-21).



Verfülldauer: 3,55 min

Mittlere Suspensionsdichte: 1,58 kg/l

Mittlere
Suspensionstemperatur: 17,3 °C

Mittlerer Verfüllvolumenstrom: 30,3 l/min

Eingebrachtes Suspensionsvolumen: 107 l

Abbildung 4-21: Datenaufnahme des Verfüllvorgangs von EWS 3-3 mit einem Durchlaufmischer mit stetiger Abnahme der Suspensionsdichte ohne Änderung der Wasserzugabe

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass der Einfluss der Sondengeometrie auf die Verfüllqualität groß ist. So können sich beispielsweise bei einer 2-U-EWS, bei der die Sondenrohre an der Bohrlochwand anliegen, in diesem Bereich Kanalstrukturen bevorzugt ausbilden. Im Vergleich dazu wird durch die Verwendung einer Koaxialsonde aufgrund der einfacheren Sondengeometrie (1 Sondenrohr anstelle von 4 Sondenrohren) die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Aufstiegskanälen und Fehlstellen reduziert. Hinsichtlich einer möglichen Verbesserung durch die

Verwendung von Zentrierhilfen hat sich analog zu den Untersuchungen von Riegger (2013) gezeigt, dass mit dem in diesem Versuch eingesetzten Verfüllbaustoff sich die Anzahl der Aufstiegskanäle nicht erheblich reduziert hat. Vielmehr wurde festgestellt, dass die Zentrierhilfen das aus dem Baustoff austretende Wasser zum Teil daran hinderten aufzusteigen und als „geometrische Unregelmäßigkeiten im Bohrloch“ die Bildung von Fehlstellen begünstigten (siehe Abbildung 4-22).

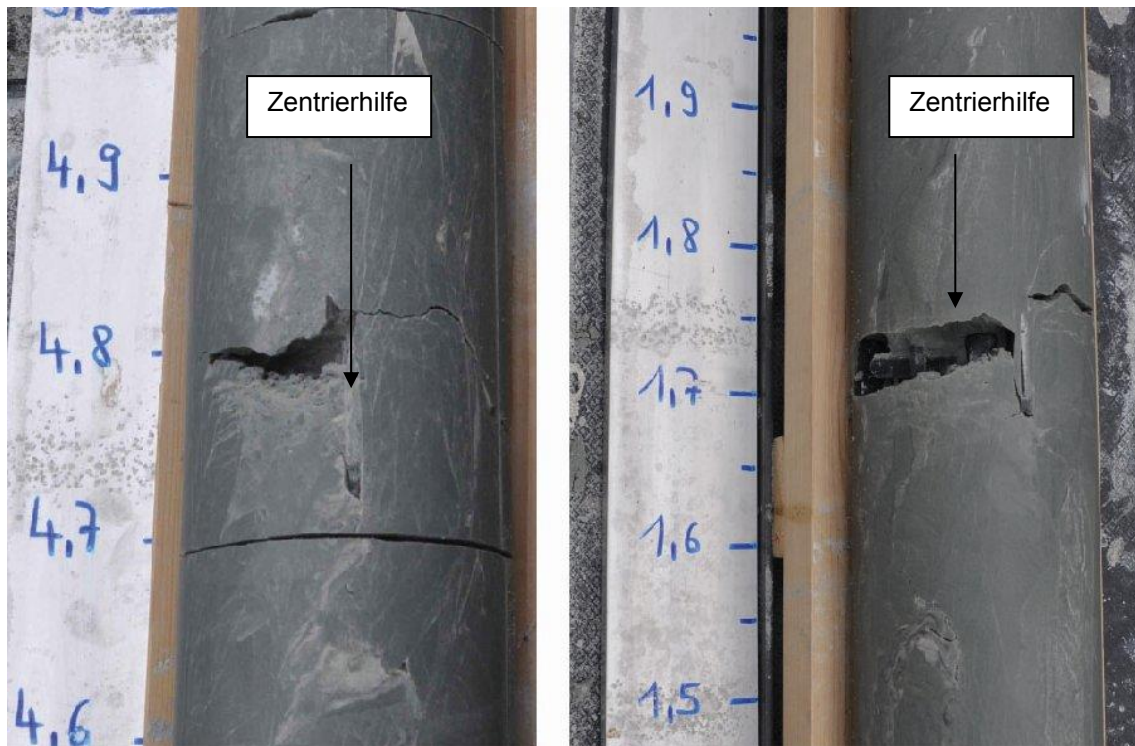


Abbildung 4-22: Kleinere Fehlstellen in unterschiedlichen Höhen jeweils im Bereich von eingebauten Zentrierhilfen bei EWS 4-2

Ein weiteres Ergebnis der Technikumsversuche ist, dass sich die in diesem Anwendungsbereich erstmals eingesetzte Kombination aus einem Coriolis-Messgerät nach dem Geradrohrprinzip und einem Drucksensor sehr gut zur Dokumentation des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden eignet. Parameter wie der Verfüllvolumenstrom, die Suspensionsdichte, die Suspensionstemperatur und der Verfülldruck können für die Qualitätsüberwachung von EWS-Verfüllvorgängen wichtige Zusatzinformationen liefern. Einen Ersatz für die automatische Abdichtungsüberwachung gemäß den Leitlinien Qualitätssicherung EWS (LQS EWS) (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2015) stellt dieses Vorgehen nicht dar.

5. REALMAßSTABSVERSUCHE (SOLITES)

5.1. Untersuchungsziele

Die Realmaßstabsversuche dienen zur Überprüfung und Verifizierung der im Labor- und Technikumsmaßstab ermittelten Erkenntnisse im Realmaßstab. Ziel war es, die Ergebnisse der Technikumsversuche mit den Ergebnissen aus 30 m tiefen Versuchs-EWS unter gleichbleibender Versuchskonfiguration zu vergleichen.

5.2. Erstellung des Realmaßstabsversuchsgeländes

Um die geplanten 8 Realmaßstabsversuche zeiteffizient ausführen zu können, wurde ein Versuchsgelände mit zwei verrohrten Bohrungen erstellt, in die Erdwärmesonden eingebaut und nach Durchführung verschiedener Versuche zerstörungsfrei wieder rückgebaut werden können. Dafür wurde eine Versuchsanlage konzipiert, die einen konzentrischen Einbau zweier unterschiedlich großer Rohrtouren und den späteren Ausbau der inneren Rohrtour ermöglicht. Zusätzlich wurde bei der Auslegung der Versuchsanlage das für die späteren Versuche bezüglich der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden notwendige Umwälzsystem berücksichtigt, das eine Wasserzirkulation bis zum untersten Punkt der Versuchsbohrung und eine Temperierung des Wassers im Ringraum ermöglicht.

Der Standort des Versuchsgeländes befindet sich auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in unmittelbarer Nähe zum Institutsgebäude der Angewandten Geowissenschaften.

Die infrastrukturellen Gegebenheiten sind sehr gut für die Versuchsdurchführung geeignet, da die Versuchshalle, in der die Technikumsversuche durchgeführt wurden, direkt angrenzt und somit ein schneller und einfacher Transport der benötigten Gerätschaften möglich ist. Dies hat zum Vorteil, dass die benötigten Geräte nur einmal angeschafft werden mussten und parallel an Technikums- und Realmaßstabsversuchen gearbeitet werden konnte. Ebenso vorteilhaft ist die einfache Anbindung an das Strom-, Wasser- und Internetnetz des KIT sowie eine gute Zufahrtsmöglichkeit über den nördlich angrenzenden Waldparkplatz, was die Materialanlieferung und die Entsorgung der großen Mengen an anfallendem ausgehärtetem Baustoff und PE stark erleichtert. Die Nähe des Realmaßstabsversuchsgeländes zu den Laboren der Projektpartner am KIT ermöglicht zusätzlich die Laboruntersuchungen von Suspensionen, die mit den Baustellenmischern angemischt werden.

Da das Versuchsgelände weder Besitz noch Eigentum von Solites ist, wurde ein Gestattungsvertrag zwischen Solites und dem durch den Landesbetrieb Vermögen und Bau Baden-Württemberg vertretenen Land Baden-Württemberg geschlossen, der die Nutzung des Versuchsgeländes durch Solites regelt.

Die in Abbildung 5-1 veranschaulichte Erstellung der beiden Bohrungen (Ost- und West-Bohrung) erfolgte im Dezember 2014. Gemäß der vorliegenden Bohrgenehmigung war eine maximale Bohrtiefe von 30 m erlaubt. Die beiden Bohrungen wurden als Greiferbohrungen DN 620 ohne Spülmittelzusätze erstellt (Abbildung 5-1 Bild 1). Beim Greiferbohrverfahren ist die Verwendung

einer Bohrverrohrung erforderlich, um das Nachfallen des nicht standfesten Untergrunds in das entstehende Bohrloch zu verhindern. Neben der geologischen Aufnahme durch das Bohrunternehmen erfolgte zusätzlich durch die Projektpartner AGW und EIFER eine detaillierte geologische Erfassung inklusive Probenahme.

Den unteren Abschluss des Außenrohrs bildet der Edelstahlfuß, an dem das hoch spannungs- und punktlastbeständige PE-Xa Umwälzrohr dauerhaft dicht mit Hilfe einer Schiebehülsenverbindung angebracht ist (Abbildung 5-1 Bild 2). Um (Kontakt-)Korrosion zu vermeiden sind sowohl die Schiebehülsenverbindung als auch der Edelstahlfuß (Abbildung 5-1 Bild 3) als Sonderanfertigung einheitlich aus dem Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 hergestellt.

Zur Abdichtung der Gewindeverbindungen der PVC-Außenroherelemente untereinander sowie mit dem Edelstahlfuß wird eine Kombination verschiedener Abdichtungstechnologien eingesetzt: Zum einen wird auf die Außengewinde vor dem Einschrauben in die Innengewinde eine Dichtmasse aufgetragen (Abbildung 5-1 Bild 4). Zum anderen werden die verschraubten Gewindeverbindungen mit mehreren überlappenden Wicklungen eines selbstverschweißenden, druckbeständigen Silikondichtbands umwickelt. Zusätzlich dienen Schrumpfschläuche (Abbildung 5-1 Bild 5) als mechanischer Schutz der Silikondichtbänder beim Einbau der Außenrohre in die Bohrungen als auch beim Ziehen der Bohrverrohrung, das nach dem vollständigen Einbau der Außenrohre erfolgt. Nach Beendigung der Bohrarbeiten wird in die Bohrverrohrung das dauerhaft im Untergrund verbleibende, abgedichtete Außenrohr mit den daran angebrachten Rohren und Messfühlern (PE-Xa Umwälzrohr, Pegelrohr, Hybrid-Glasfaserkabel, Pt100-Temperatursensoren) eingebracht (Abbildung 5-1 Bild 6).



Abbildung 5-1: Ablauf der Arbeiten für die Erstellung der Realmaßstabsversuchsbohrungen. 1: Bohrarbeiten im Greiferbohrverfahren; 2: Anbringung der Edelstahlschiebehülse an der Verbindung Umwälzrohr-Edelstahlfuß; 3: Fertiggestellter Edelstahlfuß mit angebrachtem Umwälzrohr; 4: Abdichtung der TNA-Gewindeverbindungen (Trapezgewinde nicht auftragend) durch das Auftragen einer Dichtmasse im Außengewinde und (5) Anbringung eines Schumpfschlauchs als mechanischer Schutz; 6: Einbau des PVC-Außenrohrs inklusive Umwälzrohr, Glasfaserkabel und Pegelrohr zur Messung des Grundwasserstands

Das fertiggestellte Versuchsgelände ist in Abbildung 5-2 zu sehen. Das im Versuchscontainer eingebaute Umwälz- und Temperiersystem, das zusätzlich zu einem Thermal Response Test Gerät zur Bestimmung der thermischen Effizienz der im Versuchsstand eingebauten Erdwärmesonden erforderlich ist (s. Abschnitt 5.6.2), wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden“ (Koenigsdorff et al. 2016) weiterentwickelt und unter anderem um eine zentrale Messdatenerfassung und Steuerung ergänzt.

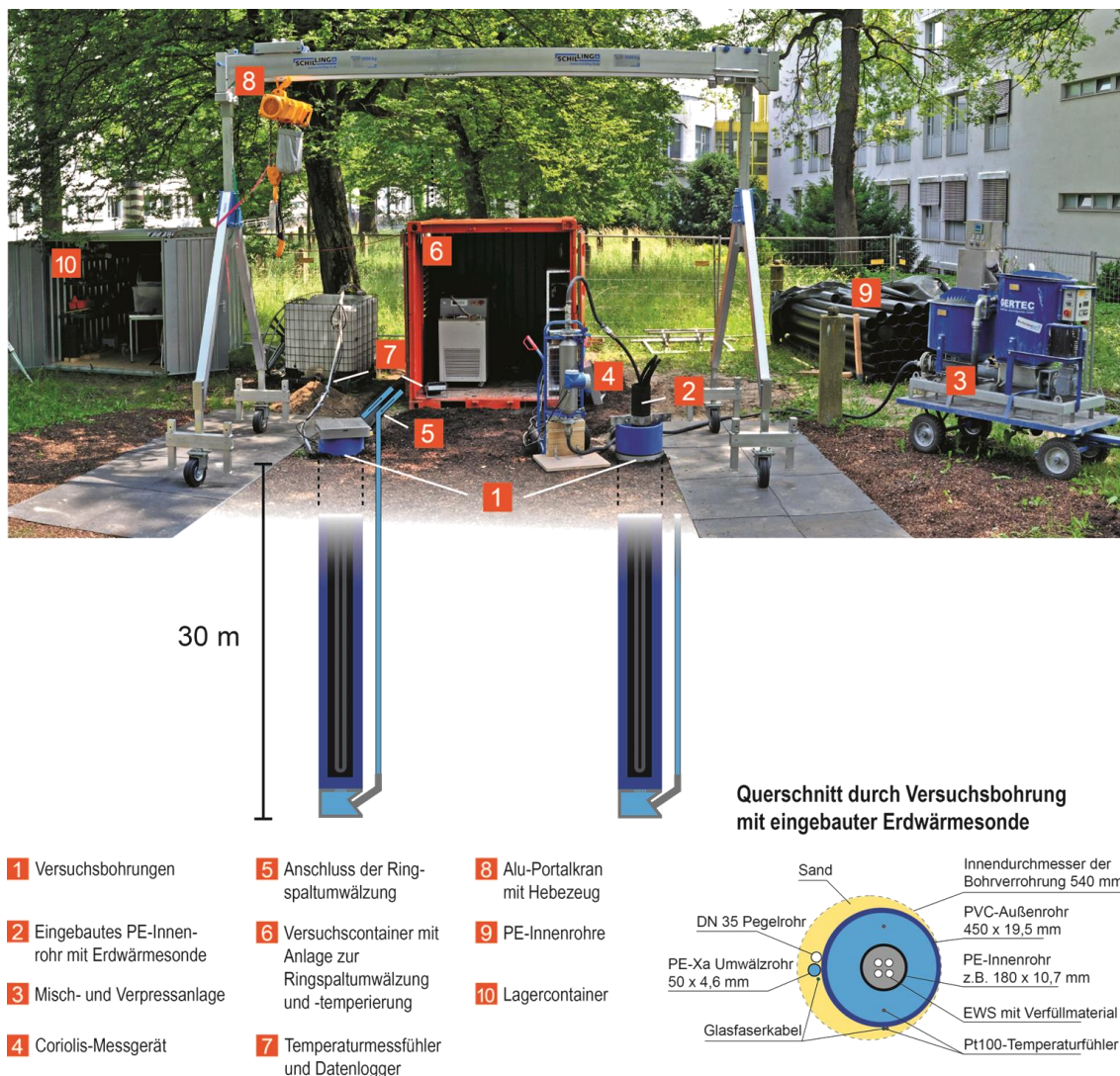


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung des Realmaßstabsversuchsgeländes

5.3. Übersicht der durchgeführten Versuche

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 8 Realmaßstabsversuche durchgeführt. Ziel war es, die Ergebnisse aus den Technikumsversuchen im Realmaßstab zu verifizieren. Dafür wurden die in Kapitel 4.5 aufgeführten wesentlichen Einflussfaktoren auf die Verfüllqualität hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den Realmaßstab untersucht. Unter Standardbedingungen wurden insgesamt vier unterschiedliche Verfüllbaustoffe untersucht. Bis auf die Verwendung von PE-Innenrohren anstelle von PMMA-Rohren als „Bohrloch“ und der mit ca. 158 mm etwas größeren Bohrl Lochdurchmesser, sind die Standard-Versuchsbedingungen bei den Realmaßstabsversuchen identisch zu denen der Technikumsversuchen (vgl. Abschnitt 4.3).

Eine Übersicht der durchgeführten Realmaßstabsversuche ist in Tabelle 5-1 dargestellt, wobei die in orange geschriebenen Eigenschaften die Änderung zu den Standard-Versuchsbedingungen darstellen. Die Versuche sind fortlaufend nummeriert, wobei die in der Versuchsbezeichnung

zusätzlich aufgeführte Ergänzung „O“ bzw. „W“ beschreibt, ob die Versuchs-EWS in der Ost- bzw. West-Bohrung eingebaut wurde.

Tabelle 5-1: Übersicht der durchgeführten Realmaßstabsversuche (die farblich geschriebenen Eigenschaften beschreiben die Änderungen zu der Standard-Versuchsrandbedingung)

	Verfüll- baustoff	Nachmischzeit	W/F-Verhältnis	Verfüllge- schwindigkeit	Weitere Variationen in den Versuchsrandbedingungen
EWS 1-O	8	90 s	nach Datenblatt	ca. 40 l/min	
EWS 2-W	13*	90 s	nach Datenblatt	ca. 40 l/min	
EWS 3-O	9	40 s	nach Datenblatt	ca. 40 l/min	
EWS 4-W	9	40 s	nach Datenblatt	ca. 40 l/min	Koaxial-EWS (ø: 140 mm)
EWS 5-O	3	90 s	nach Datenblatt	ca. 40 l/min	
EWS 6-W	3	keine	Dichte nach Datenblatt	ca. 35 l/min	Durchlaufmischer
EWS 7-O	7*	keine	Dichte nach Datenblatt	ca. 60 l/min	Silomischer / Fördermischpumpe, 2-U-EWS aus PE-Xa
EWS 8-W	7*	keine	Dichte nach Datenblatt	ca. 60 l/min	Silomischer / Fördermischpumpe, Koaxial-EWS gewellt (ø: 63 mm)

*: gegenüber dem entsprechenden Originalprodukt durch den Hersteller modifizierter Verfüllbaustoff

Ausgehend von Standard-Versuchsbedingungen wurde sowohl der Einfluss der Misch- und Verfülltechnik, als auch der Einfluss der Sondengeometrie untersucht. Zur Untersuchung des Einflusses der Sondengeometrie kamen neben der im Standardfall verwendeten 2-U-EWS zwei Koaxial-EWS mit unterschiedlichen Durchmessern zum Einsatz. Bei EWS 4-W wurde eine Koaxial-EWS mit einem Außendurchmesser von 140 mm eingesetzt und in EWS 8-W eine Koaxial-EWS mit einem Außendurchmesser von 63 mm. Angepasst an die Größe der Koaxial-EWS erfolgte der Einbau der Koaxial-EWS in PE-Innenrohre mit Innendurchmessern von 198 mm bzw. 123 mm. Als zusätzliche Untersuchung hinsichtlich der verwendeten Sondenart wurde in EWS 7-O eine 2-U-EWS aus PE-Xa verwendet. Um den Einfluss der Mischtechnik zu untersuchen kam neben dem auch bei einzelnen Technikumsversuchen verwendeten Durchlaufmischer zusätzlich ein Silomischer zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine unter einem Baustoffsilos angebrachte Fördermischpumpe, bei der ähnlich zu dem verwendeten Durchlaufmischer die Dichte der Verfüllsuspension über die Einstellung der Wasserdurchflussmenge eingestellt wird (Abbildung 5-3).



Abbildung 5-3: Übersicht der bei den Realmaßstabsversuchen verwendeten Misch- und Verfüllanlagen

Bei der Durchführung des ersten (EWS 1-O) und vierten (EWS 4-W) Realmaßstabsversuches kam es jeweils zu Havarien, d. h. zum Austritt großer Mengen Verfüllsuspension in den Versuchsaufbau, was auf die Instabilität der Gewindeverbindungen der PE-Innenrohre zurückzuführen war. Beim späteren Ausbau hat sich gezeigt, dass der PE-Innenrohrstrang an der Gewindeverbindung durch Zugkräfte, die entweder aus der Gewichtskraft der Verfüllsuspension oder aus abgefangenen Auftriebskräften der wassergefüllten Sondenrohre resultierten, auseinandergerissen wurde.

Die beiden zugehörigen Versuche sind daher nicht bzw. nur eingeschränkt auswertbar. Glücklicherweise konnte unter sehr hohem Aufwand der Versuchsaufbau vor einer Zerstörung durch darin aushärtende Suspension bewahrt werden. Um bei zukünftigen Versuchen Havarien zu verhindern, wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen. So wurden die PE-Innenrohre anstelle eines hängenden Einbaus bei den folgenden Realmaßstabsversuchen auf dem Edelstahlfuß des

PVC-Außenrohrs aufgestellt. Zusätzlich wurden beim Einbau der PE-Innenrohre die Gewindeverbindungen verschweißt. Für diese Arbeit wurde ein Schweißtechniker beauftragt, der beim Einbau der Innenrohre die Gewindeverbindungen im Warmgasschweißverfahren verschweißte (siehe Abbildung 5-4). Um zur Rettung des Versuchsaufbaus im Fall einer Havarie schnell reagieren zu können, wurde der Zugang zu einem in der Nähe befindlichen Wasserhydranten ermöglicht, mit dem im Notfall der Versuchsaufbau mit höheren Volumenströmen ausgespült werden kann. Zusätzlich wurde ein Notfallpumpsystem mit einer Schmutzwasserpumpe realisiert, die in das Bohrloch hinabgelassen werden kann, um dort absinkende schwere Mischungsbestandteile abpumpen zu können. Nach Einführung der Maßnahmen zur Verhinderung / Beherrschung von Havarien wurden bei den folgenden Versuchen keine weiteren Probleme festgestellt.



Abbildung 5-4: Warmgasschweißen der PE-Innenrohre beim Einbau der PE-Innenrohre

5.4. Exemplarische Darstellung eines Versuchsablaufs

In der Bilderfolge von Abbildung 5-6 ist der Ablauf eines Realmaßstabsversuchs zur Untersuchung der Verfüllqualität von 30 m tiefen Erdwärmesonden dargestellt. Analog zu Kapitel 4.3 werden der Versuchsablauf und die Versuchsauswertung an Hand von exemplarischen Bildern und Diagrammen erläutert, die zum Teil von verschiedenen Realmaßstabsversuchen stammen.

Bei der Vorbereitung eines Realmaßstabsversuchs werden 7 PE-Rohre mit einer Länge von jeweils 4,35 m, die später das „Bohrloch“ nachbilden, in die PVC-Außenrohre eingebaut (Abbildung 5-6 Bild 1). Dabei werden die Gewindeverbindungen ähnlich zu den PVC-Außenrohren mit einer Dichtmasse und einem selbstverschweißenden Silikondichtband abgedichtet. Wie im obigen Abschnitt erläutert, wurden die Gewindeverbindungen bei EWS 5-O bis EWS 8-W zusätzlich noch von einem Schweißtechniker verschweißt. Die Rohrenden der untersten PE-Rohre wurden mit einem druckbeständigen, eingeschweißten Boden versehen. Zusätzlich wurde an jeder Gewindeverbindung eine Edelstahlzentrierung angebracht, die einen zentralen Einbau des Innenrohrs in das Außenrohr gewährleistet und bei dem späteren TRT ein gleichförmiges Umströmen des Innenrohrs mit dem temperierten Wasser der Ringspaltumwälzung ermöglicht. Daneben wurden die Edelstahlzentrierungen als Befestigungspunkte der Pt100 – Temperaturfühler verwendet, um diese zentral im Ringraum zwischen Innen- und Außenrohr zu positionieren (Abbildung 5-6 Bild

2). Die Pt100 – Temperaturfühler dienen bei den Versuchen zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Erdwärmesonden zur Ermittlung der mittleren Ringspalttemperatur. Für eine möglichst genaue Mittelwertbestimmung der Ringspalttemperatur wurden jeweils 2 Temperaturmessketten mit Temperaturfühlern in den Tiefen von 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m und 30 m eingebaut.

Nach dem Einbau der Innenrohre und der Anbringung der Edelstahlzentrierungen wurden die Sondenrohre mit Hilfe einer Einbauhaspel eingebaut (Abbildung 5-6 Bild 3). Im Gegensatz zu den Technikumsversuchen wurden die Erdwärmesonden mit Sondenfüßen eingebaut, um in diesen bei der späteren Durchführung von TRTs das Wärmeträgerfluid zirkulieren zu können. Neben den sechs mit 2-U-EWS durchgeführten Realmaßstabsversuchen wurden zwei Versuche mit Koaxial-EWS (EWS 4-W und EWS 8-W) durchgeführt, wobei der Einbau der bei EWS 4-W eingesetzten Koaxial-EWS mit einer Einbauhaspel aufgrund des großen Durchmessers von 140 mm nicht möglich ist. Beim Einbau dieser Koaxial-EWS müssen im ersten Schritt die einzelnen Sondenstücke (hier ca. 5 m lang) verschweißt (Abbildung 5-5 links) und anschließend in das Bohrloch herabgelassen werden (Abbildung 5-5 rechts).



Abbildung 5-5: Einbau der Koaxial-EWS von EWS 4-W. Links: Verschweißen der einzelnen PE-Sondenstücke; rechts: Herablassen der zusammenschweißten Koaxial-EWS in das „Bohrloch“

Analog zu den Technikumsversuchen wird zur Dokumentation des Verfüllvorgangs (Abbildung 5-6 Bild 4) die Suspension erst durch das Coriolis-Messgerät und einen Drucksensor gepumpt und anschließend im Kontraktorverfahren in das zu Versuchsbeginn wassergefüllte „EWS-Bohr-

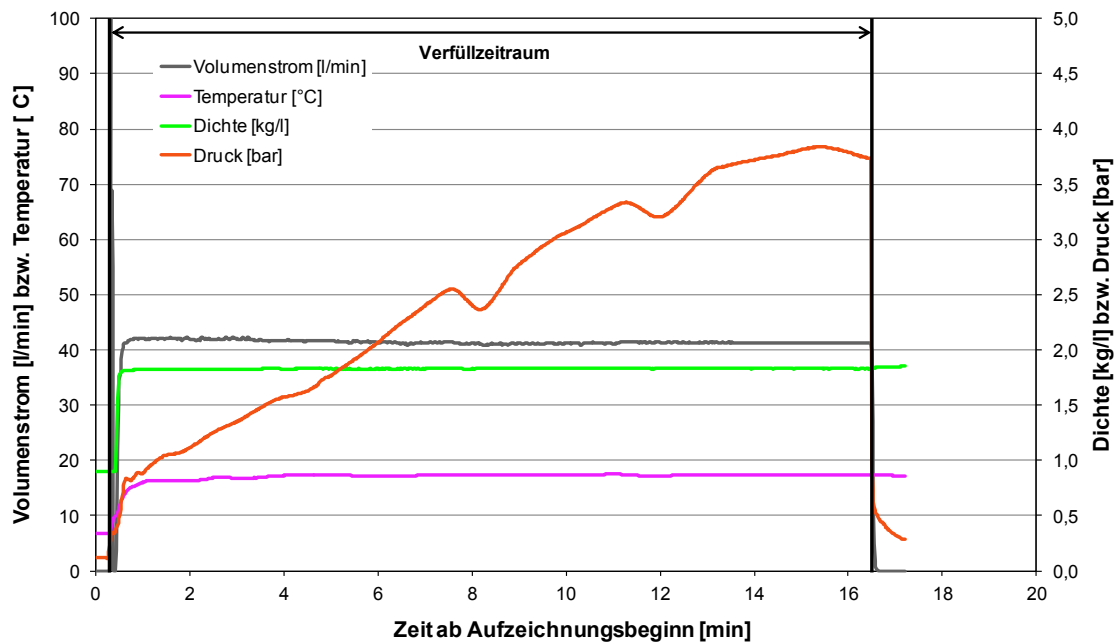
loch“ eingebracht. In Abbildung 5-7 ist eine exemplarische Datenerfassung eines Realmaßstabsversuches dargestellt (EWS 3-O). Der erwartungsgemäß mit zunehmendem Suspensionspiegel ansteigende Verfülldruck zeigt in diesem Beispiel nach ca. 8 bzw. 12 Minuten nach Aufzeichnungsbeginn einen kurzzeitigen Druckabfall. Der Druckabfall nach ca. 12 Minuten korreliert näherungsweise mit der theoretischen Verfüllzeit, die unter Berücksichtigung des Verfüllvolumenstroms ca. 12 min beträgt. Theoretisch sollte sich dann jedoch ein konstanter Druck anstelle des leichten Rückgangs einstellen. Eine Erklärung für den Druckabfall nach ca. 8 Minuten konnte bisher nicht gefunden werden.

Im Vergleich dazu ist in Abbildung 5-8 der Verfüllvorgang einer Versuchs-EWS dargestellt, die mit einem Durchlaufmischer verfüllt wurde. Der stark oszillierende Verlauf des Verfüllvolumenstroms, der Suspensionsdichte und insbesondere des Verfülldrucks belegen, dass die durch die Pumpe implizierte Schwingung einen großen Einfluss auf die Datenaufnahme hat (vgl. Abschnitt 4.5). Der in diesem Versuch maximale Verfülldruck von 10,7 bar nach 3,5 min nach Verfüllbeginn korreliert in diesem Fall nicht mit der theoretisch berechneten Verfüllzeit von ca. 4,5 Minuten.

Das beim Verfüllvorgang verdrängte Wasser sowie die zusätzlich verfüllte Menge an Suspension wurde mit Hilfe eines am oberen Ende des Innenrohres angebrachten Überlaufs (vgl. Abbildung 5-6 Bild 3 und Bild 4) in eine Absetzmulde abgeleitet. Um eine komplette Verdrängung der Durchmischungszone von Wasser und Verfüllsuspension aus dem Innenrohr zu gewährleisten, wurde bezogen auf das theoretisch berechnete Verfüllvolumen noch zusätzlich ca. 20 % an Suspensionsvolumen angemischt und verfüllt. Der Verfüllversuch wurde beendet, sobald die Dichte der am Bohrlochkopf austretenden Verfüllsuspension mit der Dichte der angemischten Verfüllsuspension bzw. mit den Herstellerangaben übereinstimmt. Nach einer Aushärtezeit von mindestens 7 Tagen und nach Abschluss der im eingebauten Zustand durchgeführten Versuche wurden die Erdwärmesonde zerstörungsfrei rückgebaut und auf ihre Verfüllqualität analysiert (Abbildung 5-6 Bild 5 und 6).

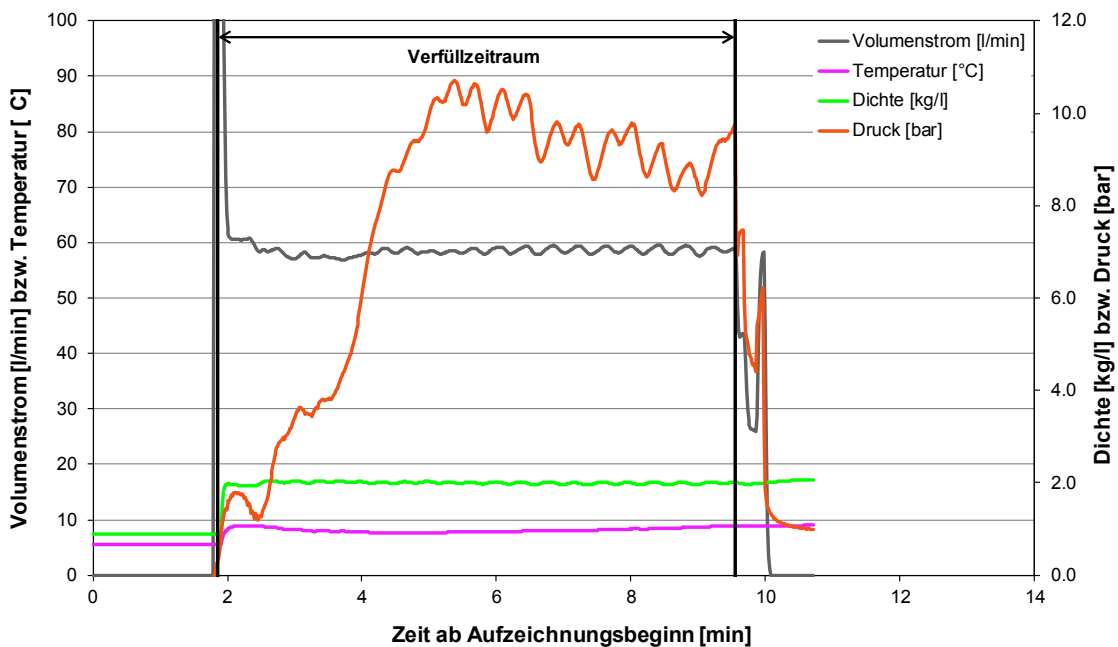


Abbildung 5-6: Ablauf eines Realmaßstabsversuches: 1: Einbau der 4,35 m langen PE-Innenrohre 2: Anbringung von Zentrierungen an jeder Gewindeverbindung der PE-Innenrohre und Befestigung der Pt100 Temperaturfühler; 3: Einbau der Sondenrohre (hier 2-U-EWS) mit einer am Portalkran aufgehängten Einbauhaspel; 4: Durchführung des Verfüllversuchs; 5 und 6: Abschnittsweiser Rückbau der Erdwärmesonde mit Analyse der Verfüllqualität



Verfülldauer: 16,2 min
 Mittlere Suspensionsdichte: 1,82 kg/l
 Mittlere Suspensionstemperatur: 17,0 °C
 Mittlerer Verfüllvolumenstrom: 41,2 l/min
 Eingebrahtes Suspensionsvolumen: 660 l

Abbildung 5-7: Kontinuierliche Datenaufnahme des Verfüllvorgangs mit dem Coriolis-Messgerät und dem Drucksensor bei Verwendung eines Kolloidalmischers (EWS 3-O)



Verfülldauer: 7.7 min
 Mittlere Suspensionsdichte: 1.99 kg/l
 Mittlere Suspensionstemperatur: 8.1 °C
 Mittlerer Verfüllvolumenstrom: 59.2 l/min
 Eingebrahtes Suspensionsvolumen: 457 l

Abbildung 5-8: Kontinuierliche Datenaufnahme des Verfüllvorgangs mit dem Coriolis-Messgerät und dem Drucksensor bei Verwendung eines Durchlaufmischers (EWS 8-W)

5.5. Untersuchungsergebnisse

5.5.1. Verfüllqualität

Die Ergebnisse der durchgeführten Realmaßstabsversuche sind in Tabelle 5-2 aufgeführt. Eine Erläuterung der angegebenen Werte und des Bewertungsschemas ist in Kapitel 4.5 (Technikumsversuche) zu finden. Die Analysen der Realmaßstabsversuche haben gezeigt, dass Verfüllqualitätsmängel, die bei den Technikumsversuchen beobachtet werden konnten und maßgeblich auf Entmischungsprozesse der Verfüllsuspensionen zurückzuführen sind, auch bei 30 m tiefen Realmaßstabsversuchen auftreten. Verfüllbaustoffe, die bei den Technikumsversuchen bereits zu Entmischungen und großen Absetzmaßen neigten, zeigten dies auch bei den Realmaßstabsversuchen, wobei aufgrund der größeren Versuchslänge das Ausmaß des Entmischungsprozesses (Häufigkeit von Aufstiegskanälen und Anzahl bzw. Größe von Fehlstellen) zunahm. So traten bei den Realmaßstabsversuchen beispielsweise Fehlstellen mit einer vertikalen Ausdehnung von bis zu 125 cm auf (Abbildung 5-9 Bild 1), während bei den Technikumsversuchen die maximale vertikale Ausdehnung 26 cm betrug (EWS 1-1; Abbildung 4-10, rechtes Bild). Darüber hinaus wurden vermehrt Fehlstellen im Inneren der Versuchs-EWS vorgefunden, was auch auf spezielle Sondenpositionen im Bohrloch zurückzuführen sein kann (Abbildung 5-9 Bild 2). Ein weiterer Unterschied zu den in den Technikumsversuchen analysierten EWS war die bevorzugte Ausbildung von Aufstiegskanälen im Inneren der Versuchs-EWS. Diese Aufstiegskanäle waren häufig durch feuchtere Peripherien gekennzeichnet und endeten oft auch direkt in einer Fehlstelle (Abbildung 5-9 Bild 3 und 4). Innen liegende Aufstiegskanäle konnten in den ausgehärteten Stücken über viele Meter beobachtet werden.

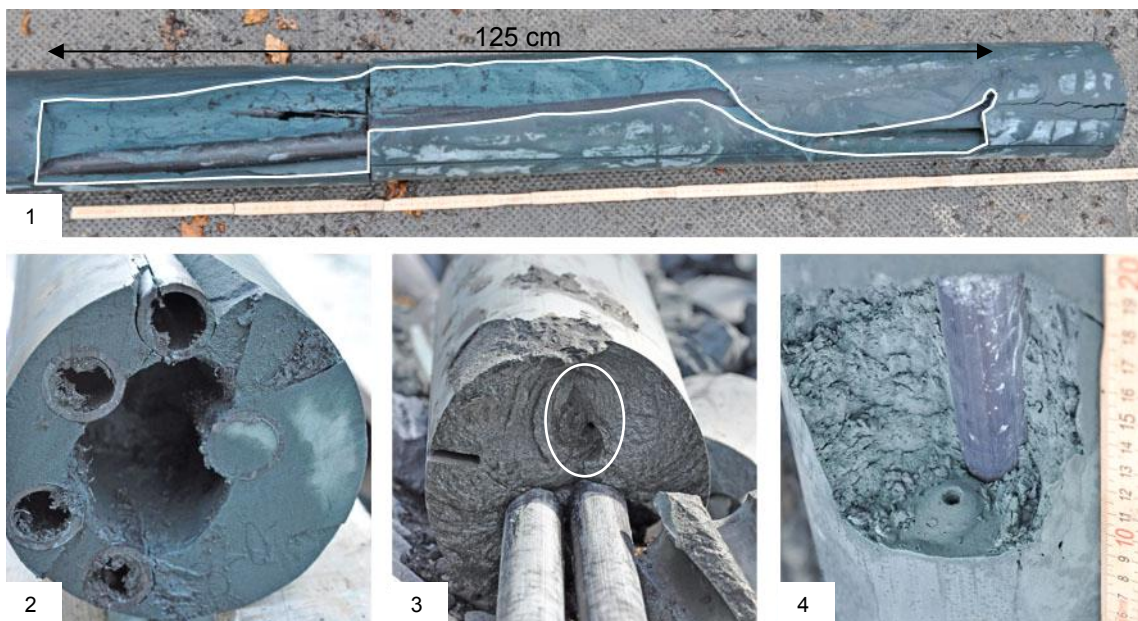


Abbildung 5-9: Auswahl exemplarischer Verfüllqualitätsmängel. 1: Fehlstelle mit einer Ausdehnung von 125 cm; 2: Fehlstelle im Zentrum des Versuchsstücks; 3: Aufstiegskanal im Zentrum des Versuchszyinders mit feuchter Peripherie; 4: Fehlstelle mit einem von unten kommendem Aufstiegskanal

Die Analyse des nur teilweise auswertbaren Realmaßstabversuches EWS 4-W zeigte erneut den großen Einfluss der Sondenrohrposition innerhalb des Bohrlochs. Die bei diesem Versuch verwendete Koaxial-EWS mit großem Durchmesser (\varnothing : 140 mm) neigte dazu, ähnlich wie andere Sondentypen (2-U-EWS, kleine Koaxial-EWS), direkt an der Bohrlochwand anzuliegen. Im Unterschied zu Sondenrohren mit deutlich geringeren Durchmessern tritt bei der Koaxial-EWS mit großem Durchmesser dabei zwangsläufig ein (bezogen auf den Bohrlochumfang) größerer Bereich mit sehr geringer Verfüllmaterialdicke in horizontaler Richtung auf, der potentiell schwierig zu verfüllen ist. Bei der Analyse hat sich gezeigt, dass in diesem Bereich häufiger Fehlstellen entstehen können (Abbildung 5-10).

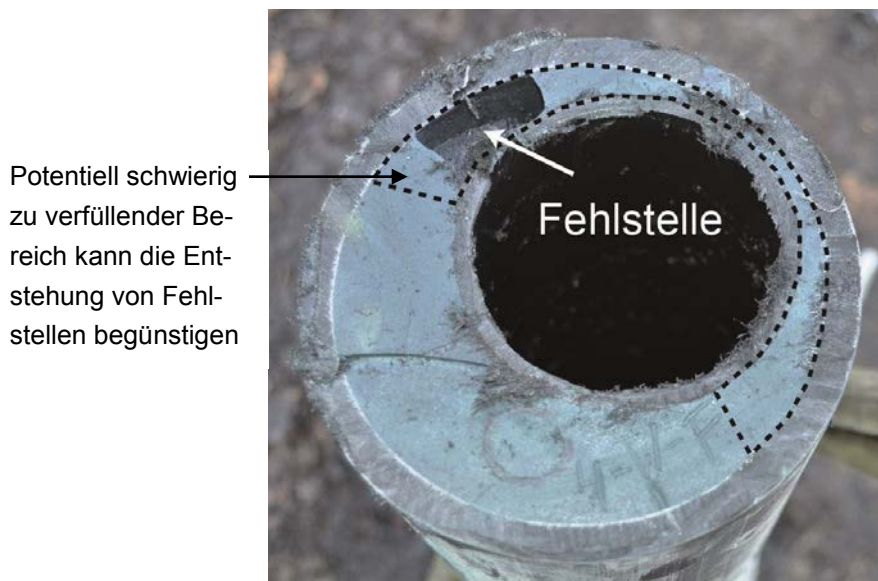


Abbildung 5-10: Querschnitt der Versuchs-EWS mit 140 mm Koaxial-EWS mit dem potentiell schwierig zu verfüllenden Bereich

Die aufgrund der Verwendung des Durchlaufmischers im Vergleich zu dem Kolloidalmischer tendenzielle Verschlechterung der Verfüllqualität konnte analog zu den Technikumsversuchen auch bei den Realmaßstabsversuchen festgestellt werden. So traten bei EWS 6-W, bei der ein Durchlaufmischer zum Einsatz kam, insgesamt mehr und größere Fehlstellen auf als bei EWS 5-O, die mit dem Kolloidalmischer verfüllt wurde (vgl. Tabelle 5-2). Aufgrund des großen Wasserabsetzens von zirka 1 m kam es bei EWS 6-W zu einer zusätzlichen Abwertung. Die Ergebnisse decken sich sehr gut mit dem Vergleich der Technikumsversuche EWS 5-3 und EWS 5-4, die bei Verwendung des gleichen Verfüllbaustoffs durch die Variation der Misch- und Verfüllanlage große Unterschiede hinsichtlich des Absetzmaßes aufwiesen (vgl. Tabelle 4-6). Die sehr gute bis gute Verfüllqualität von EWS 7-O und EWS 8-W zeigt, dass mit dem in diesen Versuchen eingesetzten Verfüllbaustoff auch unter Verwendung des Silomischers, der aufgrund der geringeren Anmischintensität und der fehlenden Nachmischzeit im Vergleich zu einem Kolloidalmischer einen weniger intensiven Aufschluss der Suspension ermöglicht, eine gute Verfüllqualität erzielt werden kann. Der Verfüllbaustoff 07* weist demnach eine deutlich geringere Sensitivität gegenüber einer geringeren Anmischintensität auf als Verfüllbaustoff 03. Zusätzlich bekräftigte sich bei dem Vergleich von EWS 7-O und EWS 8-W die Vermutung, dass sich mit einer Koaxial-EWS im Vergleich zu einer 2-U-EWS tendenziell eine bessere Verfüllqualität erzielen lässt. In Tabelle 5-2 ist zu erkennen, dass bei EWS 7-O (2-U-EWS) im Vergleich zu EWS 8-W (Koaxial-EWS) mehr Aufstiegskanäle aufgetreten sind. Die einfachere Sondenometrie (nur ein Sondenrohr anstelle von vier Sondenrohren) kann demnach einen Vorteil für die Koaxial-EWS darstellen. Neben der größeren Anzahl an Aufstiegskanälen sind bei EWS 7-O zusätzlich auch mehr Entmischungsbereiche aufgetreten, die mit den unterschiedlichen Sondenometrien im Bohrloch jedoch nicht zu erklären sind. Hinsichtlich der Nutzung von Koaxial-EWS anstelle von 2-U-EWS lässt sich zum

aktuellen Zeitpunkt aufgrund des singulären Vergleichs mit Realmaßstabsversuchen noch keine allgemeingültige Empfehlung aussprechen.

Bei der Analyse von EWS 7-O ist aufgefallen, dass sich die Aufstiegskanäle und Entmischungen vermehrt im oberen Teil und besonders im oberen Drittel stark ausbilden. Erste deutliche Entmischungen traten dort ungefähr ab dem 13ten Versuchsstück (13 m von unten) auf. Die Verfüllqualität der untersten 13 m war hingegen gut bis sehr gut. Desweiteren konnte festgestellt werden, dass Aufstiegskanäle vermehrt an den innen liegenden Sondenrohren auftreten (siehe Abbildung 5-11). Demgegenüber sind bei den Visualisierungsversuchen Aufstiegskanäle bevorzugt an Berührungspunkten von Sondenrohren und „Bohrlochwand“ aufgetreten. Dieses abweichende Verhalten ist aktuell nicht erklärbar.

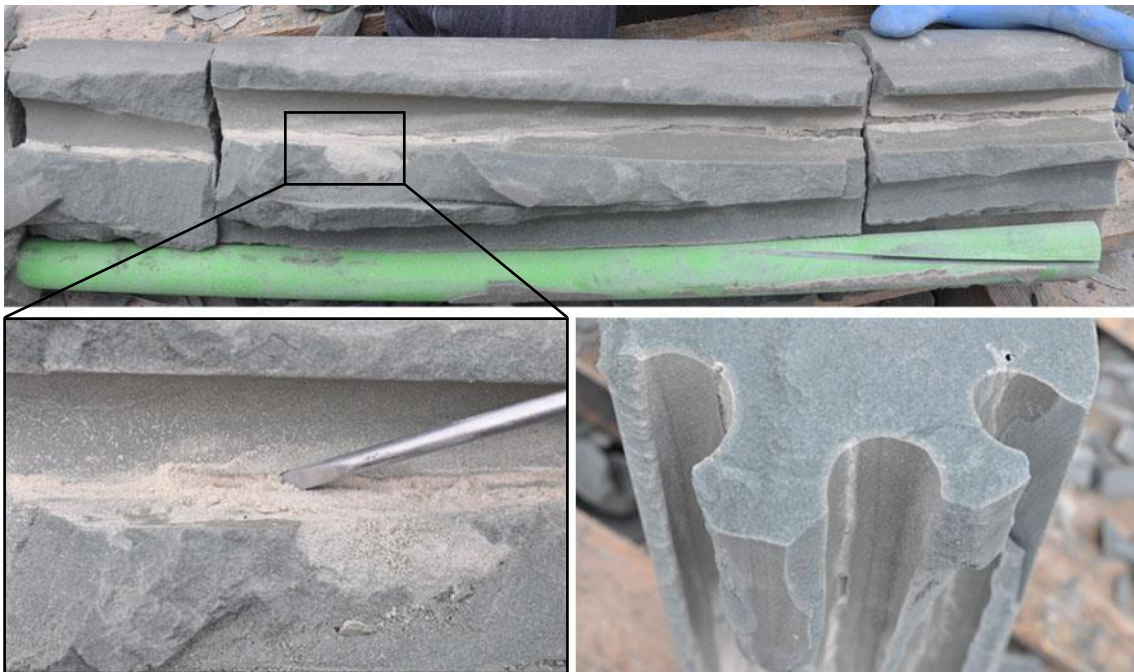


Abbildung 5-11: Aufstiegswege an Sondenrohren mit zum Teil sandigen Entmischungen (EWS 7-O)

Bei den im Realmaßstab durchgeführten Versuchen war die Verfüllqualität von EWS 8-W am besten. Aufstiegskanäle entlang des Sondenrohrs konnten bei der in diesem Versuch eingesetzten Koaxial-EWS mit gewelltem Außenrohr auch bei direktem Kontakt zur „Bohrlochwand“ nur selten beobachtet werden. Zwar bildete sich die gewellte Form des Außenrohrs durch eine farbliche „Marmorierung“, also eine sich im Vergleich zum restlichen Teil der Sonde abhebende Farbe nach, die jedoch keinen Verfüllqualitätsmangel darstellt und somit vermutlich keine Auswirkung auf die Systemdurchlässigkeit hat.

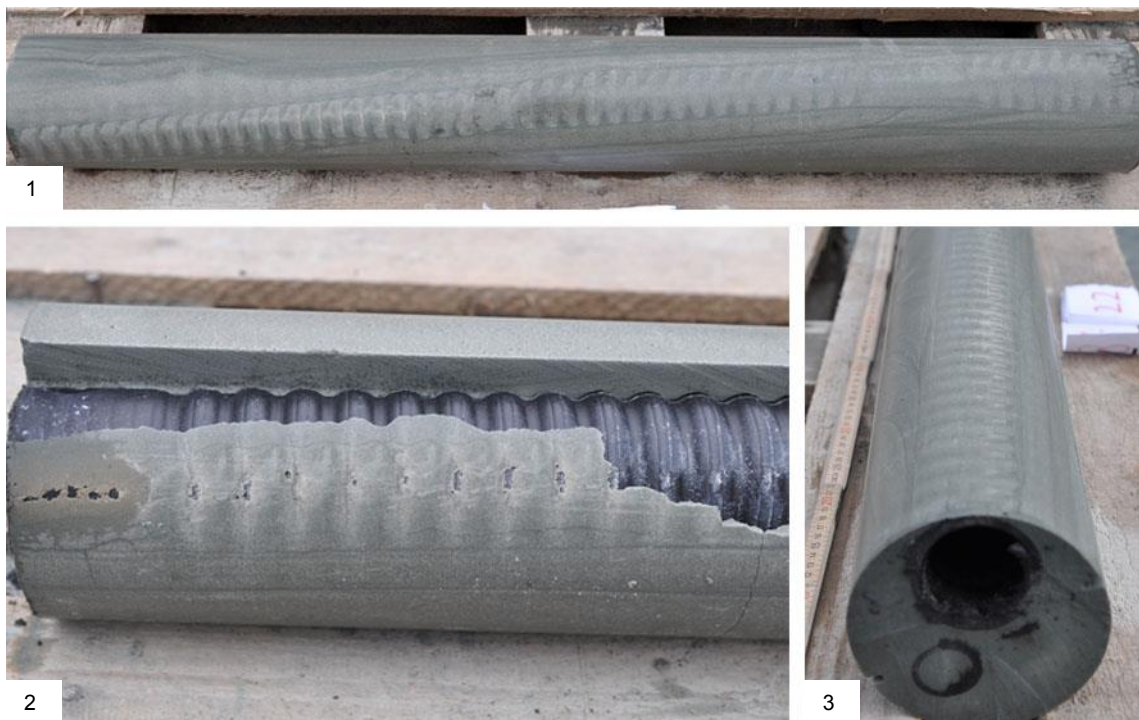


Abbildung 5-12: Sehr gute Verfüllqualität von Koaxial-EWS (EWS 8-W) mit „marmorierten“ Flächen in Bereichen, in denen die Koaxial-EWS an der Bohrlochwand anliegt (Bild 1 und 3). Insgesamt sehr wenige Aufstiegskanäle entlang des Sondenrohrs (Bild 2).

Tabelle 5-2: Versuchsergebnisse der Realmaßstabsversuche

	EWS 1-O	EWS 2-W	EWS 3-O	EWS 4-W	EWS 5-O	EWS 6-W	EWS 7-O	EWS 8-W
Verfüllmaterial	8	13*	9	9	3	3	7*	7*
Variation in den Versuchsrandbedingungen	Standard	Standard	Standard	Koaxial-EWS Ø: 140 mm	Standard	Durchlaufmischer	Silomischer & PE Xa 2-U-EWS	Silomischer & Koaxial-EWS Ø 63 mm
Verwendete Misch- und Verfüllanlage	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Durchlaufmischer	Silomischer "quadro-mat"	Silomischer "quadro-mat"
W/F-Verhältnis [kg/kg]	0,44	0,8	0,4	0,4	0,8	0,8	0,3	0,3
Nachmischzeit [s]	90	90	40	40	90	keine	keine	keine
Verfüllgeschwindigkeit [l/min]		40	41	(33)**	(-)**	(-)**	58	58
Soll-Suspensionsdichte [kg/l]	1,79	1,46	1,90	1,90	1,46	1,46	1,94	1,94
gemessene Mischer [kg/l]		1,54	1,82	1,82	1,53	1,50	1,95	1,96
Suspensionsdichte		1,55	1,82	1,82	(1,66)**	(-)**	1,98	1,99
Überlauf [kg/l]		1,52	1,84	1,84	1,52	1,43	1,92	1,93
Suspensionstemperatur [°C]		19,6	17,0	17,0	(12,9)**	(-)**	8,6	8,2
Marshzeit [s]		115	71	71	47	42	401	288
Restauslaufzeit [s]		133	71	71	40	34	nicht messbar	281
Filterpressen-		117	98	98	64	127	50	44
Filterkuchen [mm]		41	55	55	20	40	47	45
Versuchszeit [s]		227	92	92	125	374	450	450
Absetzmaß nach 24 h [%]		1,0	4,0	4,0	3,0	9,0	0,0	0,5
Fehlstellenanzahl größenabhängig [cm]								
0-10		5	3	2	1	1	1	
10-20								
20-30								
30-50								
>50								
Bewertung der Relevanz von Verfüllqualitätsmängeln mit möglichem negativen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit								
Fehlstellen								
Aufstiegskanäle								
Rissstrukturen/Sackungen								
Entmischungen								
Gesamtnote		2-3	5	5	4	5 [6]	2-3	1-2
Kommentar	Havarie, keine Teilanalyse möglich	Aufstiegskanäle innen legend	Fehlstelle: 25 cm Wasserabsetzen im Bohrhoch: 38 cm	Havarie, Teilanalyse von 0 - 8 m; Fehlstellen: 61cm und 115 cm Wasserabsetzen im Bohrhoch: 25 cm	Wasserabsetzen im Bohrhoch: 8 cm	Fehlstelle: 35 cm, 75 cm und 60 cm Wasserabsetzen im Bohrhoch: 95 cm	Aufstiegskanäle an innenliegenden Sondenrohren	

*: gegenüber dem entsprechenden Originalprodukt durch den Hersteller modifizierter Verfüllbaustoff
 **: Fehlerhafte Datenaufnahme mit dem Coriolis-Messgerät

5.5.2. Erkenntnisse hinsichtlich eines kontinuierlichen Verfüllvorgangs

In den Kapiteln 4.4 und 5.5.1 wurde der Vorteil hinsichtlich der höheren Anmischintensität eines Kolloidalmischers im Vergleich zu einem Durchlaufmischer erläutert.

Bei der Anmischung der Verfüllsuspension mit einem Kolloidalmischer (Abbildung 5-13) wird in Abhängigkeit des W/F-Werts des verwendeten Verfüllbaustoffs eine definierte Menge Wasser in einen Anmischbehälter gefüllt. Anschließend wird sukzessive der Baustoff in den Anmischbehälter geschüttet, der dort mit dem laufenden Rührwerk homogen aufbereitet wird. Nach der vom Hersteller angegebenen Nachmischzeit, die nach dem Einbringen des letzten Baustoffsacks beginnt, wird die angemischte Suspension – eine sogenannte Charge - in den Vorratsbehälter befördert, von wo die Suspension anschließend mit Hilfe einer Exzentrerschneckenpumpe in das Bohrloch gepumpt wird.



Abbildung 5-13: Bei den Technikums- und Realmaßstabsversuchen verwendete Niederdruck Misch- und Verfüllanlage IS-38-E. Bildquelle: Gertec Maschinen- und Anlagenbau GmbH

Bei der Durchführung des ersten Realmaßstabsversuchs zeigte sich, dass mit dem oben beschriebenen Anmischvorgang eine kontinuierliche Verfüllung des 30 m tiefen Bohrlochs mit einem Verfüllvolumenstrom von mindestens 40 l/min, wie sie in den LQS EWS (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2011) gefordert ist, unter Umständen nicht einzuhalten ist. Die Problematik bei dem ersten Realmaßstabsversuch ergab sich aus der Tatsache, dass als Wasserversorgung lediglich der Hauswasseranschluss des KIT zur Verfügung stand, der einen maximalen Volumenstrom von nur ca. 30 l/min leistet. Obwohl vor Verfüllbeginn der Vorratsbehälter der Mischanlage mit fertig angemischter Suspension gefüllt war und eine bereits angemischte Charge zum Umpumpen in den Vorratsbehälter zur Verfügung stand, hätte der Volumenstrom des Hauswasseranschlusses nicht ausgereicht, einen kontinuierlichen Verfüllvorgang mit 40 l/min zu gewährleisten. Während dieses Realmaßstabsversuchs wurde dieser Umstand gelöst, indem während der Nachmischzeit und dem Umpumpvorgang Zusatzbehälter mit

Wasser gefüllt wurden, die bei der Wasserzugabe für die nächste Charge zusätzlich in den Vorratsbehälter geschüttet werden konnten.

Da sich diese Problematik beim Verfüllen von Bohrlöchern noch verschärfen könnte, wenn beispielsweise ein Verfüllbaustoff eingesetzt wird, bei dem von Herstellerseite eine lange Nachmischzeit (z.B. 90 Sekunden) angegeben wird und zusätzlich ein nach den LQS EWS größerer Volumenstrom von > 75 l/min zur „Beherrschung von besonderen Verhältnissen“ erforderlich ist, wurde eine Berechnungstabelle erstellt, mit der unter Annahme der spezifischen Größe der verwendeten Verfüllanlage und des benötigten Zeitbedarfs pro Anmischvorgang die maximal zu verfüllende EWS-Länge zu bestimmen ist. In die Berechnung gehen die Volumina der zur Verfügung stehenden Behälter (Anmisch- und Vorratsbehälter), das Gesamtvolumen einer Anmischcharge sowie der Zeitbedarf pro Anmischcharge mit ein. Der für eine Anmischung benötigte Zeitbedarf ist unterteilt in die Zeiten, die für die Wasserzugabe, die Baustoffzugabe, das Nachmischen sowie das Umpumpen benötigt werden. Für die nachfolgenden erläuterten Beispielberechnungen wurde ein Bohrloch mit einem Bohrlochdurchmesser von 150 mm mit einer eingebauten 2-U-EWS (32 x 2,9 mm) angenommen. Es erfolgte eine idealisierte Betrachtung, bei der z.B. weder Suspensionsverluste durch Klüfte im Untergrund noch das in oberirdischen Schläuchen verbleibende Suspensionsvolumen berücksichtigt werden. In Abbildung 5-15 ist ein exemplarischer Verfüllvorgang mit einem Volumenstrom von 40 l/min mit einer Misch- und Verfüllanlage dargestellt, deren Anmischbehälter 150 l und deren Vorratsbehälter 300 l fasst. Die für eine Anmischcharge angegebenen Zeiten entsprechen realistischen, auf einer Baustelle darstellbaren Annahmen, wobei festzuhalten ist, dass der Zeitbedarf von 30 Sekunden für die Wasserzugabe sehr gering und nur mit Hilfe eines hohen Frischwasser-Volumenstroms (zum Beispiel durch den Anschluss eines Wasserhydranten) realisierbar ist. Bereits bei der Durchführung der Technikumsversuche hat sich gezeigt, dass bei der Baustoffzugabe darauf geachtet werden muss, dass die Baustoffsäcke nicht zu schnell in den Anmischbehälter geschüttet werden, da ansonsten die Gefahr besteht, dass der Baustoff auf den Boden des Anmischbehälters absinkt und nicht vollständig angemischt werden kann. Der in Abbildung 5-15 angegebene Zeitbedarf für die Baustoffzugabe ist demnach ein Parameter, der nur in geringem Maße zeitlich optimiert werden kann. Die Zeit für das Umpumpen vom Anmischbehälter in den Vorratsbehälter ist durch die Mischanlage vorgegeben und entspricht im betrachteten Beispiel mit 60 Sekunden (für 150 l Suspension) dem Wert des bei der Versuchsdurchführung verwendeten Kolloidalmischers. Die Annahmen für die Berechnung des gesamten Zeitbedarfs für eine Anmischcharge sind exemplarisch in Abbildung 5-14 dargestellt. Zusätzlich ist dort beispielhaft der Zeitbedarf für das Volumen einer Anmischcharge von 100 l aufgeführt. Für die Berechnungen wird angenommen, dass die Ergiebigkeit 25 l Suspension je 25 kg Baustoff beträgt. Bei dem Zeitbedarf für die Wasserzugabe wird zu der Zeit, die für das eigentliche Befüllen des Anmischbehälters benötigt wird, noch eine Fixzeit von 15 Sekunden addiert, die für das genaue Einstellen der Wassermenge am Ende des Einfüllvorgangs benötigt wird. Für die Zugabe eines Baustoffsacks in den Mischbehälter werden 15 Sekunden veranschlagt. Die Nachmischzeit ist abhängig vom verwendeten Verfüllbaustoff. Die Umpumpdauer für 150 l Suspension vom Anmisch- in den Vorratsbehälter beträgt 60 Sekunden (inklusive 15 Sekunden Fixzeit für die Endphase des Umpumpvorgangs).

Zeitbedarf für eine Anmischcharge*

Exemplarische Berechnung:

<p>Wasserzugabe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 15 s für 150 l Wasser • + 15 s Fixzeit (für das genaue Einstellen der Wassermenge am Ende des Einfüllvorgangs) <p>Baustoffzugabe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 15 s je 25 kg Sack <p>Nachmischzeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • nach Herstellerangabe <p>Umpumpzeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 45 s für 150 l Suspension • + 15 s Fixzeit (für nachfließende Suspension am Ende des Umpumpvorgangs)

Beispiel für Anmischcharge: 100 l

<p>Wasserzugabe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $(150 \text{ l} : 15 \text{ s}) \cdot 100 \text{ l}$ • + 15 s Fixzeit <p style="margin-left: 20px;">➔ 25 s</p> <p>Baustoffzugabe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $(100 \text{ l} : 25 \text{ l}) \cdot 15 \text{ s}$ <p style="margin-left: 20px;">➔ 60 s</p> <p>Nachmischzeit:</p> <p style="margin-left: 20px;">➔ 90 s</p> <p>Umpumpzeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $(45 \text{ s} : 150 \text{ l}) \cdot 100 \text{ l}$ • + 15 s Fixzeit <p style="margin-left: 20px;">➔ 45 s</p> <p>Gesamtzeitbedarf für eine Anmischcharge: 220 s</p>
--

*: Annahme: Die Ergiebigkeit pro Sack Baustoff beträgt 25 l Suspension

Abbildung 5-14: Berechnung des Zeitbedarfs für eine Anmischcharge mit einem Kolloidalmischer

In den folgenden Abbildungen sind die oben erläuterten und für einen kontinuierlichen Verfüllvorgang wesentlichen Parameter (Volumina Mischanlage, Zeitbedarf Anmischen, Verfüllvolumenstrom, Bohrlochgeometrie) im oberen Bereich angegeben. In dem sich darunter befindlichen Diagramm ist der Füllstand der Verfüllsuspension im Vorratsbehälter (Blaugrau) sowie die gesamt verfüllte EWS-Länge (Orange) gegen die Zeit ab Verfüllbeginn aufgetragen. Es wird davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt des Verfüllbeginns der Vorratsbehälter mit der maximal möglichen Anzahl an Anmischchargen gefüllt ist. In Abbildung 5-15 ist zu erkennen, dass nach Verfüllbeginn der Füllstand im Vorratsbehälter eine gewisse Zeit nicht abnimmt, was darauf zurückzuführen ist, dass parallel zum Verfüllvorgang Suspension vom Anmischbehälter in den Vorratsbehälter gepumpt wird. Hierzu wird vorausgesetzt, dass sich in dem Anmischbehälter bei Verfüllbeginn eine fertige Anmischcharge befindet. Aus Vereinfachungsgründen wird angenommen, dass der Volumenstrom dieses Umpumpvorgangs dem Verfüllvolumenstrom entspricht. Nachdem die gesamte Anmischcharge in den Vorratsbehälter gepumpt wurde und mit dem Anmischen der nächsten Charge begonnen werden kann, nimmt der Füllstand im Vorratsbehälter erwartungsgemäß bis zu dem Zeitpunkt ab, an dem die Charge fertig angemischt ist und in den Vorratsbehälter umpumpt wird. Die Zeit für das Umpumpen ist in dem Diagramm in dem gesamten Zeitbedarf des Anmischvorgangs inbegriffen, sodass der Umpumpvorgang vereinfacht als unmittelbarer Anstieg

des Füllstands im Vorratsbehälter dargestellt ist. In Abbildung 5-15 ist zu erkennen, dass mit den gemachten Annahmen maximal ein ca. 72 m tiefes Bohrloch unter Beibehaltung der angegebenen Parameter kontinuierlich verfüllt werden kann. Wird das Volumen einer Anmischcharge auf 100 Liter reduziert, und der Zeitbedarf für eine Anmischcharge entsprechend angepasst (vgl. Abbildung 5-14 rechts), so verringert sich die maximal kontinuierlich zu verfüllende EWS-Länge auf nur noch ca. 55 m (Abbildung 5-16). Wird der Verfüllvolumenstrom auf 60 l/min erhöht, so kann selbst bei einer Nachmischzeit von 0 Sekunden maximal ein ca. 73 m tiefes Bohrloch kontinuierlich verfüllt werden (Abbildung 5-17). Um einen kontinuierlichen Verfüllvorgang bei einem Verfüllvolumenstrom von 40 l/min zu gewährleisten, muss die Nachmischzeit im Vergleich zu dem in Abbildung 5-15 dargestellten Beispiel auf 45 Sekunden reduziert werden (Abbildung 5-18). Es ist geplant, die für die durchgeführten Berechnungen verwendete Microsoft Office Excel Mappe auf der Internetseite erdsondeninfo.de für Anwender kostenfrei zur Verfügung zu stellen.

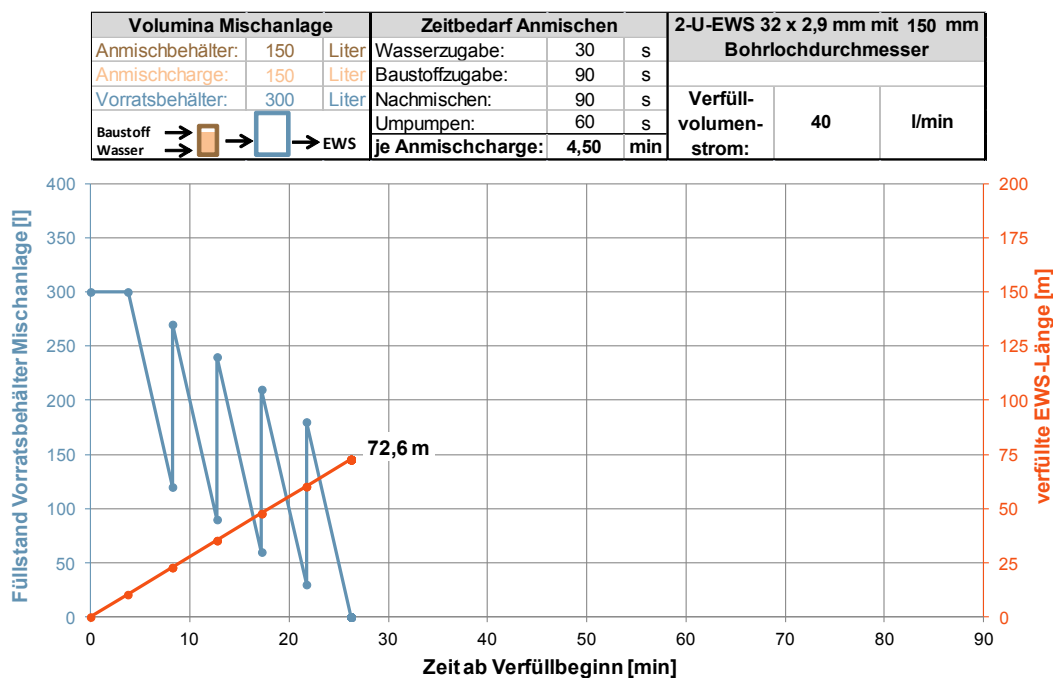


Abbildung 5-15: Kontinuierlicher Verfüllvorgang, Beispiel 1 (Maximal zu verfüllende EWS-Länge von 72,6 m bei Verwendung einer Mischanlage mit einem 150 l fassenden Anmischbehälter und einem 300 l fassenden Vorratsbehälter bei einem gesamten Zeitbedarf pro Anmischcharge von 4,50 min und einem Verfüllvolumenstrom von 40 l/min)

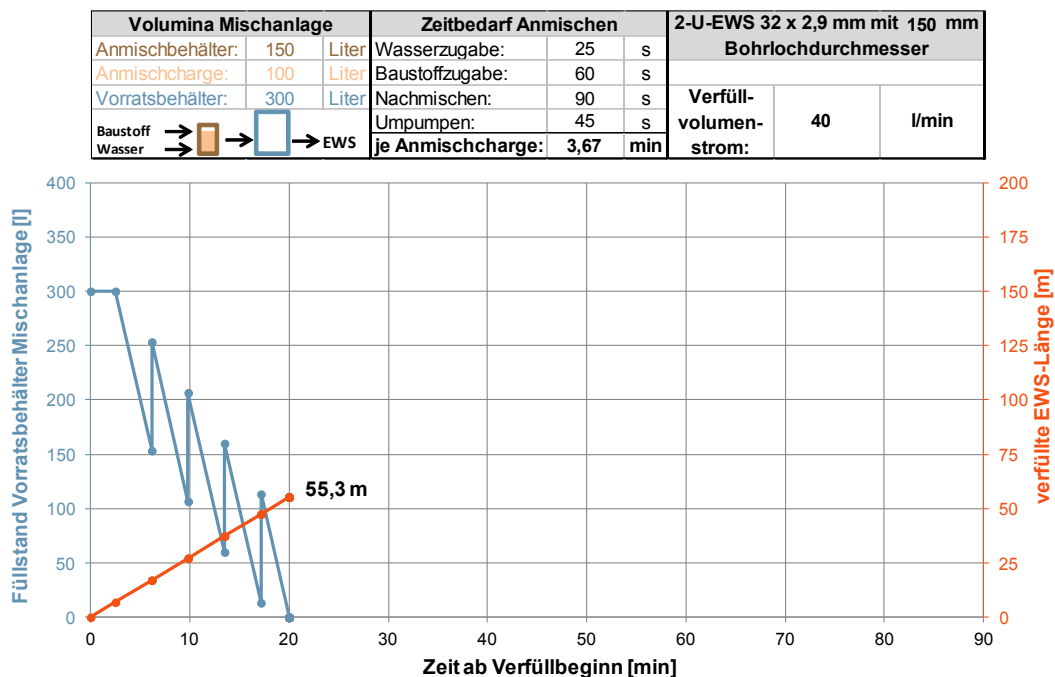


Abbildung 5-16: Kontinuierlicher Verfüllvorgang, Beispiel 2 (Durch Anpassung des Volumens einer Anmischcharge auf 100 Liter mit entsprechender Anpassung des Zeitbedarfs pro Anmischcharge reduziert sich die maximal zu verfüllende EWS-Länge auf ca. 55 m)

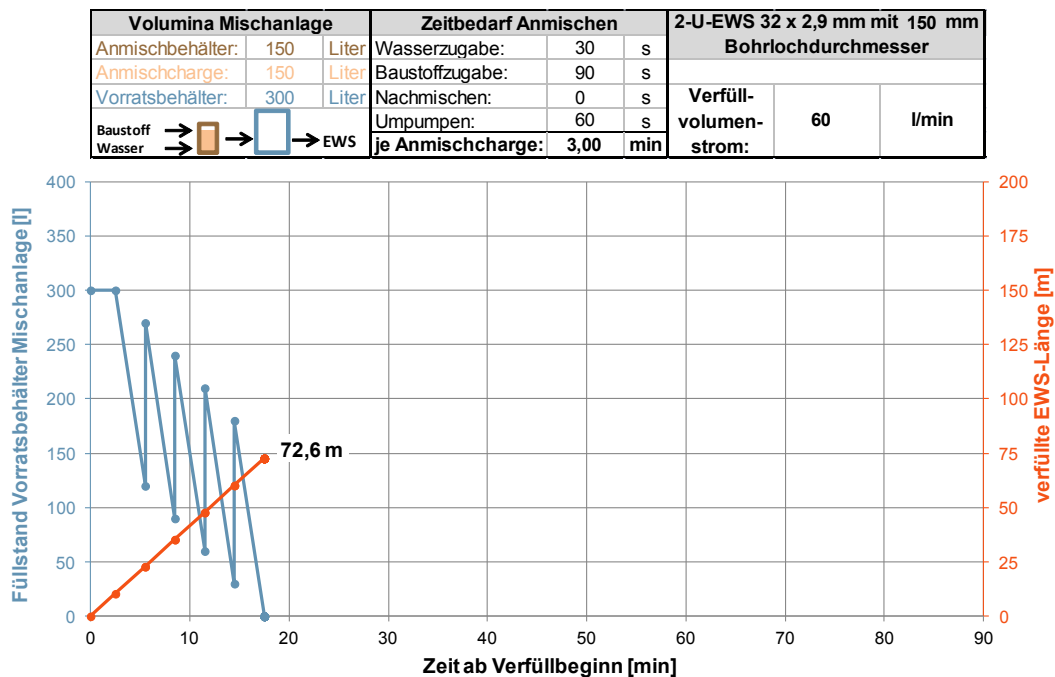


Abbildung 5-17: Kontinuierlicher Verfüllvorgang, Beispiel 3 (Maximal zu verfüllende EWS-Länge bei einem Volumenstrom von 60 l/min und einer Nachmischzeit von 0 Sekunden: 72,6 m)

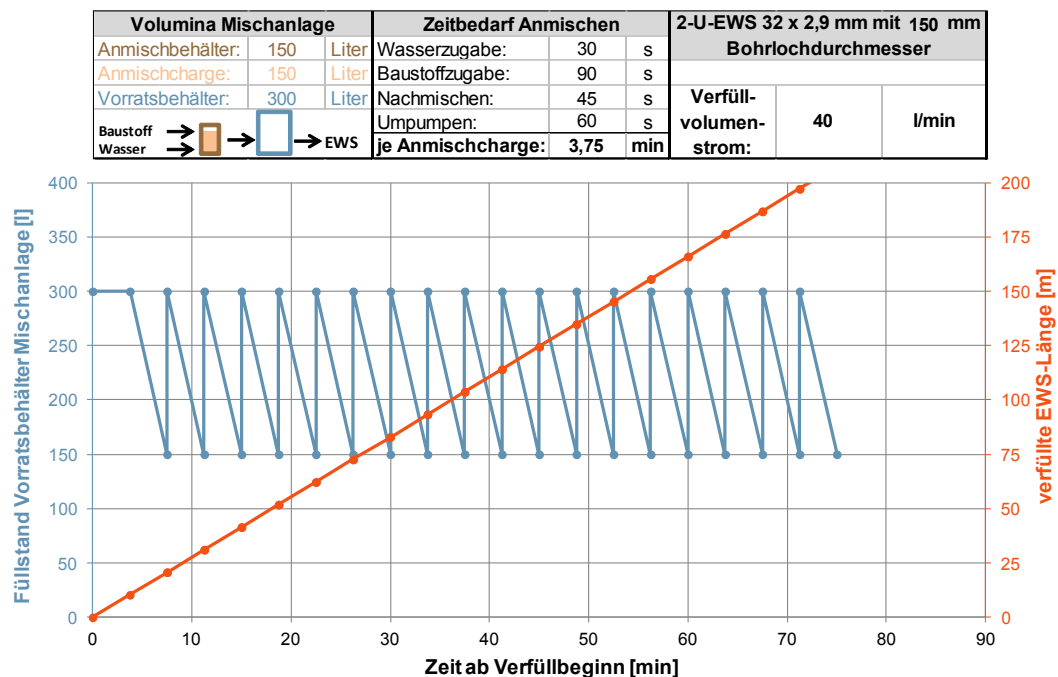


Abbildung 5-18: Kontinuierlicher Verfüllvorgang, Beispiel 4 (Beliebig lang realisierbarer Verfüllvorgang bei einem Verfüllvolumenstrom von 40 l/min und einer Nachmischzeit von 45 Sekunden)

5.5.3. Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass Verfüllqualitätsmängel, die bei den Technikumsversuchen aufgetreten sind, in vergleichbarer Weise auch bei den Realmaßstabsversuchen entstehen. Jedoch ist das Ausmaß der Verfüllqualitätsmängel (Größe und Anzahl der Fehlstellen und Aufstiegskanäle etc.) im Vergleich zu den Technikumsversuchen aufgrund der fünffachen Versuchslänge wesentlich größer. Die Besonderheit, dass Verfüllqualitätsmängel im oberen Drittel der EWS bevorzugt auftreten ist ein weiteres Merkmal, das sowohl bei den Technikums- als auch bei den Realmaßstabsversuchen festzustellen war. Desweiteren konnte durch die Realmaßstabsversuche aufgezeigt werden, dass auch bei der Verwendung eines Silomischers und der damit verbundenen weniger intensiven Aufbereitung der Verfüllsuspension die Verfüllqualität nicht zwangsweise schlechter ist als mit einem Kolloidalmischer. Diese Aussage trifft jedoch nur zu, wenn der eingesetzte Baustoff für die Verwendung in Silo- / Durchlaufmischer geeignet ist, sodass trotz wenig intensiver Anmischung die gewünschten Suspensionseigenschaften (z.B. geringes Absetzmaß) sichergestellt werden können. Weiterhin wurde festgestellt, dass ein kontinuierlicher Verfüllvorgang mit einem Kolloidalmischer aufgrund des Zeitbedarfs für die Anmischung einer Charge unter Umständen schwer zu realisieren ist und eine genaue Planung des Verfüllvorgangs in Abhängigkeit der verwendeten Misch- und Verfüllanlage, dem eingesetzten Verfüllbaustoff sowie der geplanten Verfüllgeschwindigkeit und der Bohrlochgeometrie vorausgehen muss.

5.6. Effizienzvergleich unterschiedlicher Typen von EWS

Die Untersuchungen zur Verfüllqualität im Technikums- und Realmaßstab zeigen, dass einfachere Sondengeometrien die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Kanalstrukturen und Fehlstellen reduzieren können (s. Abschnitte 4.5 und 5.5). Hinsichtlich der Verfüllqualität können Koaxial-EWS gegenüber 2-U-EWS somit Vorteile bieten. Ein weiteres zentrales Bewertungskriterium für die Einsetzbarkeit von Koaxial-EWS ist daneben deren thermische Effizienz im Vergleich mit konventionellen 2-U-EWS. Dieser Aspekt wird in den beiden folgenden Abschnitten an Hand von typischen, exemplarischen Erdwärmesonden mit Hilfe theoretischer Berechnungen (s. Abschnitt 5.6.1) und durchgeführter Messungen (s. Abschnitt 5.6.2) zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands untersucht.

Weitere, für den Vergleich von 2-U-EWS und Koaxial-EWS wichtige Aspekte (z.B. Realisierbarkeit bei verschiedenen Tiefen unter Berücksichtigung von Druckverlusten in den Sondenrohren und unter Berücksichtigung der Druckbeständigkeiten der Sondenrohrmaterialien, Investitions- und Installationskosten, praktische Handhabung) werden ergänzend zu den zentralen Aspekten der Verfüllqualität und der thermischen Effizienz in einer Masterarbeit (Meier, 2016) untersucht.

5.6.1. Theoretische Voruntersuchung

5.6.1.1. Auswahl der verwendeten Berechnungsmethode

Als Maß für die thermische Effizienz von Erdwärmesonden wird üblicherweise der effektive thermische Bohrlochwiderstand $R_{b,eff}$ verwendet, der den thermischen Widerstand zwischen der arithmetisch gemittelten EWS-Fluidmitteltemperatur und der mittleren Bohrlochwandtemperatur wiedergibt (s. Gleichung 5-4 auf S. 286). $R_{b,eff}$ kann für real existierende EWS mit Hilfe eines Thermal Response Tests (Gehlin 2002) unter Verwendung verschiedener Auswertemethoden (typischerweise Linienquellentheorie) bestimmt werden. Daneben gibt es verschiedene numerische und analytische Simulations- und Berechnungsmethoden zur Ermittlung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Erdwärmesonden (Riegger 2016). Um die $R_{b,eff}$ -Werte zahlreicher verschiedener Konfigurationen von 2-U-EWS und Koaxial-EWS effizient miteinander vergleichen zu können, soll eine Simulations- oder Berechnungsmethode verwendet werden, die einfach anzuwenden ist und kurze Berechnungszeiten aufweist.

Als Grundlage für die Festlegung der hierfür zu verwendenden Simulations- oder Berechnungsmethode erfolgt zunächst ein Vergleich der mit den beiden vorausgewählten Methoden für exemplarische 2-U-EWS und Koaxial-EWS ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte mit Referenz- $R_{b,eff}$ -Werten, die für dieselben EWS mit (vollständig) **ausdiskretisierten FEFLOW (Version 6.2 FH 3) Finite-Element-Modellen** (DHI-WASY 2013) berechnet werden.

Bei den beiden vorausgewählten, einfach anzuwendenden Methoden handelt es sich um:

- **FEFLOW (Version 6.2 FH 3)** (DHI-WASY 2013) in Verbindung mit der integrierten **BHE-Randbedingung** (BHE: borehole heat exchanger; englisch für: Erdwärmesonde) (Diersch et al. 2010)

- Die von Hellström (1991) dokumentierte **Multipole-Berechnungsmethode**, die unter anderem in dem in Europa weit verbreiteten EWS-Auslegungsprogramm Earth Energy Designer (EED) (Blomberg et al. 2008) implementiert ist. Analog zu EED wird für die in diesem Abschnitt durchgeführten Multipole-Berechnungen von den beiden möglichen Berechnungsrandbedingungen „einheitlicher Wärmestrom zwischen den Sondenrohren und der Bohrlochwand über die gesamte EWS-Tiefe“ und „einheitliche Bohrlochwandtemperatur über die gesamte EWS-Tiefe“ die erstere verwendet. Von den beiden für 2-U-EWS gängigen, regelmäßigen Sondenrohranordnungen wird für die in diesem Abschnitt durchgeführten Multipole-Berechnungen diejenige verwendet, bei der sich die Sondenrohre gleicher Temperatur bezogen auf das Bohrlochzentrum diagonal gegenüberliegen (s. Darstellung der 2-U-EWS in Tabelle 5-3), wohingegen sich bei der in EED verwendeten Sondenrohranordnung jeweils ein warmes und ein kaltes Sondenrohr diagonal gegenüberliegen. Die verwendete Sondenrohranordnung entspricht derjenigen, die in FEFLOW zur Berechnung der BHE-Randbedingung verwendet wird.

Die **ausdiskretisierten Referenz-Finite-Element-Modelle** wurden mit der Software FEFLOW (Version 6.2 FH3) (DHI-WASY 2013) gemäß des in Clausen (2008) detailliert beschriebenen Vorgehens unter Anwendung der in Riegger (2016) erläuterten Ergänzungen und Modifikationen erstellt. Bei den ausdiskretisierten Referenz-Modellen handelt es sich um einen Untergrund-Zylinder mit einer vertikalen Ausdehnung von 40 m, einem Durchmesser von 20 m und einer im Zentrum des Modells bis in eine Tiefe von 30 m angeordneten, ausdiskretisierten 2-U-EWS oder Koaxial-EWS (s. Abbildung 5-19).

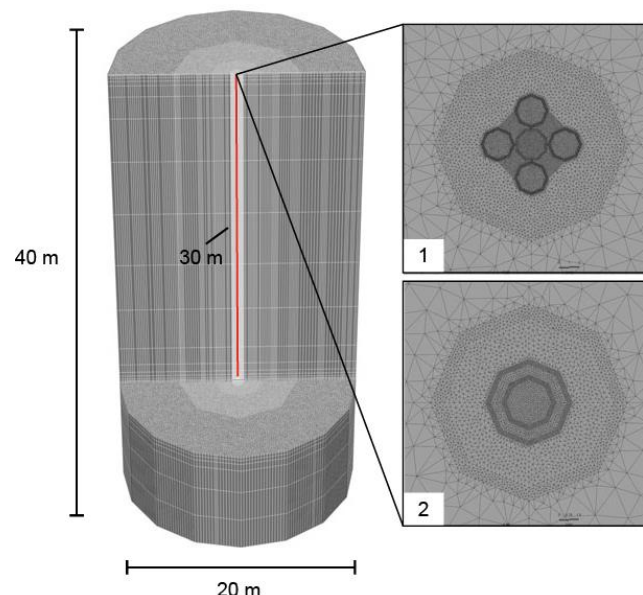
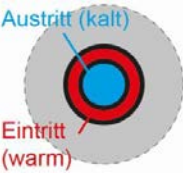
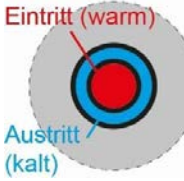
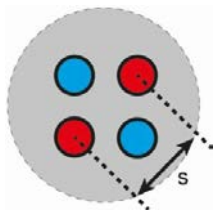


Abbildung 5-19: 3D-Ansicht des Berechnungsmodells mit ausdiskretisierter 2-U-EWS (Ausschnitt 1) und Koaxial-EWS (Ausschnitt 2)

Die Finite-Element-Modelle bestehen jeweils aus insgesamt 28 Schichten, deren vertikale Ausdehnungen zur Geländeoberkante und zum Erdwärmesondenfuß von maximal 5 m im mittleren Tiefenbereich der EWS auf 1 cm abnehmen. Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des homogenen und isotropen Untergrunds betragen 2,65 W/m/K und 2,39 MJ/m³/K. Die Starttemperatur des gesamten Berechnungsmodells ist 10°C.

Da für die Definition der Grobstruktur des Gitters in FEFLOW (Version 6.2 FH3) keine Kreisformen, sondern lediglich Polygone zur Verfügung stehen, kann die Geometrie von im horizontalen Querschnitt runden Objekten (Sonden- und Verpressrohre, Bohrloch) nicht exakt wiedergegeben werden, sodass diese durch Oktaeder angenähert werden, deren Flächeninhalte denen der anzunähernden Kreis(ring-)querschnitte entsprechen (s. Ausschnitte 1 und 2 in Abbildung 5-19). Die wesentlichen Kenndaten der für den Simulations- und Berechnungsmethodenvergleich verwendeten Koaxial-EWS und 2-U-EWS sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Kenndaten der für den Simulations- und Berechnungsmethodenvergleich betrachteten EWS

	Koaxial-EWS*		2-U-EWS**
	CXA*** (coaxial pipe with annular inlet)	CXC*** (coaxial pipe with centered inlet)	
Sondenrohranordnung und Durchströmungsrichtung (die angegebenen Temperaturen "warm" und "kalt" beziehen sich auf den simulierten TRT)			
EWS-Länge	30 m		30 m
Bohrlochdurchmesser	123,0 mm		157,5 mm
Sondenrohrmaße [mm]	63 x 3,8 mm (Außenrohr) 40 x 3,7 mm (Zentralrohr)		32 x 2,9 mm
Schenkelabstand s [mm]	-		65,6 mm
Wärmeträgermedium:	Wasser-Glykol (Stoffwerte entsprechend den Standardwerten des FEFLOW BHE Modells)		Wasser mit 26,3 °C (Stoffwerte entsprechend Riegger (2016))
- Wärmeleitfähigkeit	0,48 W/m/K		0,61 W/m/K
- Dichte	1052,0 kg/m ³		996,8 kg/m ³
- Wärmekapazität	3,8023 kJ/kg/K		4,1803 kJ/kg/K
- dynamische Viskosität	0,003 kg/m/s		0,000864 kg/m/s
EWS-Volumenstrom	416,7 l/h		423,3 l/h
Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des Füllmaterials	1,54 W/m/K 2,17 MJ/m ³ /K		1,54 W/m/K 2,17 MJ/m ³ /K

*: EWS-Konfiguration und EWS-Betriebsbedingungen definiert entsprechend der Referenz-EWS-Konfiguration der "kleinen" Koaxial-EWS aus Tabelle 5-5

** : EWS-Konfiguration und EWS-Betriebsbedingungen mit Ausnahme geringer Abweichungen bei der EWS-Länge definiert analog zu der in (Riegger 2016) betrachteten 2-U-EWS "EWS 3-3 zentrisch" des Forschungsvorhabens EWSplus (Riegger 2013)

***: Bezeichnung gemäß der in (Diersch et al. 2010) verwendeten Terminologie

Bei der Koaxial-EWS werden in Tabelle 5-3 analog zu der in Diersch et al. (2010) verwendeten Terminologie die beiden Durchströmungsrichtungen CXA (d.h. Eintritt im Annulus/Ringspalt zwischen Zentral- und Außenrohr) und CXC (Eintritt im Zentralrohr) unterschieden.

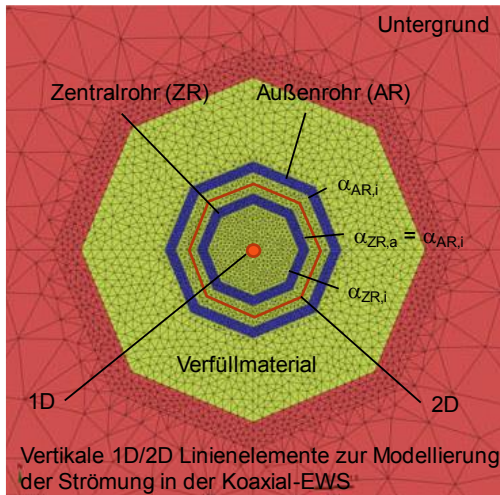


Abbildung 5-20: Horizontalschnitt durch das ausdiskretisierte Finite-Element-Modell einer Koaxial-EWS

Bei den Modellen mit Koaxial-EWS wird die Strömung im Zentralrohr analog zu dem in Clausen (2008) und Riegger (2016) für die Sondenrohre von 2-U-EWS beschriebenen Vorgehen mit vertikalen 1D-Linienelementen¹ simuliert, während im Ringspalt zwischen Innen- und Außenrohr vertikale 2D-Linienelemente zur Simulation der Strömung eingesetzt werden (s. Abbildung 5-20). Die Strömung im Sondenfuß wird durch ein horizontales 1D-Linienelement nachgebildet. Abgesehen von der Geometrie der Linienelemente ist das Vorgehen hierbei für die Koaxial-EWS analog zu dem in Clausen (2008) und Riegger (2016) für 2-U-EWS beschriebenen Vorgehen. Die in Tabelle 5-3 angegebenen Stoffwerte der verwendeten Wärmeträgermedien werden hierbei innerhalb der Linienelemente berücksichtigt.

Für die ausdiskretisierten Elemente der Strömungsquerschnitte der verschiedenen EWS werden aus simulationstechnischen Gründen entsprechend den Erläuterungen in Clausen (2008) und Riegger (2016) eine sehr geringe Wärmekapazität ($1 \cdot 10^{-6} \text{ MJ/m}^3/\text{K}$) und eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (1000 W/m/K) angesetzt.

Eine Berechnung der in den Sondenrohren vorliegenden konvektiven Wärmeübergangszahlen ist innerhalb der Linienelemente nicht möglich. Um die konvektiven Wärmeübergangszahlen in den Sondenrohren dennoch berücksichtigen zu können, werden für die PE-Rohre, deren Material-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{SR} = \lambda_{AR} = \lambda_{ZR} = 0,42 \text{ W/m/K}$ betragen, in Anlehnung an (Riegger 2016) angepasste Wärmeleitfähigkeiten λ^* verwendet. Für die angepasste Wärmeleitfähigkeit des Außenrohrs der Koaxial-EWS bzw¹ die angepasste Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre der 2-U-

EWS gilt damit:

$$\lambda_x^* = \left(\frac{1}{\lambda_x} + \frac{2}{\alpha_{x,i} \cdot d_{x,i} \cdot \ln \frac{d_{x,a}}{d_{x,i}}} \right)$$

mit $x = \text{AR}$ für das **Außenrohr** der Koaxial-EWS oder
mit $x = \text{SR}$ für die **Sondenrohre** der 2-U-EWS (5-1)

¹ Diese werden in FEFLOW als 1D „Discrete Feature Elements“ bezeichnet.

Die angepasste Wärmeleitfähigkeit des Zentralrohrs der Koaxial-EWS berechnet sich zu:

$$\lambda_{ZR}^* = \left(\frac{1}{\lambda_{ZR}} + \frac{1}{\alpha_{ZR,i} \cdot d_{ZR,i} \cdot \ln \frac{d_{ZR,a}}{d_{ZR,i}}} + \frac{1}{\alpha_{ZR,a} \cdot d_{ZR,a} \cdot \ln \frac{d_{ZR,a}}{d_{ZR,i}}} \right)^{-1} \quad (5-2)$$

Die konvektiven Wärmeübergangszahlen α an den Innen- und Außenseiten der PE-Rohre (Indizes **i** und **a** in Formel 5-1 und 5-2) der 2-U-EWS und der Koaxial-EWS werden dabei jeweils mit den in (Diersch 2014) angegebenen Nußelt-Korrelationen berechnet, die in dem der BHE-Randbedingung zu Grunde liegenden FEFLOW Berechnungsmodul implementiert sind. Für die durchgeführten Multipole-Berechnungen werden dieselben Nußelt-Korrelationen verwendet.

Dadurch ist eine bestmögliche Vergleichbarkeit der mit den drei betrachteten Simulations- und Berechnungsmethoden (1. ausdiskretisierte FEFLOW Finite Elemente Modelle, 2. FEFLOW mit BHE Randbedingung, 3. Multipole-Berechnung) ermittelten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände sichergestellt.

Die korrekte Implementierung der Nußelt-Korrelationen in den zur Berechnung der konvektiven Wärmeübergangszahlen und angepassten Wärmeleitfähigkeiten verwendeten Microsoft® Office Excel® 2007 Berechnungsmappen wurde durch die exakt mit dem BHE-Modul übereinstimmenden Ermittlungen der im BHE-Modul als Ergebnis angegebenen Wärmeübertragungskoeffizienten (für die Koaxial-EWS: „Pipe-in to pipe-out“ und „Pipe-out to grout“ bzw. „Pipe-in to grout“; für die 2-U-EWS: „Pipes-in to grout“) verifiziert. Es wird darauf hingewiesen, dass bei 2-U-EWS in Abhängigkeit der Berechnungsrandbedingungen (z. B. Bohrlochdurchmesser) teilweise auch sehr deutliche Abweichungen der im BHE-Modul als Ergebnis angegebenen Wärmeübertragungskoeffizienten von den in den Berechnungsmappen ermittelten Werten festgestellt wurden. Dies betrifft auch die Wärmeübertragungskoeffizienten (z. B. „grout to soil“), die nicht durch die konvektiven Wärmeübergangszahlen beeinflusst sind. Als Ursache für die teilweise sehr deutlichen Abweichungen werden Unterschiede zwischen der im BHE-Modul implementierten Berechnungsmethodik und der in (Diersch et al. 2010) und (Diersch 2014) für das BHE-Modul dokumentierten Berechnungsmethodik vermutet.

Die **FEFLOW Modelle mit BHE Randbedingung** weisen dieselben Modelldimensionen und Untergrundeigenschaften auf wie die vorangehend beschriebenen ausdiskretisierten Modelle. Im Gegensatz zu den ausdiskretisierten Modellen bestehen die Modelle mit BHE Randbedingung jedoch nicht aus 28 Schichten unterschiedlicher vertikaler Ausdehnung, sondern aus 40 Schichten mit einer vertikalen Ausdehnung von jeweils 1 m. Durch die Verwendung der BHE Randbedingung ist die Einbindung der EWS in das Modell wesentlich einfacher als bei den ausdiskretisierten Modellen. So wird bei Verwendung der BHE-Randbedingung eine Erdwärmesonde auf der obersten Schicht des Modells durch Zuweisung der BHE-Randbedingung zu einem Knoten implementiert und kann mit Hilfe des BHE-Editors (s. Abbildung 5-21 rechts) entsprechend den in Tabelle 5-3 aufgelisteten Angaben detailliert beschrieben werden.

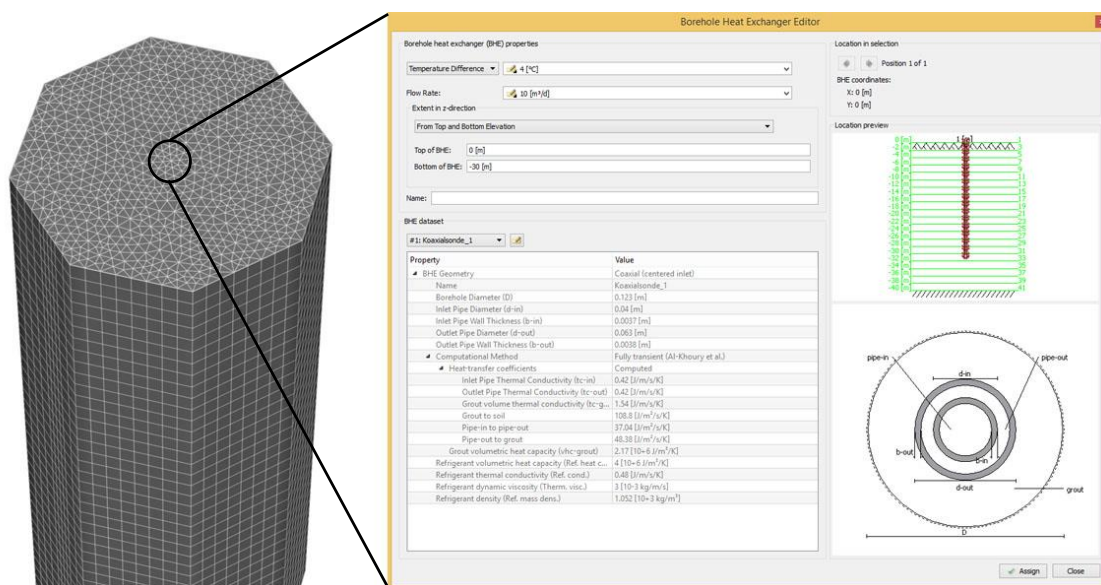


Abbildung 5-21: Einbindung der Erdwärmesonde mittels BHE-Randbedingung

Hinsichtlich der Vernetzung des Knotens auf dem die BHE-Randbedingung definiert ist, sind die Angaben in Diersch et al. (2010) zu berücksichtigen. Diersch et al. (2010) geben in Abhängigkeit der Anzahl der den BHE Knoten umgebenden Gitterpunkte (4, 6 oder 8) Werte für deren empfohlenen horizontalen Abstand zum BHE Knoten in Abhängigkeit des Bohrlochradius (bzw. -durchmessers) der EWS an, unter deren Verwendung eine bestmögliche Berechnungsgenauigkeit erreicht wird. Aus diesen Empfehlungen resultiert der in Abbildung 5-22 rechts angegebene Knotenabstand von 525 mm. Testsimulationen mit abweichend gewählten Knotenabständen zeigten, dass sich dieser Parameter sehr deutlich auf die aus den Simulationen ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte auswirken kann.

Durch Berücksichtigung der von Diersch et al. (2010) angegebenen Empfehlungen zum Knotenabstand zwischen dem BHE-Knoten und den horizontal angrenzenden Knoten reduzieren sich der Vernetzungsgrad und die damit direkt zusammenhängende Rechenzeit der Modelle mit BHE-Randbedingung gegenüber den Modellen mit ausdiskretisierten EWS erheblich (s. Abbildung 5-22), obwohl die Schichtanzahl bei den Modellen mit BHE-Randbedingung höher ist (40 ggü. 28 Schichten). Während die Gesamtzahl von Triangulationsprismen sich bei den Modellen mit ausdiskretisierten Erdwärmesonden auf $\sim 1,2$ Millionen beläuft, konnte durch die Nutzung der BHE-Randbedingung mit einer Gesamtzahl von etwa 60.000 Triangulationsprismen die Simulationszeit der nachfolgend beschriebenen 6-tägigen Thermal Response Tests von 12 Stunden auf etwa 30 Minuten reduziert werden.

Als Berechnungseinstellungen für die Simulationen mit BHE Randbedingung wurden die Standardeinstellungen von FEFLOW (Vollständig transiente Berechnung nach Al-Khoury et al. unter Verwendung berechneter Wärmeübertragungskoeffizienten) verwendet.

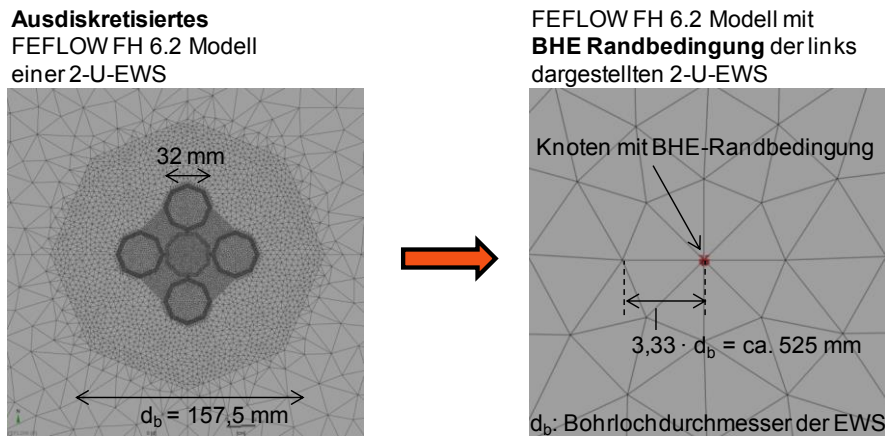


Abbildung 5-22: Darstellung der ausdiskretisierten Erdwärmesonde (links) und einer mit der in FEFLOW integrierten BHE Randbedingung definierten Erdwärmesonde (rechts)

Um sowohl mit den beschriebenen ausdiskretisierten FEFLOW Modellen als auch mit den FEFLOW Modellen mit BHE-Randbedingung die resultierenden effektiven thermischen Bohrwiderstände der betrachteten Koaxial-EWS und 2-U-EWS (s. Tabelle 5-3) ermitteln zu können, werden jeweils Thermal Response Tests (Gehlin 2002) über einen Zeitraum von 6 Tagen (d. h. 144 Stunden) simuliert und mit Hilfe der Linienquellentheorie entsprechend den Angaben in Gehlin (2002) ausgewertet. Hierbei wird zunächst für das Zeitintervall von $t_1 = 139 \text{ h}$ bis $t_2 = 144 \text{ h}$ die Untergrund-Wärmeleitfähigkeit ermittelt gemäß:

$$\lambda_g \approx \frac{P_{EWS}}{4 \cdot \pi \cdot L_{EWS}} \cdot \frac{m(t_2) - m(t_1)}{\vartheta_F(t_2) - \vartheta_F(t_1)} \quad (5-3)$$

P_{EWS} gibt hierbei die Heizleistung der betrachteten Erdwärmesonden der Länge L_{EWS} wieder, die mit den in Tabelle 5-3 angegebenen EWS-Volumenströmen unter Verwendung einer Temperaturdifferenz zwischen EWS-Vor- und -Rücklauf von 4 K betrieben werden. Das arithmetische Mittel aus den EWS-Vor- und Rücklauftemperaturen zum Zeitpunkt t wird als $\vartheta_F(t)$ bezeichnet.

Da die der Linienquellentheorie zu Grunde liegenden Annahmen (z. B. unendliche Linienquelle mit konstanter spezifischer Heizleistung P_{EWS}/L_{EWS} über die gesamte EWS-Länge) durch die betrachteten EWS lediglich näherungsweise erfüllt werden, kann die gemäß Gleichung 5-3 ermittelte Untergrund-Wärmeleitfähigkeit von der tatsächlichen, in den Berechnungsmodellen vorgegebenen Untergrund-Wärmeleitfähigkeit abweichen.

Aus der mit Hilfe der Linienquellenauswertung bestimmten Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds (s. Gleichung 5-3) wird schließlich $R_{b,eff}$ ermittelt gemäß:

$$R_{b,eff} \approx \frac{[\vartheta_F(t_2) - \vartheta_o] \cdot L_{EWS}}{P_{EWS}} - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot \lambda_g \cdot t_2}{c_{p,g,vol} \cdot r_b^2} \right) - \gamma \right] = \frac{[\vartheta_F(t_2) - \vartheta_b(t_2)] \cdot L_{EWS}}{P_{EWS}} \quad (5-4)$$

mit

ϑ_o ungestörte Untergrundtemperatur r_b Bohreradius

ϑ_b	Bohrlochwandtemperatur	t_2	Auswertzeitpunkt (144 h)
γ	Euler-Mascheroni - Konstante ($\approx 0,57721$)	$c_{p,g,vol}$	Volumetrische Wärmekapazität des Untergrunds

In Abbildung 5-23 ist für die Vor- und Rücklaufemperatur eines simulierten Thermal Response Tests der Vergleich zwischen einer ausdiskretisierten und einer mit Hilfe der BHE-Randbedingung simulierten Koaxial-EWS dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass sich die Temperaturentwicklungen zu Beginn des TRT um bis zu 1 Kelvin unterscheiden, diese sich mit fortlaufender Simulationszeit (ab $\sim 2,5$ Tagen) jedoch sehr stark annähern (Abbildung 5-23). Weiterhin zeigt der Vergleich, dass sich die Durchströmungsrichtung der Koaxial-EWS (CXA ggü. CXC) kaum auf die resultierenden EWS-Vor- und -Rücklaufemperaturen auswirkt.

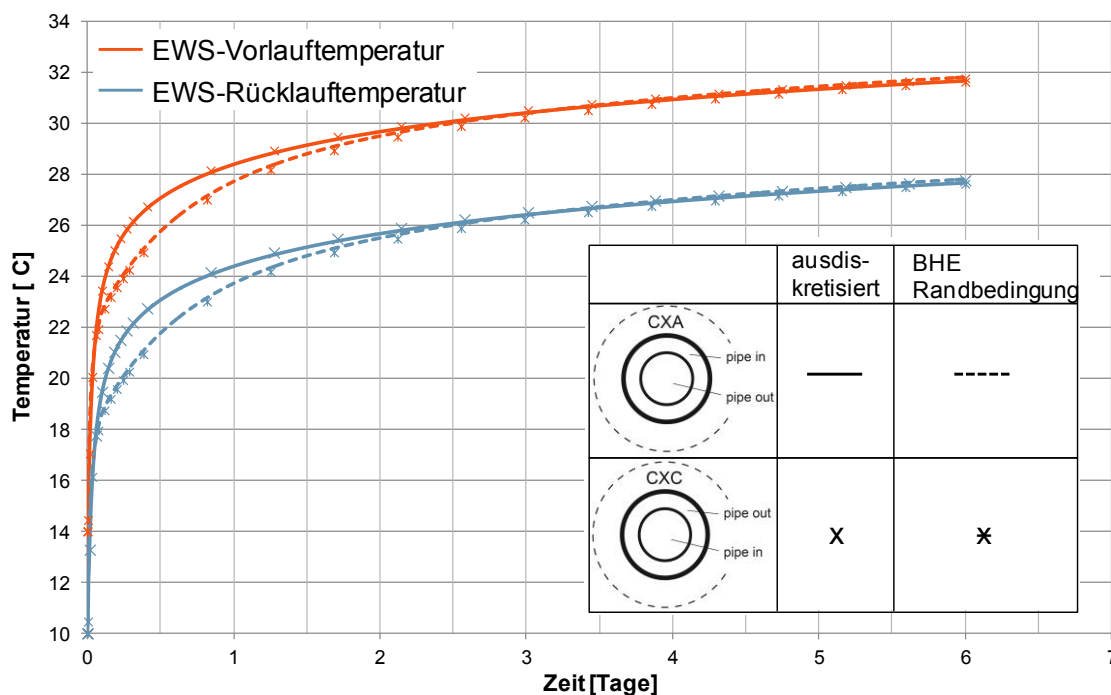


Abbildung 5-23: Exemplarischer Vergleich der Vor- und Rücklaufemperaturen von Koaxial-EWS während eines simulierten 6-tägigen TRTs

Weitere Details wie z. B. resultierende Temperaturtiefenprofile am Ende der simulierten Thermal Response Tests können aus Rolker & Riegger (2015) entnommen werden.

Der Vergleich der mit den drei betrachteten Simulations- und Berechnungsmethoden (1. ausdiskretisierte FEFLOW Finite Elemente Modelle, 2. FEFLOW mit BHE Randbedingung, 3. Multipole-Berechnung) ermittelten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände für die in Tabelle 5-3 spezifizierte/n Koaxial-EWS und 2-U-EWS ist in Tabelle 5-4 wiedergegeben. Tabelle 5-4 verdeutlicht zunächst, dass die tatsächliche Untergrund-Wärmeleitfähigkeit mit den als Referenz verwendeten, vollständig ausdiskretisierten FEFLOW-Modellen für die betrachteten EWS maximal um

2,6 % überschätzt wird. Damit ist für die Referenz-Modelle eine der zentralen Voraussetzungen zur genauen Ermittlung der resultierenden $R_{b,eff}$ -Werte nach Gleichung 5-4 erfüllt. Die Ergebnisse der Referenz-Simulationen zeigen wie auch die in Abbildung 5-23 dargestellten Temperaturverläufe, dass die Durchströmungsrichtung der Koaxial-EWS (CXA ggü. CXC) lediglich einen vernachlässigbaren Einfluss auf die resultierenden $R_{b,eff}$ -Werte hat.

Tabelle 5-4: Vergleich der mit FEFLOW-Simulationen mit Hilfe der Linienquellenauswertung bestimmten effektiven Wärmeleitfähigkeiten des Untergrunds und der daraus ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte mit $R_{b,eff}$ -Werten, die analytisch mit dem Multipole-Berechnungsverfahren für Koaxial-EWS und 2-U-EWS ermittelt wurden

		Koaxial-EWS*		2-U-EWS**
		CXA	CXC	
FEFLOW ausdiskretisiert	λ Untergrund [W/m/K]	2,72 (+2,6 %)	2,72 (+2,6 %)	2,69 (+1,5 %)
	$R_{b,eff}$ [K*m/W] (Referenz)	0,1473	0,1490	0,1090
FEFLOW BHE-Randbedingung	λ Untergrund [W/m/K]	2,50 (-5,7 %)	2,53 (-4,5 %)	2,34 (-11,7 %)
	$R_{b,eff}$ [K*m/W]	0,1374 (-6,7 %)	0,1360 (-8,7 %)	0,0733 (-32,8 %)
Multipole	$R_{b,eff}$ [K*m/W]	0,1478 (+0,3 %)	0,1478 (-0,8 %)	0,1086 (-0,4 %)

*: EWS-Länge 30 m, Bohrl Lochdurchmesser: 123 mm, EWS-Volumenstrom 10 m³/d Wasser-Glykol

** : EWS-Länge 30 m, Bohrl Lochdurchmesser: 157,3 mm, EWS-Volumenstrom 10,16 m³/d Wasser

In den FEFLOW-Modellen definierte (Referenz-)Untergrund-Wärmeleitfähigkeit: 2,65 W/m/K

Der Vergleich der mit den Referenz-Simulationen ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte mit den $R_{b,eff}$ -Werten der FEFLOW-Simulationen unter Verwendung der BHE-Randbedingung zeigt betragsmäßige Abweichungen zwischen ca. 7 % für die Koaxial-EWS (CXA) und ca. 33 % für die 2-U-EWS. Insbesondere die sehr hohe für die 2-U-EWS festgestellte Abweichung verdeutlicht, dass die FEFLOW-Berechnungen unter Anwendung der BHE-Randbedingung nicht geeignet sind für die in Abschnitt 5.6.1.2 durchgeführte Vergleichsuntersuchung zahlreicher verschiedener EWS-Konfigurationen. Ursächlich hierfür sind möglicherweise die weiter oben in diesem Abschnitt diskutierten Unstimmigkeiten bei der Berechnung der Wärmeübertragungskoeffizienten von 2-U-EWS innerhalb des FEFLOW BHE-Moduls.

Wie Tabelle 5-4 zeigt, stimmen die mit der Multipole-Berechnung ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte für die drei betrachteten EWS mit betragsmäßigen Abweichungen von weniger als 1 % sehr gut mit den Referenz- $R_{b,eff}$ -Werten überein, die mit den vollständig ausdiskretisierten FEFLOW-Modellen ermittelt wurden. Bei der Multipole-Berechnung ist eine Unterscheidung der ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte nach der Durchströmungsrichtung der EWS (CXC ggü. CXA) nicht möglich. Wie die Ergebnisse der Referenz-Simulationen zeigen, ist dies jedoch auch nicht erforderlich. Gleichbedeutend damit veranschaulichen Beier et al. (2013), dass die Austrittstemperatur einer Koaxial-EWS und der Wärmetransfer zwischen deren Wärmeträgerfluid und dem Untergrund für eine einheitlich definierte Eintrittstemperatur im (quasi-)stationären Zustand, der am Ende eines Thermal Response Tests im Bohrloch vorliegt, unabhängig von der Durchströmungsrichtung der Koaxial-EWS ist. Zusammenfassend kann damit auf Basis des für exemplarische Koaxial-EWS und 2-U-EWS durchgeführten Simulations- und Berechnungsmethodenvergleichs festgehalten werden, dass das Multipole-Berechnungsverfahren geeignet ist, die unter sehr großem Arbeits- und Zeitauf-

wand mit Hilfe ausdiskretisierter 3D-Simulationsmodelle ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte unter Berücksichtigung der EWS-Geometrie und der EWS-Betriebsbedingungen sehr schnell und mit hinreichender Genauigkeit zu reproduzieren. Daher wird das Multipole-Berechnungsverfahren im folgenden Abschnitt für den Vergleich zahlreicher verschiedener Konfigurationen von Koaxial-EWS und 2-U-EWS verwendet.

5.6.1.2. Vergleichsuntersuchung verschiedener EWS-Konfigurationen

Als Ausgangsbasis für die Vergleichsuntersuchung unterschiedlicher EWS-Konfigurationen wurden für zwei unterschiedlich große Koaxial-EWS sowie für eine typische 2-U-EWS Referenz-EWS-Konfigurationen definiert. Die Bohrlochquerschnitte dieser drei Referenz-EWS-Konfigurationen sind in Tabelle 5-5 maßstäblich dargestellt. Als Sondenrohrmaterial dient in allen Fällen Polyethylen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,42 W/m/K. Die beiden in Tabelle 5-5 definierten Koaxial-EWS spiegeln die Bandbreite unterschiedlicher, marktverfügbarer Koaxial-EWS wider, sie bilden jedoch kein konkretes Produkt ab.

Zur Festlegung der Referenz-EWS-Konfigurationen wurden jeweils auf den Sondentyp abgestimmte typische Bohrlochdurchmesser angesetzt. Die Tiefe der Referenz-EWS wurde analog zu den in den Realmaßstabsversuchen untersuchten EWS mit 30 m festgelegt.

Wie die Ergebnisse des Forschungsvorhabens EWSplus (Riegger 2013) zeigen, nimmt der Schenkelabstand der Sondenrohre in 2-U-EWS, in denen keine Abstandshalter oder Zentrierhilfen eingebaut sind, mit zunehmendem Bohrlochdurchmesser zu. Um diesen Aspekt bei der Ermittlung des Schenkelabstands der betrachteten 2-U-EWS berücksichtigen zu können, wurde die in Abbildung 5-24 dargestellte lineare Korrelation verwendet, die aus den Versuchsergebnissen des Forschungsvorhabens EWSplus an 30 m tiefen, rückgebauten und analysierten Erdwärmesonden abgeleitet wurde. Es wird darauf hingewiesen, dass die in Abbildung 5-24 angegebene Korrelation auf Grund der geringen Anzahl der dieser zu Grunde liegenden EWS und der teilweisen Verwendung von Abstandshaltern in einer der betrachteten EWS lediglich als Schätzwert für den zu erwartenden Schenkelabstand dienen kann.

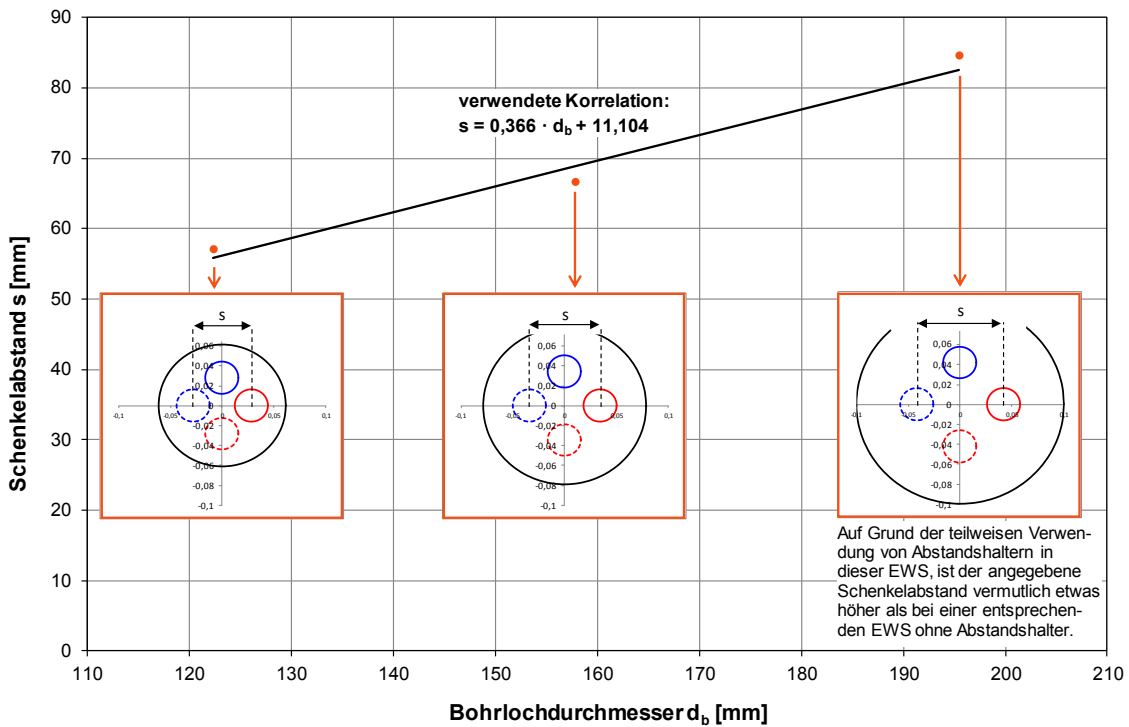


Abbildung 5-24: Für die Vergleichsuntersuchung verwendete Abhängigkeit des Schenkelabstands einer 2-U-EWS ohne Abstandshalter/Zentrierhilfen vom Bohrlochdurchmesser; die Bohrlochdurchmesser und Schenkelabstände der drei betrachteten EWS wurden (Riegger 2013) entnommen

Daneben sehen die Referenzkonfigurationen eine Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials in Höhe von 1,5 W/m/K, eine Untergrund-Wärmeleitfähigkeit in Höhe von 2,0 W/m/K sowie ein Wasser-Glykol-Gemisch (mit den in FEFLOW 6.2 hinterlegten Stoffwerten) als Wärmeträgermedium vor.

Ausgehend von einer angenommenen längenspezifischen Wärmeentzugsleistung der EWS \dot{q}_{EWS} von 40 W/m und einer angenommenen Temperaturspreizung $\Delta\vartheta_{EWS}$ zwischen Vor- und Rücklauf von 4 Kelvin berechnet sich der EWS-Volumenstrom der Referenzkonfigurationen als auch von EWS-Konfigurationen mit abweichender EWS-Länge zu:

$$V_{EWS} = \frac{\dot{q}_{EWS} \cdot L_{EWS}}{\rho_F \cdot c_{p,F} \cdot \Delta\vartheta_{EWS}} = \frac{\dot{q}_{EWS}}{\rho_F \cdot c_{p,F} \cdot 4 \text{ K}} \tag{ 5-5 }$$

mit

L_{EWS} = Sondenlänge [m]

ρ_F = Dichte Fluid / Wärmeträgermedium [kg/m³]

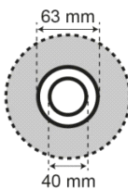
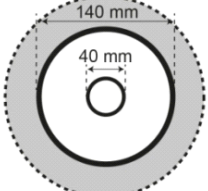
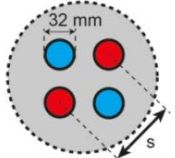
$c_{p,F}$ = Wärmekapazität Fluid / Wärmeträgermedium [kJ/kg/K]

Hierbei wird vereinfachend angenommen, dass die erforderliche Temperaturspreizung von 4 K vollständig durch die betrachtete EWS zur Verfügung gestellt wird. Reihenschaltungen von EWS,

die einen höheren EWS-Volumenstrom und damit verringerte konvektive Wärmeübergangswiderstände in den einzelnen EWS zur Folge haben, werden nicht berücksichtigt.

In Tabelle 5-5 sind sämtliche Parameter der Referenz-EWS-Konfigurationen angegeben.

Tabelle 5-5: Referenz-EWS-Konfigurationen der Vergleichsuntersuchung

	"kleine" Koaxial-EWS	"große" Koaxial-EWS	2-U-EWS
Sondenrohranordnung und Durchströmungsrichtung (bei den Koaxial-EWS ist keine Unterscheidung der Durchströmungsrichtung erforderlich)			
Sondenrohrmaße [mm]	63 x 3,8 mm 40 x 3,7 mm	140 x 5,4 mm 40 x 3,5 mm	32 x 2,9 mm
Schenkelabstand s [mm]	-	-	65,6 mm
Bohrlochdurchmesser	123 mm	200 mm	150 mm
Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials	1,50 W/m/K		
Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds	2,00 W/m/K		
EWS-Länge	30 m		
Wärmeträgermedium:	Wasser-Glykol (Stoffwerte entsprechend den Standardwerten des FEFLOW BHE Modells)		
- Wärmeleitfähigkeit	0,48 W/m/K		
- Dichte (ρ_F)	1052,0 kg/m ³		
- Wärmekapazität ($c_{p,F}$)	3,8023 kJ/kg/K		
- dynamische Viskosität	0,003 kg/m/s		
EWS-Volumenstrom	$\dot{V}_{EWS} = \frac{L_{EWS} \cdot \dot{q}_{EWS}}{\rho_F \cdot c_{p,F} \cdot \Delta \vartheta_{EWS}} = \frac{L_{EWS} \cdot 40 \text{ W/m}}{\rho_F \cdot c_{p,F} \cdot 4 \text{ K}}$		

\dot{q}_{EWS} : längenspezifische Leistung der Erdwärmesonde

$\Delta \vartheta_{EWS}$: Temperaturdifferenz zwischen EWS-Vor- und -Rücklauf



Abbildung 5-25: Unterschiedliche Varianten der EWS-Geometrie zur Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangs.
Links: Gewelltes Außenrohr; Rechts: Verwirbler zwischen Innen- und Außenrohr

Die im Rahmen der Vergleichsuntersuchung berechneten $R_{b,eff}$ -Werte werden mit Hilfe des in Abschnitt 5.6.1.1 ausgewählten Multipole-Berechnungsverfahrens berechnet unter Verwendung der in Diersch (2014) für die BHE-Randbedingung angegebenen Nußelt-Korrelationen zur Bestimmung der konvektiven Wärmeübergangszahlen an den Innen- und Außenseiten der PE-Rohre der 2-U-EWS und der Koaxial-EWS. Die verwendeten Nußelt-Korrelationen (Diersch 2014) basieren auf der Verwendung von Rohren mit einem Kreisquerschnitt. Geometrische Konzeptionen, die insbesondere in Koaxial-EWS zur Erhöhung der konvektiven Wärmeübergangszahlen eingesetzt werden (wie z. B. ein gewelltes Außenrohr, Verwirbler o. Ä.; s. Abbildung 5-25), können mit den verwendeten Nußelt-Korrelationen nicht direkt berücksichtigt werden.

Um das Potential einer Verbesserung des konvektiven Wärmeübergangs im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr zur Reduzierung von $R_{b,eff}$ dennoch untersuchen zu können, wurde ein theoretischer Ansatz verwendet. Bei diesem Ansatz wird die gemäß

$$Re = \frac{v_{Ring} \cdot \nu_{h, Ring}}{\nu_F} = \frac{v_{EWS}}{\nu_F \cdot \pi \cdot (d_{Ring,a} + d_{Ring,i})} \quad (5-6)$$

definierte Reynolds-Zahl Re im (Außen-)Ring zwischen Innen- und Außenrohr mit einem fiktiven Skalierungsfaktor, der größer als 1 ist, skaliert. Die Ermittlung der zur $R_{b,eff}$ -Berechnung verwendeten Nußelt- und Wärmeübergangszahlen erfolgt dann mit den in Diersch (2014) angegebenen Korrelationen unter Verwendung der skalierten Re -Zahlen.

In Gleichung 5-5 gibt $d_{h, Ring}$ den hydraulischen Durchmesser des Außenrings mit den Innen- und Außendurchmessern $d_{Ring,i}$ und $d_{Ring,a}$ und v_{Ring} die Strömungsgeschwindigkeit im Außenring wieder.

Im Rahmen der Vergleichsuntersuchung werden in einem ersten Schritt die für die beiden betrachteten Koaxial-EWS resultierenden $R_{b,eff}$ -Werte in Abhängigkeit der Re -Zahl im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr für EWS-Tiefen von 30 und 50 m verglichen (s. Abbildung 5-26). Die für die tatsächlichen EWS-Volumenströme nach Gleichung 5-5 ermittelten, unskalierten Re -Zahlen werden hierbei jeweils als „ $Re \cdot 1$ “ bezeichnet, während z. B. die mit dem Faktor 10 skalierten Re -Zahlen als „ $Re \cdot 10$ “ bezeichnet werden.

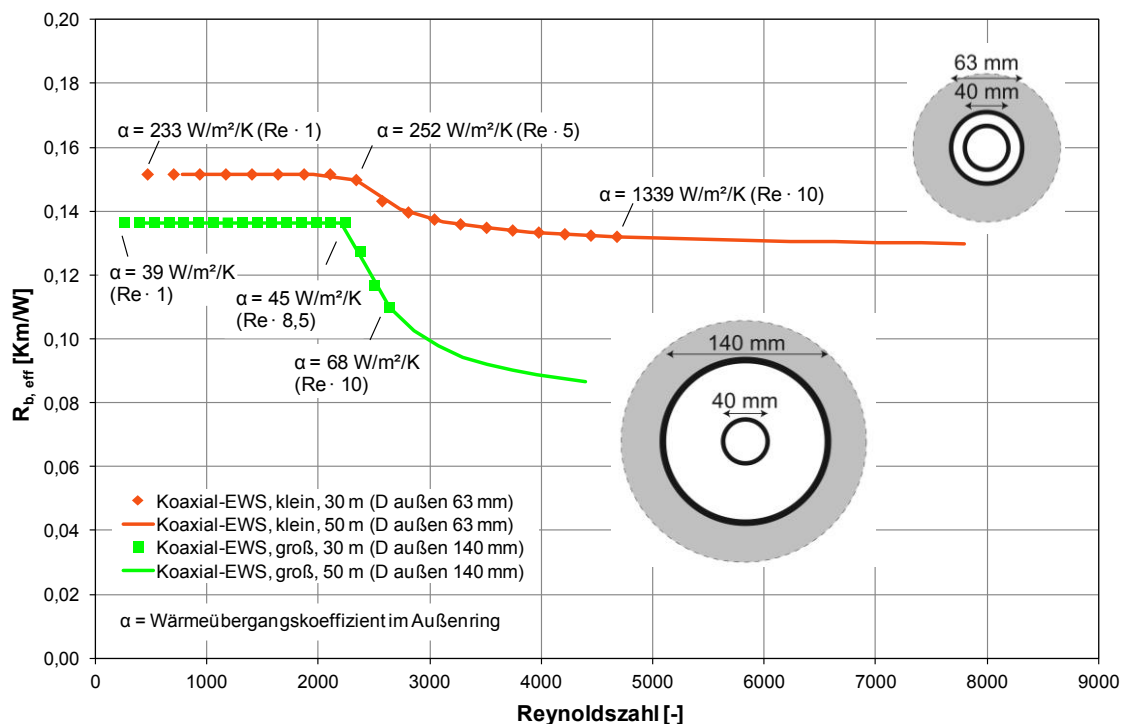


Abbildung 5-26: Effektiver thermischer Bohrlochwiderstand in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl (Re) im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr für die betrachteten Koaxial-EWS

In Abbildung 5-26 ist zu erkennen, dass bei gleicher Re-Zahl der effektive thermische Bohrlochwiderstand der großen Koaxial-EWS stets kleiner ist als der der kleinen Koaxial-EWS. Deutlich erkennbar ist außerdem der Einfluss der erhöhten Turbulenz auf den Wärmeübergangskoeffizienten und den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand ab Reynolds-Zahlen von 2300 und mehr. Auffällig ist, dass bei der großen Koaxial-EWS der Umschwung von laminarer zu turbulenter Strömung im Außenring erst ab einer fiktiven Erhöhung der Reynolds-Zahl um das 8,5-fache geschieht, wohingegen bei der kleinen Koaxial-EWS dieser Umschwung bereits beim Skalierungsfaktor 5 stattfindet. Die prozentuale Reduzierung von $R_{b,eff}$ gegenüber dem Referenzfall („Re · 1“) ist jedoch bei der kleinen Koaxial-EWS geringer als bei der großen Koaxial-EWS.

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss der Sondenlänge auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand untersucht. In Abbildung 5-27 sind für die beiden betrachteten Koaxial-EWS jeweils drei Varianten mit unterschiedlicher Skalierung der Reynolds-Zahlen im Außenring („Re · 1“, „Re · 2“, „Re · 4“) für Sondenlängen zwischen 20 m und 100 m dargestellt. Die Sondenlänge wird dabei jeweils in 5-m-Schritten variiert. Da in der Praxis bei 2-U-EWS keine zusätzlichen Einbauten zur Verbesserung des konvektiven Wärmeübergangs eingesetzt werden, ist für die 2-U-EWS ausschließlich der Referenzfall „Re · 1“ dargestellt. Die durchgezogenen Linien stellen die Referenzfälle ohne fiktive Erhöhung der Reynolds-Zahl dar.

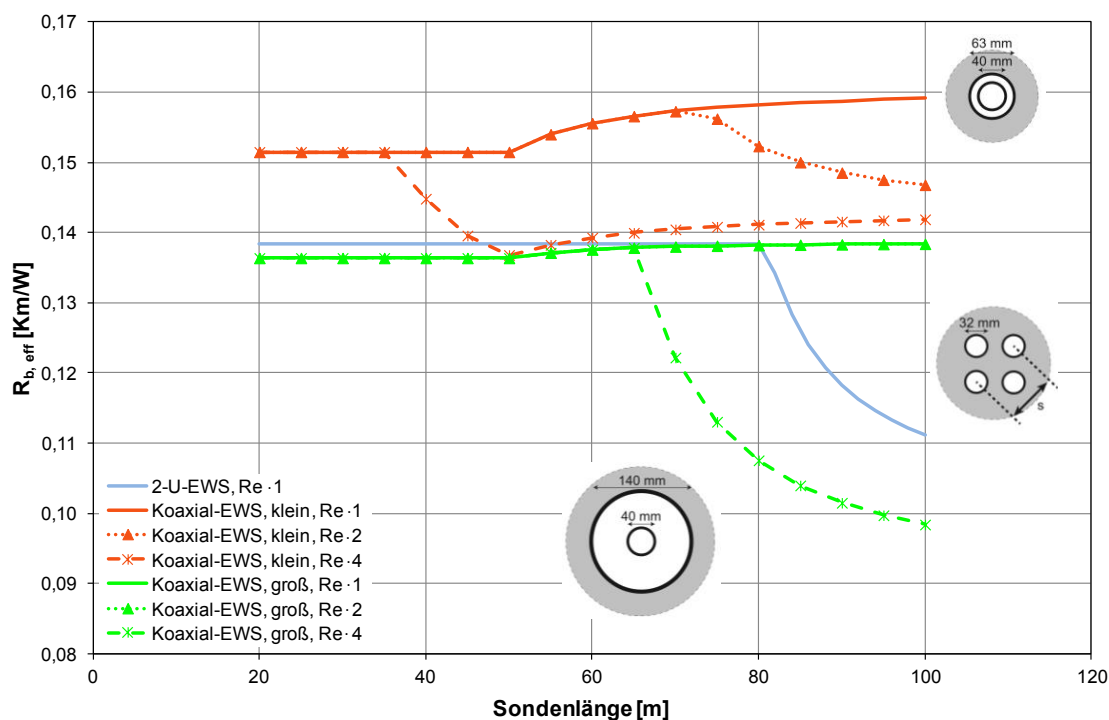


Abbildung 5-27: $R_{b,eff}$ in Abhängigkeit der Sondenlänge und Reynolds-Zahl für Koaxial-EWS und 2-U-EWS

Es ist zu erkennen, dass es bei der kleinen Koaxial-EWS für diesen Referenzfall ab einer Sondenlänge von 50 m zu einer Erhöhung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands kommt. Dieser negative Effekt beruht darauf, dass ab dieser Sondenlänge bzw. ab dem zu dieser Sondenlänge nach Gleichung 5-5 gehörigen EWS-Volumenstrom die Strömung im Innenrohr turbulent und somit der Wärmeübergangskoeffizient im Innenrohr erhöht wird, was zu einem erhöhten thermischen Kurzschluss zwischen Innen- und Außenrohr führt. Bei der großen Koaxial-EWS, deren Innenrohr annähernd identische Maße wie die kleine EWS aufweist (s. Tabelle 5-5), ist für den Referenzfall „Re · 1“ (durchgezogene grüne Linie) ab einer Sondenlänge von 50 m ebenso eine Erhöhung von $R_{b,eff}$ festzustellen, die allerdings geringer ist als bei der kleinen Koaxial-EWS. Im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr findet bei den Referenzfällen der großen und kleinen Koaxial-EWS selbst bei Sondenlängen von 100 m kein laminar-turbulenter Umschlag statt. Wird die Reynolds-Zahl im Außenring fiktiv verdoppelt (dreieckige Markierung in Abbildung 5-27), so ist bei der großen Koaxial-EWS keine Änderung von $R_{b,eff}$ erkennbar. Hingegen ändert sich das Strömungsregime bei der kleinen Koaxial-EWS im Außenring ab einer Sondenlänge von 70 m von laminarer zu turbulenter Strömung, was zu einer Verringerung von $R_{b,eff}$ führt.

Bei einer Vervielfachung der Reynolds-Zahl (gestrichelte Linien mit Kreuzmarkierung in Abbildung 5-27) kommt es bei der kleinen Koaxial-EWS bereits ab einer Sondenlänge von 35 m zu einem positiven Effekt bzw. zu einer deutlichen Verringerung von $R_{b,eff}$. Für Sondenlängen zwischen 50 und 100 m ändert sich $R_{b,eff}$ im betrachteten Fall auf Grund der gegenseitigen Kompensation der positiven (Erhöhung der Re-Zahl im Außenring) und negativen (Erhöhung der Re-Zahl im Zentralrohr) Effekte nur relativ geringfügig. Im Gegensatz zur kleinen Koaxial-EWS tritt der

positive Effekt bei vervierfachter Re-Zahl im Außenring bei der großen Koaxial-EWS zwar erst bei einer größeren Sondenlänge (ab 65 m) auf, jedoch in deutlich stärkerer Ausprägung.

Bei der 2-U-EWS kommt es ab einer Sondenlänge von 80 m zu einer turbulenten Strömung in den Sondenrohren und damit zu einer deutlichen Verringerung von $R_{b,eff}$.

Vergleicht man die unterschiedlichen Sondengeometrien, so stellt man fest, dass der effektive thermische Bohrlochwiderstand der kleinen Koaxial-EWS mit Ausnahme der Sondenlängen 50 und 55 m über den gesamten Tiefenbereich höher ist als der der großen Koaxial-EWS und der der 2-U-EWS gleicher Länge – selbst wenn ausschließlich für die kleine Koaxial-EWS eine fiktive Erhöhung der Re-Zahl stattfindet. Ob für eine bestimmte Tiefe die große Koaxial-EWS oder die 2-U-EWS den geringsten $R_{b,eff}$ -Wert aufweist, hängt von der betrachteten Tiefe und von der Annahme hinsichtlich der fiktiven Re-Zahl im Außenring der großen Koaxial-EWS ab.

In einer weiteren Untersuchung wurde ermittelt, ob und welche materialspezifischen Änderungen der Sondenrohre zu einer Optimierung der thermischen Effizienz der 50 m tiefen EWS führen können. Dafür wurde ausgehend von der typischen Wärmeleitfähigkeit von Polyethylen ($\lambda = 0,42$ W/m/K) für die beiden Koaxial-EWS die Wärmeleitfähigkeit des Innenrohrs sukzessive verringert bzw. die des Außenrohres erhöht. Daneben ist für eine 2-U-EWS eine Erhöhung bzw. eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre ausgehend von der Referenz-Leitfähigkeit von $\lambda = 0,42$ W/m/K dargestellt. In Abbildung 5-28 ist zu erkennen, dass bei Koaxial-EWS in den betrachteten Fällen durch eine geringere Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres $R_{b,eff}$ nur geringfügig verringert werden kann. Hingegen ist der Einfluss eines besser wärmeleitenden Außenrohres deutlich ersichtlich. Bei der betrachteten 2-U-EWS kommt es bei der Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre aufgrund der schlechteren Wärmeanbindung des Untergrunds erwartungsgemäß zu einer stetigen Erhöhung von $R_{b,eff}$. Analog zu den Koaxial-EWS führt eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu einer verbesserten thermischen Effizienz der Erdwärmesonde, wobei der positive Einfluss auf die Gesamteffizienz im Vergleich zu den Koaxial-EWS etwas geringer ist.

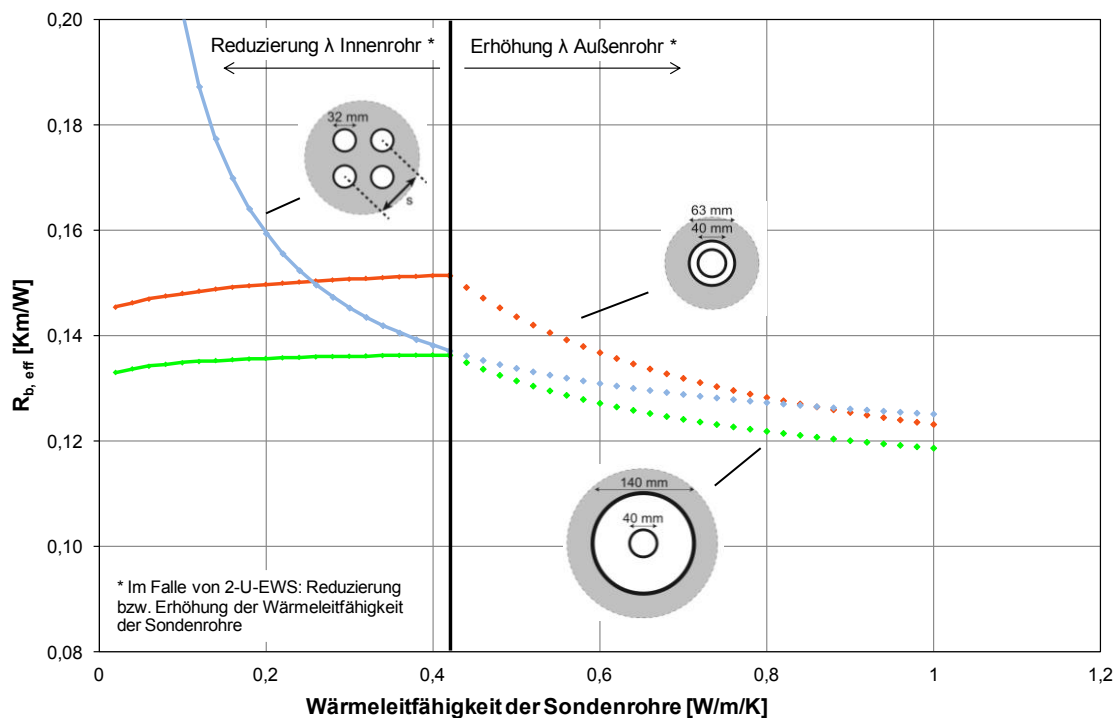


Abbildung 5-28: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand einer 30 m tiefen 2-U-EWS sowie 30 m tiefer großer und kleiner Koaxial-EWS

Die Betrachtungen in den vorstehenden Diagrammen (Abbildung 5-26 bis Abbildung 5-28) sollen ein Verständnis zum Einfluss verschiedener Faktoren (EWS-Geometrie, Strömungsart in der EWS, Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Rohre) auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand von Koaxial-EWS und 2-U-EWS ermöglichen. Vergleichende Bewertungen der verschiedenen Koaxial-EWS und 2-U-EWS sind auf Basis dieser Betrachtungen nicht möglich, da die betrachteten Erdwärmesonden unterschiedliche Bohrlochdurchmesser aufweisen. Für eine aussagekräftige Effizienzbewertung bietet sich gemäß Riegger (2013 und 2016) an Stelle eines Vergleichs von effektiven thermischen Bohrlochwiderständen ein Vergleich sogenannter normierter effektiver thermischer Bohrlochwiderstände ($R_{b,eff,norm}$) an. Bei der Verwendung von normierten effektiven thermischen Bohrlochwiderständen werden Unterschreitungen eines definierten normierten Bohrlochdurchmessers (hier: $d_{b,norm} = 200$ mm) durch den tatsächlichen Bohrlochdurchmesser in Form des thermischen Widerstands R_{Ring} eines „Erdreichrings“ berücksichtigt. Bei diesem in Abbildung 5-29 veranschaulichten und in Riegger (2013 und 2016) detailliert erläuterten Vorgehen gilt für EWS mit $d_b < d_{b,norm}$:

$$R_{b,eff,norm} = R_{b,eff} + R_{Ring} \tag{ 5-7 }$$

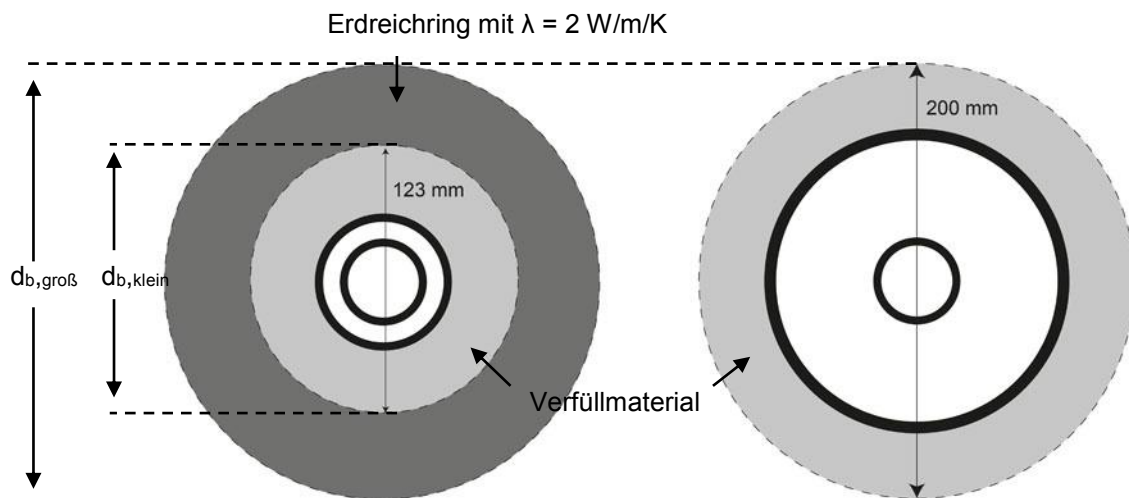


Abbildung 5-29: Schaubild zur Veranschaulichung der Bedeutung des Bohrdurchmessers für den Vergleich der effektiven thermischen Bohrlochwiderstände einer kleinen und einer großen Koaxial-EWS

Für die Berechnung der nachfolgend angegebenen normierten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände werden entsprechend des bei der Vergleichsuntersuchung maximal auftretenden Bohrdurchmessers ein Wert von $d_{b,norm} = 200 \text{ mm}$ und eine Untergrund-Wärmeleitfähigkeit von 2 W/m/K verwendet.

An Hand von Abbildung 5-30 wird die Bedeutung der Verwendung des normierten effektiven thermischen Bohrlochwiderstands an Stelle des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands für eine vergleichende Bewertung der betrachteten EWS deutlich. Die Balken in der linken Hälfte des Diagramms zeigen $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ für die kleine Koaxial-EWS mit einem Bohrdurchmesser von 123 mm , während die rechte Hälfte des Diagramms die $R_{b,eff}$ -Werte der großen Koaxial-EWS mit einem Bohrdurchmesser von 200 mm wiedergibt. Da bei der großen Koaxial-EWS d_b und $d_{b,norm}$ gleich sind, sind für diese EWS auch $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ gleich. Sämtliche Balken beziehen sich auf eine Sondenlänge von 50 m mit entsprechendem EWS-Volumenstrom. Innerhalb der beiden Diagrammhälften entspricht jeweils der linke Balkenverbund der Referenzkonfiguration ohne fiktive Erhöhung der Reynolds-Zahl. Bei dem darauffolgenden Balkenverbund ist eine Erhöhung der Reynolds-Zahl im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr um den Faktor 4 hinterlegt und der rechte Balkenverbund beschreibt jeweils eine „optimierte“ Koaxial-EWS. Diese Optimierung ist eine „Best-Case-Annahme“ und beinhaltet eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres auf den Wert von $\lambda = 0,1 \text{ W/m/K}$, eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Außenrohres auf $\lambda = 1,0 \text{ W/m/K}$ und eine Erhöhung der Reynolds-Zahl um den Faktor 4.

Farblich dargestellt ist in Abbildung 5-30 der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand. Die grau gestrichelten Balken zeigen jeweils die normierten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände.

Es ist zu erkennen, dass bei der Betrachtung der normierten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände ein noch größerer Unterschied zwischen der kleinen und der großen Koaxial-EWS besteht als bei Betrachtung der effektiven thermischen Bohrlochwiderstände. Beim Vergleich der

Balkengruppen für die unterschiedlichen Reynolds-Skalierungsfaktoren „ $Re \cdot 1$ “ und „ $Re \cdot 4$ “ ist festzustellen, dass sich $R_{b,eff}$ bei der kleinen Koaxial-EWS verringert, wohingegen sich $R_{b,eff}$ bei der großen Koaxial-EWS nicht ändert. Dies stimmt mit dem Vergleich in Abbildung 5-27 überein, bei dem eine Verringerung von $R_{b,eff}$ durch fiktive Vervielfachung der Re-Zahl im Außenring für die große Koaxial-EWS erst ab einer Sondenlänge von mehr als 65 m zu erkennen ist.

Zusammenfassend ist auf Basis von Abbildung 5-30 festzuhalten, dass der normierte effektive thermische Bohrlochwiderstand bei der großen Koaxial-EWS für Sondenlängen von 50 m geringer ist als der der kleinen Koaxial-EWS. Entsprechende Vergleiche für 30 und 100 m tiefe EWS (s. Anhang 9 und Anhang 10), sowie für 30 und 100 m tiefe, mit Wasser betriebene Koaxial-EWS (s. Anhang 11 und Anhang 12) zeigen dasselbe Ergebnis. Die Stoffeigenschaften von Wasser wurden hierbei entsprechend den Angaben in dem Programm EED (Blomberg et al. 2008) für Wasser der Temperatur von 5 °C (Wärmeleitfähigkeit: 0,572 W/m/K; spezifische Wärmekapazität: 4,202 kJ/kg/K; Dichte: 1000 kg/m³; dynamische Viskosität: 0,00152 kg/m/s) angesetzt.

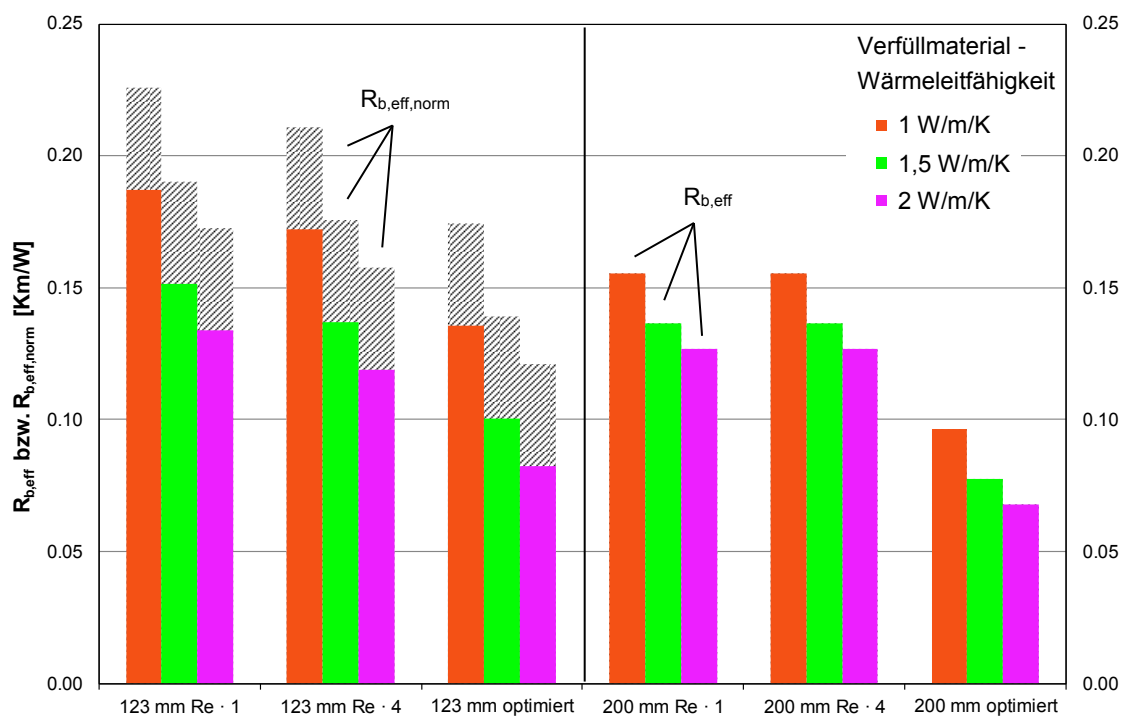


Abbildung 5-30: Vergleich verschiedener 50 m tiefer Koaxial-EWS. Linke Hälfte: $R_{b,eff}$ (farbige Balken) und $R_{b,eff,norm}$ (gestrichelte Balken) für die kleine Koaxial-EWS mit einem Bohrlochdurchmesser von 123 mm. Rechte Hälfte: $R_{b,eff}$ für die große Koaxial-EWS mit einem Bohrlochdurchmesser von 200 mm. Bei der optimierten Koaxial-EWS („123 mm optimiert“ bzw. „200 mm optimiert“) wurde für die Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres $\lambda = 0,1$ W/m/K und für das Außenrohr $\lambda = 1,0$ W/m/K angesetzt. Zusätzlich ist bei diesen Varianten die Reynoldszahl im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr um den Faktor 4 erhöht. Sämtliche Konfigurationen wurden für drei unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Verfüllmaterials betrachtet (1 W/m/K, 1,5 W/m/K und 2 W/m/K)

Das Ergebnis des Vergleichs verschiedener 30 und 100 m tiefer, mit Wasser-Glykol-Gemisch betriebener 2-U-EWS mit verschiedenen Bohrlochdurchmessern und Verfüllmaterial-Wärmeleitfähigkeiten zeigt Abbildung 5-31. Der Schenkellabstand der Sondenrohre in Abhängigkeit des Bohrlochdurchmessers wurde für diesen Vergleich mit der oben erläuterten, in Abbildung 5-24 dargestellten linearen Korrelation ermittelt.

Anhand von Abbildung 5-31 wird zunächst deutlich, dass $R_{b,eff}$ mit zunehmender Verfüllmaterial-Wärmeleitfähigkeit abnimmt. Daneben veranschaulicht Abbildung 5-31 die verringerten $R_{b,eff}$ -Werte durch den verbesserten konvektiven Wärmeübergang bei den mit einem höheren EWS-Volumenstrom betriebenen 100 m tiefen EWS. Wichtig festzuhalten ist weiterhin, dass $R_{b,eff}$ mit dem Bohrlochdurchmesser zunimmt, wohingegen $R_{b,eff,norm}$ abnimmt. Daraus ergibt sich, dass sowohl bei Tiefen von 30 als auch von 100 m die effizienteste 2-U-EWS durch eine hohe Verfüllmaterial-Wärmeleitfähigkeit (2 W/m/K) als auch einen großen Bohrlochdurchmesser (200 mm) gekennzeichnet ist.

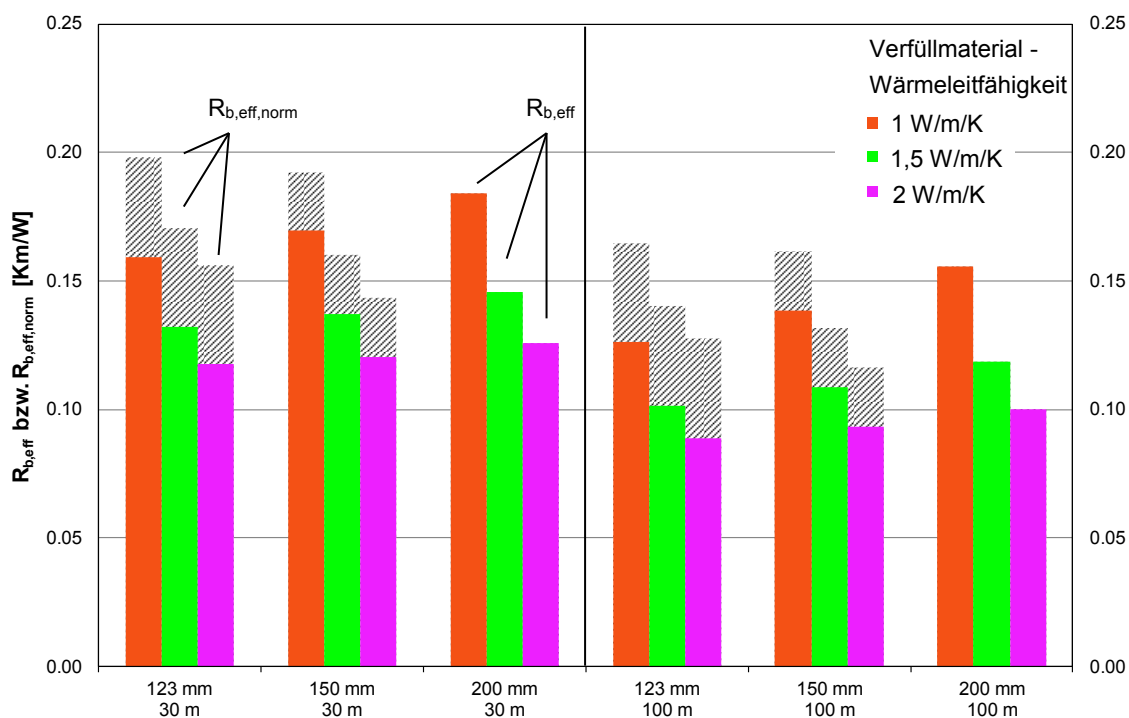


Abbildung 5-31: Vergleich verschiedener 2-U-EWS-Varianten mit unterschiedlichen Bohrlochdurchmessern (123 mm, 150 mm und 200 mm) für 30 m tiefe bzw. 100 m tiefe 2-U-EWS. Analog zu Abbildung 5-30 beschreiben die gestrichelten Balken $R_{b,eff,norm}$

Führt man die Ergebnisse aus Abbildung 5-30 und Abbildung 5-31 zusammen, kann für verschiedene EWS-Längen ein Vergleich von Koaxial-EWS und 2-U-EWS erfolgen. Dieser Vergleich zeigt an Hand der normierten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände, dass bei den getroffenen Berechnungsannahmen (s. Erläuterung zu Beginn dieses Abschnitts) die EWS mit großen Bohrlochdurchmessern von 200 mm am effizientesten sind. Die EWS mit großem Bohrlochdurchmesser können dabei sowohl als 2-U-EWS oder als große Koaxial-EWS ausgeführt sein. Inwiefern

bei Koaxial-EWS weitere Effizienzverbesserungen durch eine Verbesserung des Wärmeübergangs im Außenring möglich sind, kann aktuell nicht zuverlässig beantwortet werden. Die durchgeführten Berechnungen unter Verwendung fiktiver skaliertes Re-Zahlen im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr zeigen in diesem Bereich ein großes Potenzial auf. Weiter sind in den Berechnungen mögliche positive Einflüsse aufgrund von Ruhephasen der Wärmepumpe und einer daraus resultierenden Regeneration der großvolumigen Koaxial-EWS nicht berücksichtigt.

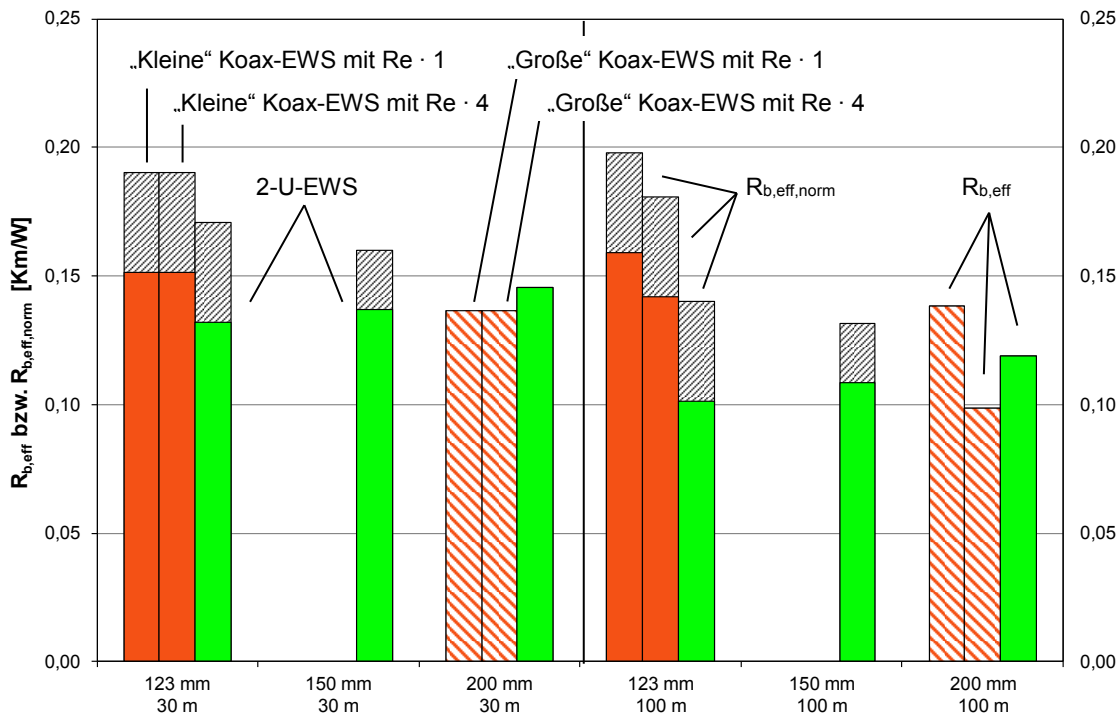


Abbildung 5-32: Vergleich zwischen Koaxial-EWS und 2-U-EWS für eine Sondenlänge von 30 m (linke Hälfte) und 100 m (rechte Hälfte) für $\lambda_{\text{Verfüllmaterial}}: 1,5 \text{ W/m/K}$. Orange Balken: $R_{b,eff}$ für kleine Koaxial-EWS mit Bohrlochdurchmesser von 123 mm, grüne Balken: 2-U-EWS. Orange gestrichelte Balken: Große Koaxial-EWS mit Bohrlochdurchmesser von 200 mm. Schwarz gestrichelte Balken: $R_{b,eff,norm}$.

Als Ergebnis der theoretischen Vergleichsuntersuchung ist zusammenfassend festzuhalten, dass Koaxial-EWS mit großem Sonden Durchmesser (z.B. 140 mm) und entsprechend großem Bohrlochdurchmesser (z.B. 200 mm) aus Effizienz Aspekten eine interessante Alternative zu den heute üblichen 2-U-EWS sein können. Die durchgeführten Untersuchungen legen nahe, dass mit entsprechenden Koaxial-EWS ggf. sogar relevante Verringerungen von $R_{b,eff}$ gegenüber den heute üblichen 2-U-EWS erzielt werden können – insbesondere wenn es gelingt, die Wärmeübergangszahl an der Innenseite des Außenrohrs der Koaxial-EWS durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Verwirbler, gewelltes Außenrohr o.ä.) zu erhöhen. Für Koaxial-EWS mit geringem Sonden Durchmesser (z.B. 63 mm) und entsprechend kleinen Bohrlochdurchmessern (ca. 123 mm) konnten keine Effizienzvorteile gegenüber 2-U-EWS aufgezeigt werden.

5.6.2. Messung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands

Der in Abschnitt 5.2 erläuterte Realmaßstabsversuchsaufbau wurde so konzipiert und realisiert, dass in diesem Versuchsaufbau der effektive thermische Bohrlochwiderstand der ca. 30 m tiefen Versuchs-Erdwärmesonden bestimmt werden kann. Das hierzu verwendete Mess- und Auswertverfahren wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus (Riegger 2013) entwickelt und ist im Detail in (Riegger 2016) beschrieben.

Bei diesem Verfahren werden die in PE-Innenrohren im Versuchsaufbau eingebauten Erdwärmesonden mit Hilfe eines Thermal Response Test Geräts mit konstanter Heizleistung P_{EWS} betrieben. Als Wärmeträgermedium wird in den Erdwärmesonden hierbei Wasser eingesetzt. Zusätzlich wird das im Ringspalt zwischen PE-Innen- und PVC-Außenrohr befindliche Wasser zirkuliert und temperiert (siehe Abbildung 5-33).

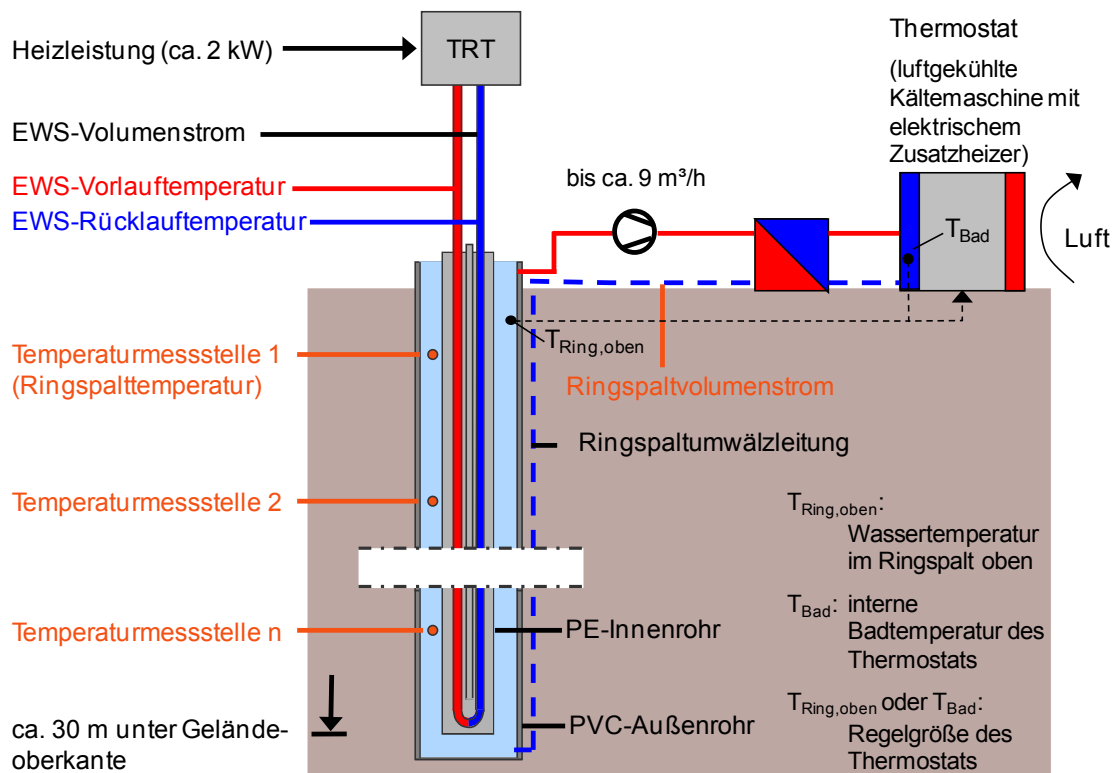


Abbildung 5-33: Versuchsaufbau zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands

Nach Erreichen eines stationären Zustands kann der effektive thermische Bohrlochwiderstand $R_{b,eff}$ aus der Differenz der arithmetischen Fluidmittlertemperatur der EWS θ_{EWS} und der mittleren Temperatur des Wassers (θ_w) im Ringspalt ermittelt werden:

$$R_{b,eff} = \frac{L_{EWS} \cdot (\theta_{EWS} - \theta_w)}{P_{EWS}}$$

$\frac{L_{EWS}}{P_{EWS}}$ Gesamtwiderstand R_{ges}

$$R_{b,eff} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{R,a}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{R,a}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_r \cdot \ln \left(\frac{r_{R,a}}{r_{r,i}} \right)}$$

$\frac{1}{\alpha_{R,a} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{R,a}}$ Wärmeübergangswiderstand R_{konv} an der Außenseite des PE-Innenrohrs

 $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_r \cdot \ln \left(\frac{r_{R,a}}{r_{r,i}} \right)}$ Wärmeleitwiderstand R_{leit} des PE-Innenrohrs

(5-8)

mit:

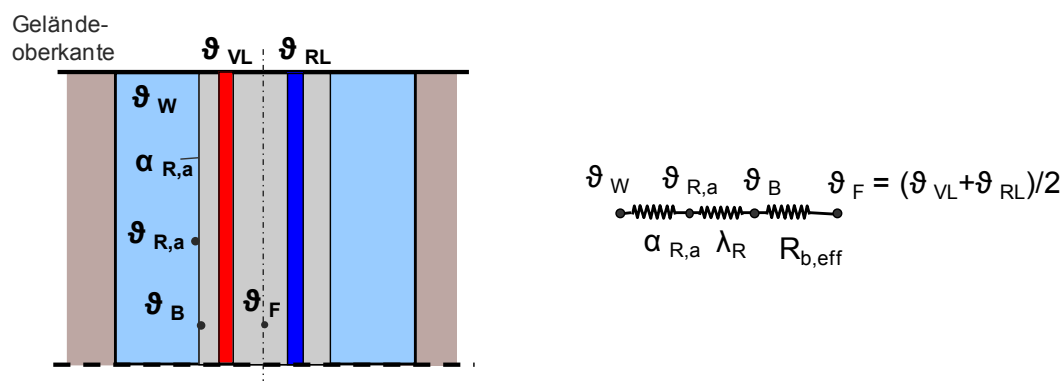
L_{EWS} : Tiefe der EWS

$r_{R,a}$: Außenradius des PE-Innenrohrs

$r_{R,i}$: Innenradius des PE-Innenrohrs

λ_r : Wärmeleitfähigkeit des PE-Innenrohrs

Die Aufteilung des Gesamtwiderstands R_{ges} in die einzelnen Teilwiderstände ist in Abbildung 5-34 veranschaulicht und wird in Riegger (2013 und 2016) erläutert.



Erläuterung der Formelzeichen:		Erläuterung der Indizes:	
α : Wärmeübergangszahl	λ : Wärmeleitfähigkeit	W: Wasser im Ringspalt	B: Bohrlochwand
ϑ : Temperatur	r: Radius	F: Sondenfluid	a: außen
$R_{b,eff}$: effektiver thermischer Bohrlochwiderstand		R: Innenrohr	i: innen
		VL: Vorlauf	RL: Rücklauf

Abbildung 5-34: Schaubild der thermischen Widerstände als Grundlage der Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands $R_{b,eff}$

Da in der Literatur (VDI Wärmeatlas 2005) keine für die im betrachteten Ringspalt vorliegenden Randbedingungen passende Nußelt-Korrelation zur Ermittlung der Wärmeübergangszahl $\alpha_{r,a}$ an der Außenseite des Innenrohrs dokumentiert ist, wird das Wasser im Ringspalt mit zwei bis drei verschiedenen Volumenströmen zirkuliert, um bei den durchgeführten Versuchen zusätzlich zu $R_{b,eff}$ die Wärmeübergangszahl $\alpha_{r,a}$ an der Außenseite des Innenrohrs ermitteln zu können. Durch die Verwendung verschiedener Ringspaltvolumenströme ändert sich R_{konv} und damit auch R_{ges} , nicht jedoch $R_{b,eff}$. Das auf dieser Grundlage basierende Verfahren zur Ermittlung von $R_{b,eff}$ durch fiktive Anpassung der Re-Zahlen im Ringspalt wird im Detail in Riegger (2016) erläutert. Mit Hilfe der fiktiven Re-Zahlen werden bei diesem Verfahren unter Verwendung der Wärmeübergangskorrelation eines idealen Ringspalts die zu den verschiedenen Ringspaltvolumenströmen gehörigen Wärmeübergangszahlen $\alpha_{r,a}$ an der Außenseite des Innenrohrs ermittelt.

Bei der Versuchsdurchführung wird (mit Ausnahme des ersten durchgeführten Versuchs) im Gegensatz zu den Versuchen im Forschungsvorhaben EWSplus T_{Bad} an Stelle von $T_{Ring,oben}$ als Regelgröße des Thermostats verwendet (s. Abbildung 5-33), da der Ringspalt ein deutlich größeres

Volumen als im Forschungsvorhaben EWSplus aufweist und somit eine wesentlich größere Totzeit zwischen einer Anpassung der Kühlleistung des Thermostats und einer hieraus resultierenden Veränderung von $T_{\text{Ring,oben}}$ vorliegt. Wie der erste durchgeführte Versuch (EWS 3-O Versuch 1) unter Verwendung von $T_{\text{Ring,oben}}$ als Regelgröße zeigte, führt die große Totzeit zu Regelungsproblemen, wodurch das Erreichen eines für die Versuchsauswertung erforderlichen stationären Zustands verzögert oder gar verhindert wird.

Die Verwendung von T_{Bad} als Regelgröße stellte sich bei den folgenden Versuchen als geeignet heraus, um schnell und zuverlässig einen stationären Zustand zu erreichen. Dies ist möglich, da die Leitungslängen vom Versuchscontainer zum Bohrloch im Gegensatz zum Versuchsaufbau des Forschungsvorhaben EWSplus deutlich kürzer sind und da diese Leitungen zudem in einem wärmegeprägten, erdvergrabenen Kanal verlegt wurden.

Im Gegensatz zu den Ringspaltumwälzleitungen wurde für die Ringspalttemperaturfühler, die in Abständen von 5 m zur Bestimmung der mittleren Temperatur des Wassers im Ringspalt eingesetzt werden, von einem festen Einbau abgesehen, da dies für die gewünschte Positionierung der Temperaturfühler in der Mitte des Wasserringspalts zwischen Innen- und Außenrohr unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Ein- und Ausbaubarkeit des PE-Innenrohrs mit den daran angebrachten Zentrierungen nur unter großem Aufwand zu lösen gewesen wäre. Zudem wäre bei einem Fühlerdefekt der Austausch dieses Fühlers bei einem festen Einbau deutlich erschwert oder gar unmöglich. Um den Ein- und Ausbauaufwand zu minimieren und die Anbringung der Temperaturfühler in der Mitte des Wasserringspalts zwischen Innen- und Außenrohr zu ermöglichen, wurden daher die für die Zentrierung des PE-Innenrohrs im PVC-Außenrohr verwendeten Zentrierungen mit Haltebügeln ausgestattet, an denen die Temperaturfühlermessketten beim Einbau des PE-Innenrohrs mit Hilfe von Klebeband angebracht wurden (s. Abbildung 5-6 Bild 2).

Die zur Bestimmung der Ringspalttemperatur verwendeten Pt100 Temperaturfühler in 4-Leiter-Technik weisen analog zu den im Forschungsvorhaben EWSplus verwendeten Temperaturfühlern die Genauigkeitsklasse 1/10 DIN B auf. Da die übrige verwendete Messtechnik der ebenfalls in dem Forschungsvorhaben EWSplus verwendeten Messtechnik entspricht, kann die in (Riegger 2016) erläuterte Unsicherheitsberechnung für die im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech durchgeführten Versuche übernommen werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech wurden die folgenden sechs Versuche zur Bestimmung von effektiven thermischen Bohrlochwiderständen durchgeführt:

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

Die Bezeichnung der untersuchten Realmaßstabs-Erdwärmesonden ist entweder Teil der vorstehenden Versuchsbezeichnungen oder entspricht diesen.

Für EWS 3-O werden nachfolgend ausschließlich die Ergebnisse von Versuch 2 diskutiert. Bei Versuch 1 handelte es sich um den ersten Versuch in der neu erstellten Versuchsanlage. Bei diesem Versuch wurde im Gegensatz zu den nachfolgenden Versuchen $T_{\text{Ring, oben}}$ an Stelle von T_{Bad} als Regelgröße des Thermostaten verwendet, wodurch sich aus den oben erläuterten Gründen kein für die Versuchsauswertung erforderlicher, stationärer Zustand einstellte.

Ein für die sechs durchgeführten Versuche exemplarischer Messdatenverlauf ist in Abbildung 5-35 und Abbildung 5-36 dargestellt. Der Verlauf zeigt, dass sich durch die Beheizung der EWS mit konstanter Heizleistung und die gleichzeitige Temperierung und Zirkulation des Wassers im Ringspalt mit verschiedenen Ringspaltvolumenströmen in den Auswertephase die für die Versuchsauswertung erforderlichen stationären Zustände einstellen. Ein exemplarisches Temperaturprofil des Wassers im Ringspalt zwischen PE-Innen- und PVC-Außenrohr ist in Abbildung 5-37 dargestellt. Auf Grund von defekten Messfühlern liegt in einigen Tiefen lediglich ein Messwert vor. Die für die Versuchsauswertung verwendete mittlere Temperatur des Wassers im Ringspalt wurde durch eine nach Tiefe und Fühleranzahl gewichtete Mittelung der vorliegenden Einzelmesswerte ermittelt.

Aus den in den Auswertephase vorliegenden Messdaten werden mit Hilfe eines indirekten, in Riegger (2013 und 2016) erläuterten Verfahrens, die Wärmeübergangszahlen an der Außenseite des Innenrohrs und der effektive thermische Bohrlochwiderstand ermittelt (s. Abbildung 5-38). Der für EWS 7-O ermittelte effektive thermische Bohrlochwiderstand beträgt $0,0814 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ und liegt damit in dem für diese Erdwärmesondenkonfiguration (30,5 m tiefe 2-U-EWS; Sondenrohre: PE 100 32 x 2,9 mm; „Bohrlochdurchmesser“: 158,6 mm; keine Abstandshalter/ Zentrierhilfen; thermisch verbessertes Verfüllmaterial mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $2 \text{ W}/\text{m}/\text{K}$ nach Datenblatt; EWS-Volumenstrom: 423 l/h; Wärmeträgermedium: Wasser) erwarteten Wertebereich.

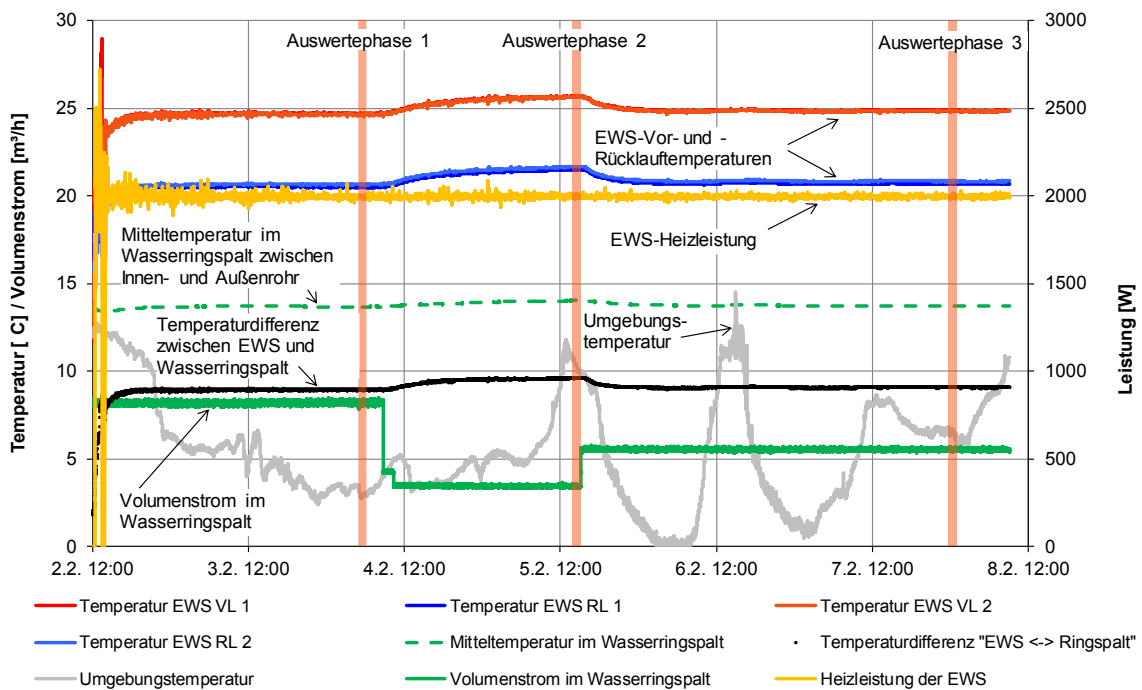


Abbildung 5-35: Verlauf der wesentlichen Messdaten des Versuchs an EWS 7-O zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands

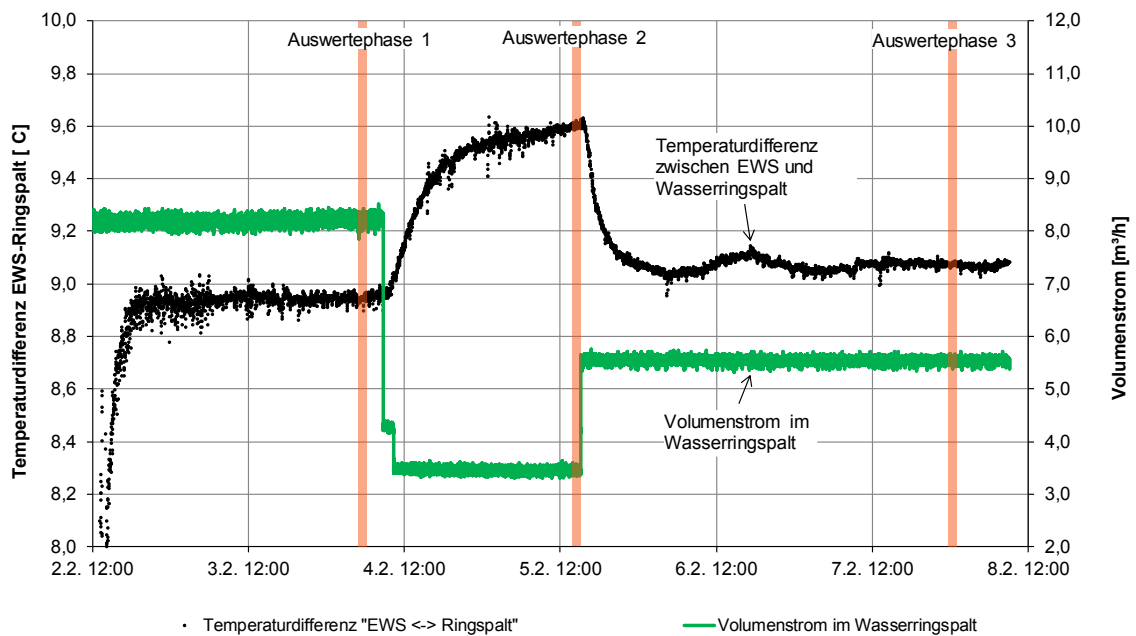


Abbildung 5-36: Detaildarstellung der Temperaturdifferenz zwischen der arithmetischen EWS-Fluidmittelttemperatur und der Temperatur im Wasserringspalt bei der Messung zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von EWS 7-0

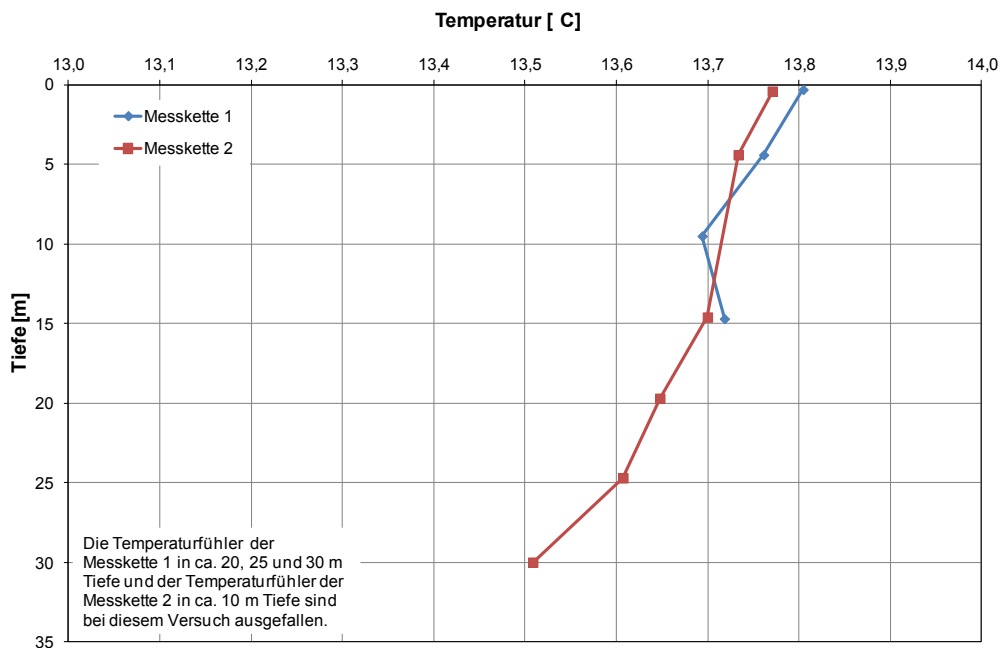


Abbildung 5-37: Exemplarisches Temperaturprofil im Ringspalt zwischen PE-Innen- und PVC-Außenrohr zu Beginn von Auswertephase 1 des Versuchs EWS 7-O (04.02.2016 05:00 Uhr)

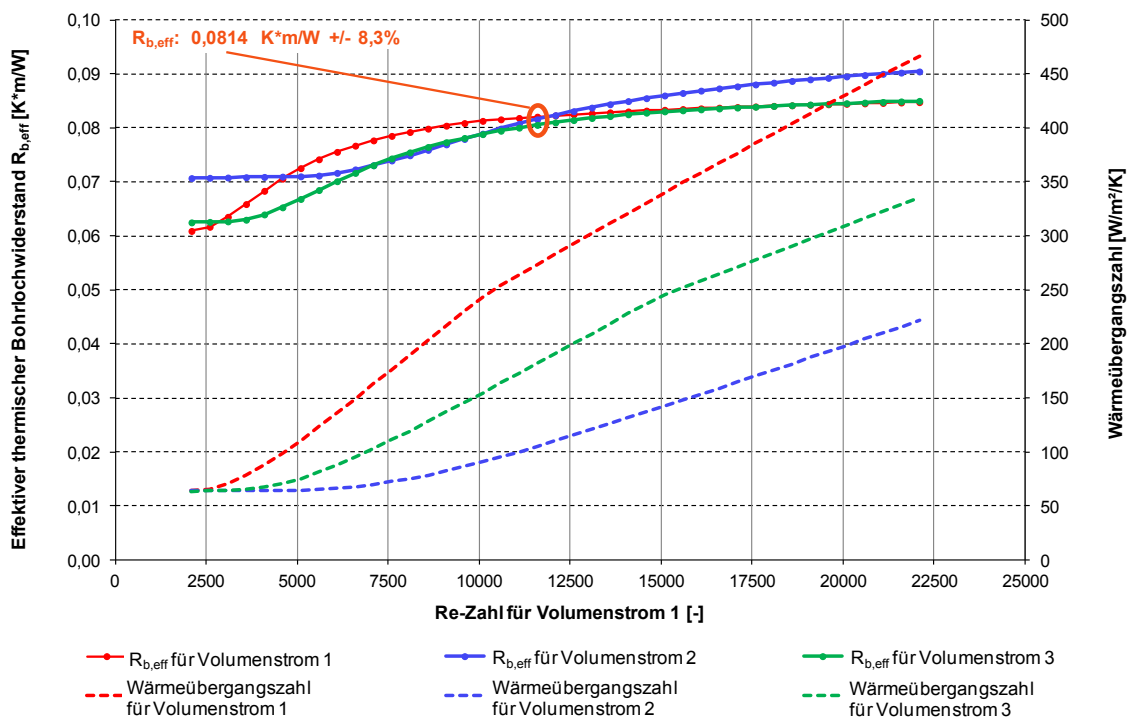


Abbildung 5-38: Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands $R_{b,eff}$ von EWS 7-0 durch fiktive Erhöhung der Re-Zahlen im Wasserringspalt

Die Messdatenverläufe und Auswertungen der Versuche an EWS 3-O, EWS 4-W und EWS 8-W sind im Anhang in Anhang 13 bis Anhang 19 dargestellt.

Bei EWS 4-W traten mehrere Datenlücken auf Grund von Problemen bei der Datenübertragung mit dem verwendeten Volumenstrommessgerät auf (s. Anhang 16). Da diese Probleme nicht behoben werden konnten, wurde für die Versuche EWS 7-O und EWS 8-W ein neues Ultraschall-Volumenstrommessgerät verwendet, das eine Momentanwerterfassung erlaubt und einfach in die vorhandene Datenerfassung eingebunden werden kann. Auf Grund der minütlichen Erfassung von Momentanwerten des Ringspaltvolumenstroms bei EWS 7-O und EWS 8-W sind die Kurvenverläufe des Ringspaltvolumenstroms bei diesen Messungen unruhiger als die bei EWS 3-O und EWS 4-W mit dem ursprünglichen Volumenstrommessgerät erfassten 5-Minuten-Mittelwerte. Die einzige bei EWS 8-W auftretende Datenlücke ist durch einen zwischenzeitlichen Ausfall des verwendeten Datenloggers auf Grund von Überhitzung im Messcontainer bedingt. Diese auch bei vorhergehenden Versuchen (bei der Erfassung der Ringspalttemperaturen) teilweise aufgetretene Problematik konnte durch verschiedene Maßnahmen behoben werden. Zu diesen Maßnahmen gehörte neben einer veränderten Platzierung des Datenloggers im Versuchscontainer auch eine Verbesserung der Belüftung des Versuchscontainers durch Anbringung eines zusätzlichen Lüftungsgitters in der Eingangstüre, durch Verwendung eines Ventilators und durch Teilöffnung der durch ein Kettenschloss gesicherten Eingangstüre.

Neben den beiden problemlos auswertbaren Versuchen für 2-U-EWS (EWS 3-O und EWS 7-O) traten bei der Untersuchung der beiden Koaxial-EWS (EWS 4-W und EWS 8-W) verschiedene Schwierigkeiten auf.

So konnten bei EWS 4-W auf Grund einer Havarie während der Verfüllung nur die unteren 18 m des „Bohrlochs“ verfüllt werden. Die oberen 12 m des „Bohrlochs“ der Koaxial-EWS verblieben hingegen wassergefüllt und standen in 12 m Tiefe durch eine havarierte Gewindeverbindung des PE-Innenrohrs, das als Bohrloch dient, in hydraulischer Wechselwirkung mit dem Ringspalt zwischen PE-Innen- und PVC-Außenrohr. Für EWS 4-W können daher keine belastbaren effektiven thermischen Bohrlochwiderstände angegeben werden. Stattdessen wird für EWS 4-W der längenbezogene thermische Gesamtwiderstand R_{ges} zwischen der mittleren Temperatur des Wassers im Ringspalt und der arithmetisch gemittelten EWS-Fluidmitteltemperatur betrachtet, der definiert ist als:

$$R_{\text{ges}} = \frac{P_{\text{EWS}} \cdot (\vartheta_{\text{EWS}} - \vartheta_{\text{W}})}{P_{\text{EWS}}} \quad (5-9)$$

Auf Grund der Havarie von EWS 4-W können die für EWS 4-W ermittelten R_{ges} -Werte nicht mit den $R_{\text{b,eff}}$ -Werten der anderen untersuchten EWS verglichen werden. Dennoch können aus den Untersuchungsergebnissen von EWS 4-W interessante Rückschlüsse zur Auswirkung von Verwirblern auf die Effizienz von Koaxial-EWS gezogen werden. Hierzu wurde bei der für EWS 8-W verwendeten Koaxial-EWS, die standardmäßig mit sogenannten Verwirblern im Abstand von ca. 2,0 m ausgestattet ist (siehe www.geokoax.de), das Innenrohr mit den daran angebrachten Verwirblern in einer Sonderfertigung durch den Sondenhersteller austauschbar gestaltet, so dass

auch Untersuchungen mit einem (unzentrierten) Innenrohr ohne Verwirbler möglich sind. Die Dimensionen und die Materialeigenschaften der verwendeten Innenrohre waren in beiden Fällen identisch. Das gewählte Vorgehen bietet den Vorteil, dass in den beiden vergleichend betrachteten Fällen (1. Innenrohr mit Verwirblern; 2. Innenrohr ohne Verwirbler) identische Bedingungen (Qualität und Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung, Verlauf des Außenrohrs der Koaxialsonde im „Bohrloch“) vorliegen, so dass eine bestmögliche Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Die Ergebnisse des für verschiedene EWS-Volumenströme durchgeführten Vergleichs bis zu dem mit der Versuchsanlage maximal möglichen EWS-Volumenstrom sind in Abbildung 5-39 dargestellt. EWS 4-W wurde bei diesem Vergleich so betrieben, dass das vom TRT erwärmte Wasser in den Außenring eintritt. Im Gegensatz zum EWS-Volumenstrom wurde der Ringspaltvolumenstrom bei allen durchgeführten Versuchen möglichst unverändert belassen, um Auswirkungen veränderter Ringspaltvolumenströme auf R_{ges} ausschließen zu können. Mit Werten zwischen 3,44 und 3,62 m^3/h gelang dies sehr gut. Wie die Messdatenverläufe der Versuche in Anhang 16 und Anhang 17 zeigen, könnten sich unerwünschte Auswirkungen auf die ermittelten R_{ges} -Werte damit lediglich durch die in den Auswertephasen der untersuchten EWS um bis zu ca. 10 Kelvin unterschiedlichen Erdwärmesondenvor- und rücklaufftemperaturen ergeben. Denn durch diese unterschiedlichen Temperaturniveaus können sich temperaturabhängige Stoffwertänderungen ergeben, die sich wiederum auf die ermittelten R_{ges} -Werte auswirken.

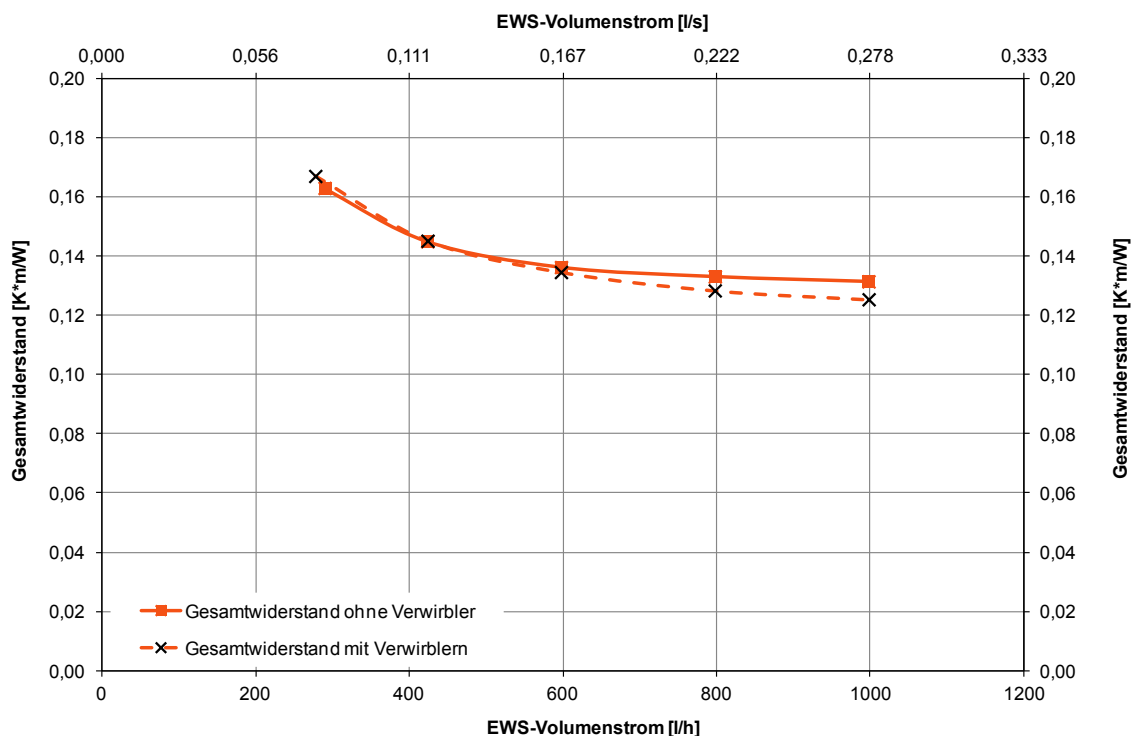


Abbildung 5-39: Einfluss des EWS-Volumenstroms und des Einsatzes von Verwirblern auf den für EWS 4-W gemessenen Gesamtwiderstand R_{ges} zwischen der arithmetischen EWS-Fluidmitteltemperatur und der mittleren Temperatur im Wasserringspalt

Die Ergebnisse des Vergleichs in Abbildung 5-39 veranschaulichen, dass eine Erhöhung des EWS-Volumenstroms bei der untersuchten Koaxial-EWS von ca. 300 l/h auf ca. 1000 l/h zu einer deutlichen Verringerung des Gesamtwiderstands führt. Außerdem ist erkennbar, dass die durch die Verwirbler gegenüber der EWS ohne Verwirbler verursachte Verringerung des Gesamtwiderstands mit zunehmendem EWS-Volumenstrom deutlich zunimmt. Bei EWS-Volumenströmen bis maximal ca. 400 l/h sind keine Verbesserungen des Wärmeübertragungsverhaltens durch die Verwirbler nachweisbar. Die maximale Verringerung von R_{ges} durch die Verwendung von Verwirblern ergibt sich für EWS-Volumenströme von ca. 1000 l/h zu -4,6 %. Da $R_{b,eff}$ ein Teil des Gesamtwiderstands R_{ges} ist, ist davon auszugehen, dass die prozentuale Verringerung von $R_{b,eff}$ durch die Verwendung von Verwirblern in diesem Fall etwas größer ist als -4,6 %.

Im Gegensatz zu EWS 4-W konnte EWS 8-W problemlos verfüllt werden. Nach erfolgter Aushärtung des Verfüllbaustoffs erfolgte für EWS 8-W der Versuch zur Bestimmung von $R_{b,eff}$, bei dem das vom TRT erwärmte Wasser analog zu EWS 4-W in den Außenring der Koaxial-EWS eintritt. Überraschenderweise stellen sich bei dem Versuch EWS 8-W die zur Versuchsauswertung erforderlichen Veränderungen von R_{ges} in Abhängigkeit des Ringspaltvolumenstroms nicht ein. Stattdessen ist die Differenz zwischen der arithmetischen EWS-Fluidmitteltemperatur und der mittleren Temperatur des Wassers im Ringspalt unabhängig vom Ringspaltvolumenstrom in den verschiedenen stationären Auswertephasen nahezu gleich (s. Anhang 19). Dieses Phänomen trat bisher bei keinem der mit mehreren verschiedenen Ringspaltvolumenströmen durchgeführten Versuche (EWS 3-O und EWS 7-O; 19 weitere Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus) auf. Eine Erklärung für dieses Phänomen liegt bis dato nicht vor, es kann lediglich ein Zusammenhang mit der lichten Weite des Ringspalts zwischen PE-Innenrohr und PVC-Außenrohr vermutet werden, die bei dem Versuch EWS 8-W größer ist als bei allen vorher durchgeführten Versuchen.

Eine Übersicht der wesentlichen Versuchsrandbedingungen aller untersuchter EWS und die Ergebnisse ($R_{b,eff}$, $R_{b,eff,norm}$) sind in Tabelle 5-6 aufgelistet. Weitere Informationen zur Konfiguration der EWS können Tabelle 5-1 auf S. 261 entnommen werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den Angaben in Tabelle 5-6 zu den Innen- und Außendurchmessern der PE-Innenrohre, die als „Bohrloch“ dienen, nicht um Messwerte sondern um Herstellerangaben der verwendeten Rohre handelt.

Um für EWS 8-W trotz der vorstehend erläuterten Problematik einen effektiven thermischen Bohrlochwiderstand abschätzen zu können, wurde der erwartete Wertebereich des konvektiven Wärmeübergangswiderstands an der Außenseite des PE-Innenrohrs auf Basis der umfangreichen Erfahrungswerte aus 21 Versuchen mit 0,005 – 0,01 K*m/W konservativ abgeschätzt. Damit kann der zu erwartende Wertebereich von $R_{b,eff}$ für EWS 8-W mit Hilfe von Gleichung 5-8 angegeben werden zu 0,0919 – 0,0869 K*m/W.

Da der unter Verwendung der Angaben in Tabelle 5-6 analog zu dem Vorgehen in Abschnitt 5.6.1 theoretisch berechnete Best-Case-Wert des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von EWS 8-W bereits 0,0909 K*m/W beträgt, ist davon auszugehen, dass der tatsächliche $R_{b,eff}$ -Wert von EWS 8-W am oberen Ende oder sogar oberhalb des angegebenen erwarteten Wertebereichs

liegt. Für den Best-Case-Wert wurde hierbei angenommen, dass das Zentralrohr der Koaxial-EWS nicht wärmeleitend ist, während an der Innenseite des Außenrohrs der Koaxial-EWS der konvektive Wärmeübergangswiderstand nicht berücksichtigt wird.

Für die Berechnung von $R_{b,eff,norm}$ und die folgenden Vergleiche (s. Abbildung 5-40) wird daher für EWS 8-W ein effektiver thermischer Bohrlochwiderstand von $0,0919 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ angenommen.

Die Berechnung theoretischer Vergleichswerte zu den gemessenen $R_{b,eff}$ -Werten analog zu dem Vorgehen im Forschungsvorhaben EWSplus ist für die 2-U-EWS EWS 3-O und EWS 7-O nicht möglich, da die tiefenabhängigen Positionen der Sondenrohre in diesem Forschungsvorhaben nicht bestimmt wurden. Somit steht kein zur Berechnung eines theoretischen Vergleichswerts erforderlicher Schenkelabstand zur Verfügung.

Allerdings wurde im Projekt EWSplus (Riegger 2013) mit EWS 5-2 eine zu EWS 3-O und EWS 7-O ähnliche EWS ohne Abstandshalter/Zentrierhilfen untersucht. Diese weist ähnliche Randbedingungen auf wie die im Projekt EWS-tech untersuchten Realmaßstabs-EWS (s. Tabelle 5-6). Auch wenn der für EWS 5-2 des Forschungsvorhabens EWSplus festgestellte (normierte) effektive thermische Bohrlochwiderstand um ca. 10 % höher als die für EWS 3-O und EWS 7-O festgestellten Werte ist, kann angesichts der vielfältigen Einflussfaktoren (Verlauf der Sondenrohre im Bohrloch; Verfüllqualität und Fehlstellen im Bohrloch; Messunsicherheiten) dennoch von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden. Es ist folglich davon auszugehen, dass die in dem Forschungsvorhaben EWSplus in einem ähnlichen Versuchsaufbau ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte gut mit den in diesem Forschungsvorhaben messtechnisch an Realmaßstabs-EWS ermittelten $R_{b,eff}$ -Werten verglichen werden können.

Tabelle 5-6: Übersicht der ermittelten Ergebnisse und der Versuchsrandbedingungen während der Bestimmung der effektiven thermischen Bohrlochwiderstände

	EWS 3-O	EWS 4-W (mit Verwirblern im Außenring)	EWS 4-W (ohne Verwirbler im Außenring)	EWS 7-O	EWS 8-W	EWS 5-2 (EWSplus)
Sondenart	2-U-EWS	Koaxial-EWS 140 mm (geoKOAX)	Koaxial-EWS 140 mm (geoKOAX)	2-U-EWS	Koaxial-EWS 63 mm (Jansen powerwave coax)	2-U-EWS
Sondenrohr/e (bei Koaxial-EWS Außenrohr und Innenrohr)	PE 100: 32 x 2,9 mm	PE 100: 140 x 5,4 mm; PE 100: 40 x 3,7 mm	PE 100: 140 x 5,4 mm; PE 100: 40 x 3,7 mm	PE-Xa green: 32 x 2,9 mm	PE 100: 63 x 2,9 mm Wellrohr; PP: 37 x 3,5 mm	PE 100: 32 x 2,9 mm
Außendurchmesser PE-Innenrohr [mm]	180	225	225	180	140	179,2
Innendurchmesser PE-Innenrohr [mm]	158,6	198,2	198,2	158,6	123,4	157
Länge der EWS [m]	29,91	29,92	29,77	30,48	29,73	30,36
Wärmeleitfähigkeit Verfüllmaterial (Herstellerangabe) [W/m/K]	≥ 2,4	≥ 2,4	≥ 2,4	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0
Wärmeleitfähigkeit Verfüllmaterial [W/m/K] (mit ISOMET 2104 an Probekörper gemessen)	1,76	1,76	1,76	1,97	1,97	1,97
EWS-Volumenstrom [l/h]	422,90	424,46*	424,05*	422,55	423,89	423,17
arithmetisch gemittelte EWS-Fluidmittel- temperatur [°C]	24,09	23,49	23,36	23,03	22,3	27,2
Systemüberdruck des EWS-Kreislaufs [bar]	1,27	0,91	1,25	1,2	1,34	1,36
Re-Zahl in den Sondenrohren (bei Koaxial-EWS: 1. Zentralrohr und 2. Außenring)	6265	960**/4984	957/4965	6109	1676**/5262	6719
$V_{\text{Ring,max}}$ [m³/h]***	6,97	3,59	3,53	8,22	8,02	6,96
R_{ges} (für $V_{\text{Ring,max}}$) [K*m/W]	0,1327	0,1450	0,1448	0,1365	0,1447	0,1418
R_{konv} (für $V_{\text{Ring,max}}$) [K*m/W]****	0,0069	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	0,0065	0,005 - 0,010 (erwarteter Wertebereich)	0,0025
$R_{\text{b,eff}}$	0,0773 +/- 8,6 %	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	0,0814 +/- 8,3 %	0,0919 - 0,0869 (erwarteter Wertebereich)	0,0893 +/- 6,9 %
$R_{\text{b,eff,norm}}$ (für $d_{\text{b,norm}} = 200$ mm und eine Untergrund- Wärmeleitfähigkeit von 2,0 W/m/K)	0,0958	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	0,0999	0,1303 (für $R_{\text{b,eff}} =$ 0,0919 K*m/W)	0,1086

*: bei EWS 4-W wurden auch Versuche mit anderen EWS-Volumenströmen durchgeführt.

** : bei der Berechnung der Re-Zahl wurde von einem idealen Ringspalt ohne Verwirbler oder Wellrohrstruktur an der Außenseite ausgegangen.

***: maximal in einer Auswertephase vorliegender mittlerer Volumenstrom im Ringspalt zwischen PE-Innen- und PVC-Außenrohr

****: konvektiver Wärmeübergangswiderstand an der Außenseite des PE-Innenrohrs

Einen grafischen Vergleich der (normierten) effektiven thermischen Bohrlochwiderstände aus Tabelle 5-6 zeigt Abbildung 5-40. Analog zu den theoretischen Betrachtungen in Abschnitt 5.6.1.2 zeigt dieser Vergleich für die Koaxial-EWS mit geringem Sondenrohrdurchmesser (EWS 8-W) den höchsten $R_{b,eff,norm}$ -Wert.

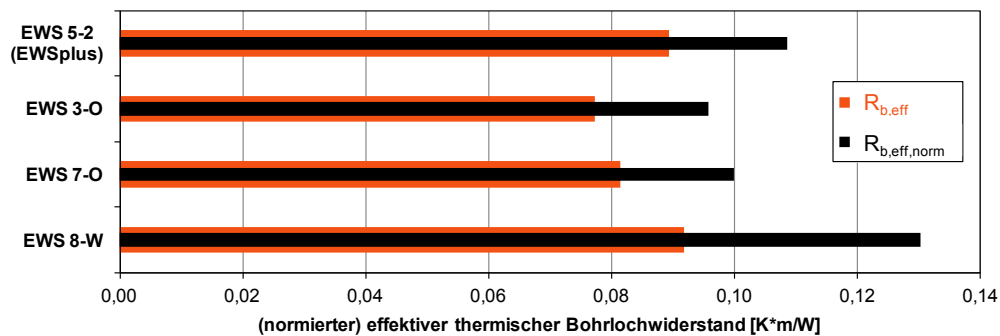


Abbildung 5-40: Vergleich der (normierten) effektiven thermischen Bohrlochwiderstände von EWS 3-O, EWS 7-O und EWS 8-W des Forschungsvorhabens EWS-tech und von EWS 5-2 des Forschungsvorhabens EWSplus für $d_{b,norm} = 200$ mm und eine Untergrund-Wärmeleitfähigkeit von 2 W/m/K

Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten versuchstechnischen Untersuchungen zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Koaxial-EWS und 2-U-EWS erlauben aus verschiedenen Gründen keine abschließende Bewertung der thermischen Effizienz von Koaxial-EWS insbesondere im Vergleich mit 2-U-EWS. Zu diesen Gründen zählen:

- Die Anzahl der in dem Forschungsvorhaben EWS-tech untersuchten Koaxial-EWS und 2-U-EWS ist sehr gering (jeweils 2).
- Bei einer der beiden untersuchten Koaxial-EWS (EWS 4-W) kam es zu einer Havarie beim Einbau, so dass der effektive thermische Bohrlochwiderstand nicht bewertet werden kann.
- Die Untersuchung der zweiten Koaxial-EWS wirft bisher nicht beantwortbare Fragen hinsichtlich der Bestimmung der Wärmeübergangszahl an der Außenseite des als Bohrloch dienenden PE-Innenrohrs auf, so dass auf Basis des für dieses EWS abgeschätzten $R_{b,eff}$ -Werts keine weitreichenden Aussagen zur thermischen Effizienz von Koaxial-Erdwärmesonden getroffen werden können.

Nichtsdestotrotz kann auf Basis der durchgeführten Versuche festgehalten werden, dass bei Koaxial-EWS Potenzial vorhanden ist, den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand durch Maßnahmen zur Erhöhung der Wärmeübergangszahl an der Außenseite des Außenrings der Koaxial-EWS zu verringern. Das in Abschnitt 5.6.1.2 theoretisch berechnete Potenzial konnte somit also auch versuchstechnisch nachgewiesen werden.

Wie die theoretischen Betrachtungen in Abschnitt 5.6.1.2 gezeigt haben, können damit insbesondere für Koaxial-EWS mit großem Durchmesser (z. B. 140 mm) geringere $R_{b,eff,norm}$ -Werte als mit 2-U-EWS erreicht werden.

5.6.3. Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben EWS-tech sowie im Rahmen des Forschungsvorhabens „Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden“ (Koenigsdorff et al. 2016) wurde die ursprünglich im Forschungsvorhaben EWSplus entwickelte Versuchsanlage zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands weiterentwickelt und auf dem Gelände des KIT Campus Süd erfolgreich installiert. Die Weiterentwicklungen ermöglichen u.a. eine signifikante Reduktion des Aufwands bei der Bestimmung von $R_{b,eff}$. Durch Gegenüberstellung von Messergebnissen für 2-U-EWS konnte aufgezeigt werden, dass die in der weiterentwickelten Versuchsanlage ermittelten $R_{b,eff}$ -Werte mit den im Forschungsvorhaben EWSplus ermittelten $R_{b,eff}$ -Werten vergleichbar sind.

Der weiterentwickelte Versuchsaufbau wurde in dem Forschungsvorhaben EWS-tech erstmals zur Untersuchung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Koaxial-EWS genutzt, wobei bei den beiden durchgeführten Versuchen (EWS 4-W und EWS 8-W) Probleme auftraten, so dass auf Basis der durchgeführten Messungen keine abschließenden Aussagen zu effektiven thermischen Bohrlochwiderständen von Koaxial-EWS möglich sind.

Während die für Koaxial-EWS 4-W festgestellten Probleme (Defekt des Versuchsaufbaus durch großen Auftrieb der EWS) bei zukünftigen Versuchen einfach vermieden werden können, können die bei der Versuchsauswertung für Koaxial-EWS 8-W festgestellten Probleme bisher nicht erklärt werden. Die Probleme bei EWS 8-W bestehen darin, dass sich die zur Versuchsauswertung erforderlichen Veränderungen von R_{ges} in Abhängigkeit des Ringspaltvolumenstroms nicht einstellen. Die Ursache hierfür ist unklar, es kann jedoch ein Zusammenhang mit dem geringen Bohrl Lochdurchmesser und dem dadurch sehr breiten Ringspalt zwischen PE-Innen- und PVC-Außenrohr vermutet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die bei der Versuchsauswertung festgestellten Probleme keinen Qualitätsmangel der untersuchten Koaxial-EWS darstellen. Um zukünftig eine zuverlässige Untersuchung von (Koaxial-) EWS mit geringen Bohrl Lochdurchmessern in dem erstellten Versuchsgelände zu ermöglichen, besteht folglich weiterer Forschungsbedarf.

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Thermal Response Tests in dem weiterentwickelten Versuchsaufbau, dass bei Koaxial-EWS durch geometrische Anpassungen, die eine Verbesserung des Wärmeübergangs an der Innenseite des Außenrohrs bewirken, ein Potenzial zur Verringerung von $R_{b,eff}$ vorliegt. Mit den in Abschnitt 5.6.1 durchgeführten theoretischen Untersuchungen konnte dieses Potenzial ebenfalls aufgezeigt werden. Darüber hinaus machen die Untersuchungen in Abschnitt 5.6.1.2 insbesondere deutlich, dass für Koaxial-EWS mit großen Sondenrohrdurchmessern (z.B. 140 mm) geringe normierte effektive thermische Bohrlochwiderstände realisiert werden können, die gleich wie oder sogar geringer als die $R_{b,eff,norm}$ -Werte von 2-U-EWS sein können. Koaxial-EWS mit geringen Sondenrohrdurchmessern (z. B. 63 mm) weisen hingegen eher hohe $R_{b,eff,norm}$ -Werte auf.

Den möglichen Vorteilen von Koaxial-EWS mit großen Sondenrohrdurchmessern stehen Nachteile dieser EWS in der Handhabung gegenüber. So können EWS mit großen Sondenrohrdurchmessern nicht als Ringbund angeliefert werden, sondern lediglich als Stangenware, wodurch eine Schweißung auf der Baustelle erforderlich ist. Außerdem ist der Einbauvorgang großer Koaxial-EWS ins Bohrloch gegenüber dem üblichen Einbau von 2-U-EWS speziell und erfordert Erfahrung oder eine intensive Einweisung des ausführenden Bohrunternehmens

6. ERGEBNISKORRELATION

Um die Ergebnisse aller über die gesamte Projektlaufzeit durchgeführten Laborprüfungen (s. Abschnitt 3) bestmöglich miteinander vergleichen zu können, wurden die hierfür verwendeten Verfüllbaustoffe zu Beginn des Forschungsvorhabens bestellt. Dieses Vorgehen wurde zu Projektbeginn mit den Verfüllbaustoffherstellern abgestimmt. Die in den Laboruntersuchungen (s. Abschnitt 3) untersuchten Verfüllbaustoffe stammen damit jeweils aus einer Produktionscharge. Dieses Vorgehen impliziert, dass die untersuchten Verfüllbaustoffe bei den im Laufe des Projekts durchgeführten Untersuchungen unterschiedliche Lagerzeiten aufwiesen.

Bei den Technikums- und Realmaßstabsversuchen hingegen war es nicht möglich, die im Verlauf des Projekts benötigten Verfüllmaterialmengen vollständig zu Beginn des Forschungsvorhabens zu beziehen. Denn für diese Versuche wurden große Materialmengen benötigt, für die es keine Lagermöglichkeiten vor Ort gab.

Damit wird deutlich, dass die einerseits in den Laboruntersuchungen und andererseits in den Technikums- und Realmaßstabsversuchen verwendeten Verfüllbaustoffe unterschiedliche Herstellernamen aufweisen und damit auch aus unterschiedlichen Produktionschargen stammen.

Wie sich im Verlauf des Projekts zeigte, kann sich die Lagerungsdauer sehr deutlich auf die ermittelten Eigenschaften der Suspensionen und der ausgehärteten Baustoffe auswirken (siehe Abschnitt. 3.1.5.2.3 und 3.2.4.5.3).

Hierdurch wird die Ergebniskorrelation der Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuche erschwert.

Zudem hat die Anmischtechnik einen großen Einfluss auf die resultierenden Eigenschaften. Dies wird unter anderem anhand der Technikums- und Realmaßstabsversuche deutlich. Um den Einfluss verschiedener Labor- und Baustellenanmischtechniken auf die Suspensionseigenschaften ohne Beeinflussung durch das Probenalter bzw. die Herstellcharge untersuchen zu können, wurden durch die Projektpartner ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden zwei Materialien (VM 09 und VM 07*), die bei den Realmaßstabsversuchen zum Einsatz kamen, zusätzlich mit verschiedenen Labor- und Baustellenmischtechniken angemischt und es wurden jeweils zentrale Suspensionseigenschaften bestimmt. Diese vergleichenden Untersuchungen werden in der Folge als Ringversuche bezeichnet.

Die Ergebnisse des Ringversuchs für VM 09 sind in Tabelle 6-1 wiedergegeben. Hierbei wurde zwischen den mit den Verfüllbaustoffherstellern vereinbarten Laboranmischbedingungen (s. Abschnitt 3.2.3.3) und der Verwendung des bei den meisten Technikums- und Realmaßstabsversuchen eingesetzten Kolloidalmischers unterschieden. Die Anmischung der Suspensionen mit dem Kolloidalmischer erfolgte hierbei gemäß den Angaben des Herstellers (W/F-Wert und Nachmischzeit). Die in Tabelle 6-1 für die einzelnen Mischtechniken dargestellten Suspensionseigenschaften zeigen zum Teil eine starke Varianz mit prozentualen Abweichungen von 18 bis 93 %. Erwartungsgemäß ist bei der Dichte keine Abweichung zwischen der mit dem Labormischer und der mit dem Kolloidalmischer angemischten Suspension zu verzeichnen. Die unterschiedliche An-

mischintensität spiegelt sich vor allem im Vergleich der rheologischen Parameter wider. So weisen die Marsh- und Restauslaufzeit Abweichungen von -38 % bzw. +18 % auf. Die mit der Kugelharfe bestimmte Fließgrenze der Suspension unterscheidet sich zwischen der Anmischung unter Laborbedingungen und der Anmischung mit dem Kolloidalmischer um 93 %. Besonders interessant, auch in Bezug auf den bei den Technikums- und Realmaßstabsversuchen festgestellten Zusammenhang von Verfüllqualität und Absetzmaß, ist die große prozentuale Abweichung des Absetzmaßes von -51 %. Dabei ist zu erwähnen, dass bei den Laboruntersuchungen ein Absetzzylinder mit einem Volumen von 250 ml und bei den Großversuchen ein Absetzzylinder mit einem Volumen von 1000 ml eingesetzt wurde. Trotz der Verwendung unterschiedlicher Absetzzylinder ist davon auszugehen, dass die festgestellte Abweichung von -51 % zum überwiegenden Teil durch die unterschiedliche Mischtechnik verursacht wird.

Tabelle 6-1: Einfluss der Mischtechnik auf die Eigenschaften der Verfüllsuspension (Ergebnisse des Ringversuchs mit VM 09)

	Labormischer	Kolloidalmischer	prozentuale Abweichung (Kolloidalmischer bezogen auf Labormischer)
Dichte [kg/m ³]	1,827	1,82 - 1,83	- 0 %
Marshzeit [s]	60	71	+ 18 %
Restauslaufzeit [s]	115	71	- 38 %
Fließgrenze (Kugelharfe) [N/m ²]	31,32	60,5	+ 93 %
Absetzmaß [%]	7,2 %	3,5 - 4 %	- 51 %

Zu bedenken gilt bei diesem Vergleich, dass die ermittelten Suspensionseigenschaften trotz gleichem Probenalter und gleicher Herstellcharge auch durch weitere Einflussfaktoren (verschiedene Suspensionstemperaturen, verschiedene Prüfzeitpunkte) beeinflusst sein können, die sich leider nicht ganz vermeiden ließen.

Die Ergebnisse des Ringversuchs für VM 07* sind in Anhang 20 und Anhang 21 dargestellt. Die verwendete Baustellenmischtechnik des Ringversuchs mit VM 07* ist in Abbildung 5-3 auf S. 262 zu sehen.

Die Werte für einzelne Parameter des Ringversuchs für VM 07* weisen teilweise sehr große Unterschiede auf (Marsh-Zeiten von 85 bis 401 s; Fließgrenzen von 31 bis mehr als 70 N/m²; Filtratwasserabgaben von 24 bis 56 ml). Relativ einheitlich sind hingegen die Dichten und das Absetzmaß. Da die untersuchte Verfüllsuspension bei allen Versuchen ein geringes Absetzmaß (max. 2 %) aufweist, werden für diesen Parameter die auf Grund der unterschiedlichen Anmischtechni-

* Bei VM 07* handelt es sich um eine in der Projektlaufzeit durch den Verfüllbaustoffhersteller erfolgte Weiterentwicklung des Baustoffs VM 07.

ken erwarteten Unterschiede nicht so deutlich wie erwartet. An Hand der Laborversuche (s. Anhang 21) ist jedoch trotz der relativ geringen Unterschiede zu erkennen, dass das Absetzmaß mit zunehmender Mischintensität bzw. mit zunehmender Drehzahl des Mischers abnimmt.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Ringversuche für VM 07* und VM 09 den großen Einfluß der Anmischtechnik auf die resultierenden Suspensionseigenschaften sehr deutlich aufzeigen.

6.1. Korrelation der Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuche

Wie die Ausführungen im vorhergehenden Abschnitt 6 zeigen, wird die Ergebniskorrelation zwischen den Laborversuchen einerseits und den Technikums- und Realmaßstabsversuchen andererseits durch den großen Einfluss der Anmischtechnik und durch unterschiedliche Probenalter sehr stark erschwert. Daneben wirken sich weitere Einflussfaktoren (insbesondere verschiedene Suspensions- und Umgebungstemperaturen) negativ aus auf die Vergleichbarkeit der im Labor, Technikum oder Realmaßstab bestimmten Suspensionseigenschaften und der aus den Technikums- und Realmaßstabsversuchen abgeleiteten Qualitätsbewertungen.

Diese Problematik wird anhand des Vergleichs der bei den Technikumsversuchen versuchsbegleitend erfassten Suspensionsparameter mit den entsprechenden, im Laborprüfprogramm erfassten Suspensionsparameter deutlich. Entsprechende Vergleiche wurden für die Suspensionsdichte (s. Abbildung 6-1), das Absetzmaß nach 24 h (s. Abbildung 6-2), die Marsh-Zeit (s. Anhang 22) und die beim Filterpressenversuch abgegebene Filtratwassermenge (Anhang 23) durchgeführt.

Bei diesen Vergleichen werden für die versuchsbegleitend erfassten Suspensionsparameter ausschließlich Werte von Baustoffen verwendet, die gemäß den in Tabelle 4-1 (s. S. 234) aufgelisteten Standardbedingungen angemischt wurden. Für die in den Laborprüfungen ermittelten Suspensionsparameter werden die im Laborprüfprogramm bei 20 °C ermittelten Werte der entsprechenden Baustoffe verwendet (s. Abschnitt 3.1.5.1). Die Bezeichnung und Kategorisierung der verglichenen Baustoffe erfolgt gemäß Tabelle 2-1 auf S. 13. In den Vergleichsdiagrammen (s. Abbildung 6-1, Abbildung 6-2, Anhang 22 und Anhang 23) sind Standardbaustoffe blaugrau gekennzeichnet, wohingegen thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe auf Quarzsandbasis in orange und thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe auf Graphitbasis (o.ä.) in schwarz dargestellt sind. In den vier Diagrammen ist neben den Datenpunkten der verglichenen Baustoffe zusätzlich eine diagonale Linie dargestellt. Liegt ein Datenpunkt (sehr) nahe an dieser diagonalen Linie stimmen die versuchsbegleitend sowie die im Labor erfassten Werte für den betrachteten Baustoff nahezu überein.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Anzahl der in Technikumsversuchen unter Standardbedingungen untersuchten Verfüllbaustoffe geringer ist die Anzahl der im Labor untersuchten Verfüllbaustoffe. Daher konnten nicht für alle im Labor untersuchten Verfüllbaustoffe entsprechende Vergleiche angestellt werden.

Die Betrachtung der vier erwähnten Diagramme zeigt, dass mit Ausnahme der Dichte (s. Abbildung 6-1) für die anderen drei Parameter (Absetzmaß nach 24 h, Marsh-Zeit, Filtratwasser) bei

der Mehrzahl der betrachteten Verfüllbaustoffe signifikante Abweichungen vorliegen. Damit wird deutlich, dass die korrekte Anmischung einer Verfüllsuspension nicht ausschließlich durch eine Kontrolle der Dichte nachgewiesen werden kann.

Hinsichtlich der als besonders relevant für die Verfüllqualität erachteten Suspensionsstabilität, die durch das Absetzmaß charakterisiert wird, wird an Hand von Abbildung 6-2 erneut der große Einfluss der Anmischtechnik und -intensität für eine große Anzahl an Baustoffen deutlich. Wie zu Beginn dieses Kapitels erläutert, können aber auch andere Aspekte (z.B. Lagerdauer des Baustoffs, Temperatur etc.) für die Unterschiede zwischen den versuchsbegleitend erfassten Werten und den in den Laborprüfungen erfassten Werten mitverantwortlich sein.

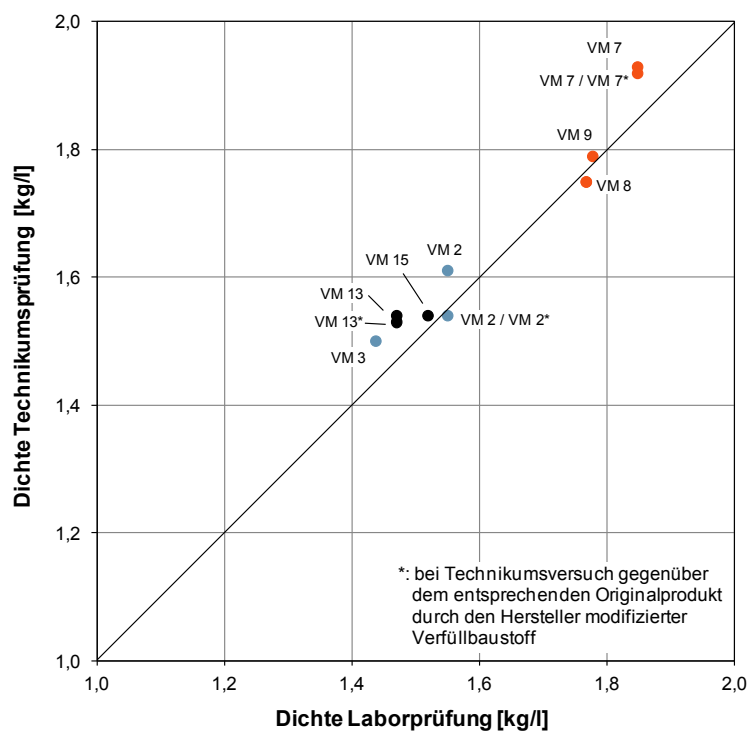


Abbildung 6-1: Vergleich der ermittelten Dichte bei den Technikums- bzw. Laborversuchen

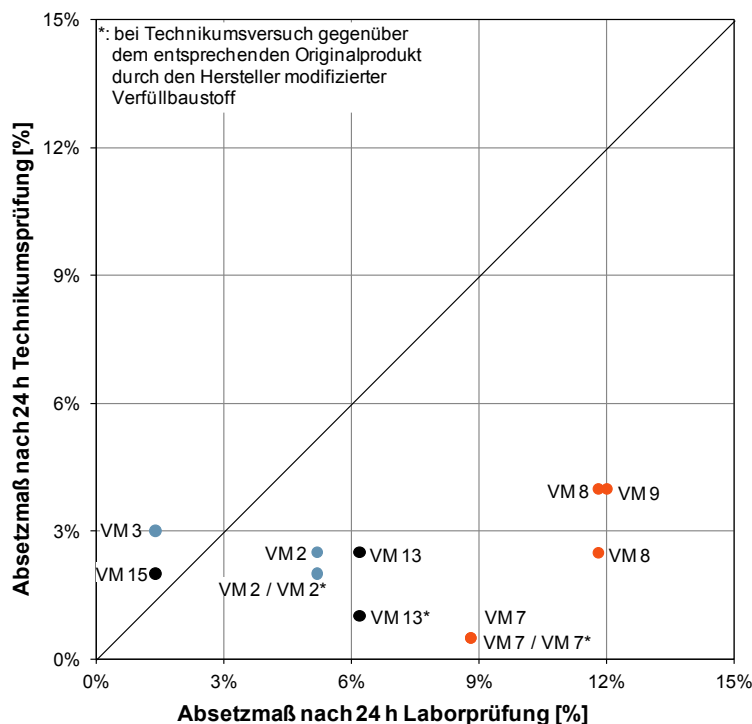


Abbildung 6-2: Vergleich der ermittelten Absetzmaße bei den Technikums- bzw. Laborversuchen

Um den Einfluss einzelner Suspensionsparameter auf die Verfüllqualität untersuchen und damit gegebenenfalls für die Verfüllqualität relevante Suspensionsparameter identifizieren und Empfehlungen für einzuhaltende Wertebereiche ableiten zu können, werden die für die Technikums- und Realmaßstabsversuche ermittelten Gesamtnoten (s. Abschnitte 4.5 und 5.5.1), die die Verfüllqualität der betrachteten EWS beschreiben, mit den Suspensionsparametern der verwendeten Verfüllbaustoffe verglichen. Auf Grund der vorstehend festgestellten signifikanten Unterschiede zwischen den versuchsbegleitend und den im Laborprüfprogramm ermittelten Werten des Absetzmaßes, der Marsh-Zeit und des Filtratwassers werden für diesen Vergleich die begleitend zu den Technikums- und Realmaßstabsversuchen ermittelten Suspensionsparameter verwendet. Bei den genannten Vergleichen werden ausschließlich die Gesamtnoten von Versuchen betrachtet, bei denen die Versuche unter den Standardbedingungen (s. Tabelle 4-1 auf S. 234) durchgeführt wurden.

In Abbildung 6-3 bzw. Abbildung 6-4 sind die Gesamtnoten aller unter Standardbedingungen durchgeführten Technikumsversuche bzw. Realmaßstabsversuche gegen das Absetzmaß dargestellt. Bei beiden Abbildungen ist ersichtlich, dass eine Korrelation zwischen Verfüllqualität und Absetzmaß besteht, wobei speziell bei den Technikumsversuchen Ausnahmen auftreten können. So wurde Verfüllbaustoff 2 mit einem Absetzmaß von 2 % aufgrund der extremen Zerrüttung (vgl. Abbildung 4-13 links auf Seite 243) mit „mangelhaft“ bewertet, wohingegen Verfüllbaustoff 3 mit einem Absetzmaß von 3 % insgesamt eine gute Verfüllqualität aufwies. Bei den Realmaßstabs-

versuchen konnte eine deutlichere Korrelation zwischen Verfüllqualität und Absetzmaß festgestellt werden (Abbildung 6-4). Dieser Zusammenhang ist durch die Trendlinien in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 verdeutlicht.

Auf Basis der Ergebniskorrelationen in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 kann damit festgehalten werden, dass die Verfüllqualität bei geringen Absetzmaßen in der Regel besser ist als bei hohen Absetzmaßen. Dementsprechend konnte für alle Baustoffe, die ein Absetzmaß von 1 % oder weniger aufwiesen, eine nach der Notengebung schlechtestenfalls befriedigende Verfüllqualität (d.h. Note 3 oder besser) festgestellt werden.

Im Gegensatz zum Absetzmaß nach 24 h konnte für die Marshzeit, die Filtratwassermenge und die Dichte sowohl für die Technikumsversuche (Anhang 24 bis Anhang 26) als auch für die Realmaßstabsversuche (Anhang 27 bis Anhang 29) keine Korrelation mit den entsprechenden Gesamtnoten der Verfüllqualität festgestellt werden.

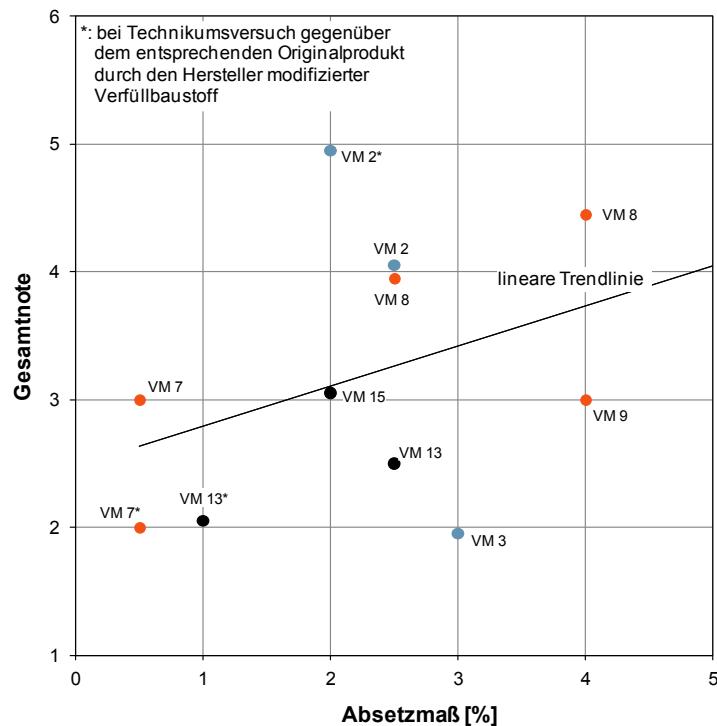


Abbildung 6-3: Korrelation zwischen der Gesamtnote der unter Standardbedingungen durchgeführten Technikumsversuche und dem Absetzmaß

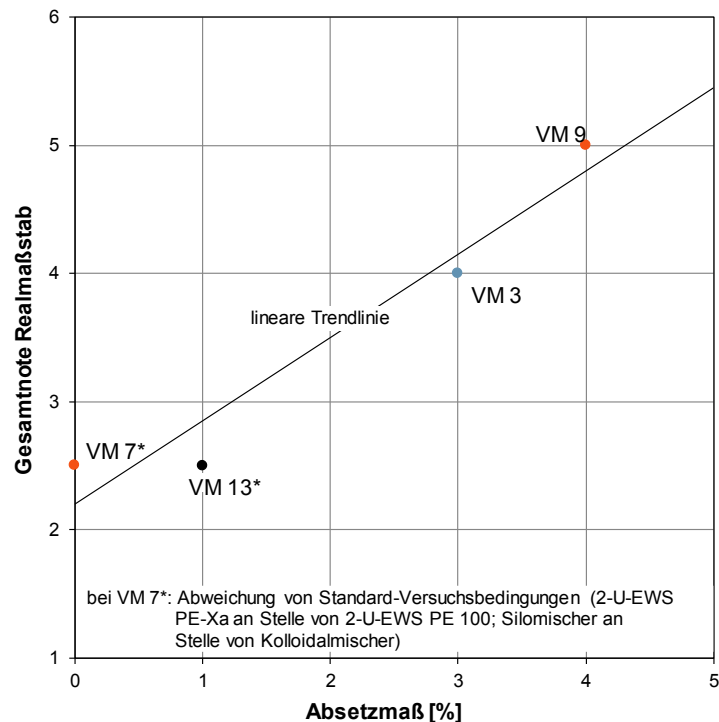


Abbildung 6-4: Korrelation zwischen der Gesamtnote der unter Standardbedingung durchgeführten Realmaßstabsversuche und dem Absetzmaß

Ergänzend zu den vorstehenden Gegenüberstellungen wird nachfolgend analysiert, inwiefern die Ergebnisse der Technikumsversuche auf den Realmaßstab übertragen werden können. Zu diesem Zweck sind in Abbildung 6-5 die Gesamtnoten der unter Standardbedingungen durchgeführten Realmaßstabsversuche gegen die Gesamtnoten der ebenso unter Standardbedingungen durchgeführten Technikumsversuche aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Verfüllqualität im Realmaßstab mit der Verfüllqualität im Technikum gut korreliert, wobei bei den Realmaßstabsversuchen tendenziell eine schlechtere Verfüllqualität auftritt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass aufgrund der größeren Versuchslänge die Auswirkung des „Ausblutens“ (Wasserabsetzen der Verfüllsuspension) und in der Folge die Größe und Anzahl an Fehlstellen sowie an Aufstiegskanälen bei den Realmaßstabsversuchen größer ist als bei den Technikumsversuchen (vgl. Abschnitt 5.5.1). Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass auch bei zukünftigen Untersuchungen weiterhin sowohl der Einsatz von Technikumsversuchen als auch von Realmaßstabsversuchen sinnvoll ist.

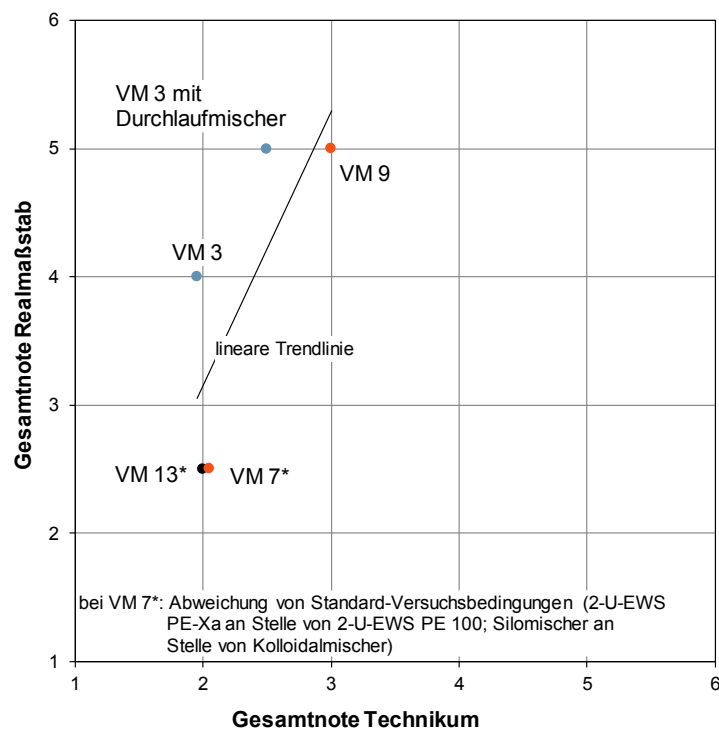


Abbildung 6-5: Korrelation zwischen Gesamtnote Realmaßstab und Gesamtnote Technikum

6.2. Fazit und Empfehlungen

An Hand der vorstehenden Ergebnisvergleiche der Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuche wird deutlich, dass insbesondere die verwendete Anmischtechnik sowie weitere Randbedingungen (Suspensionstemperatur, Lagerungsdauer der Verfüllbaustoffe) großen Einfluss auf die resultierenden Suspensionseigenschaften haben.

Entscheidend für die nachfolgenden Empfehlungen ist darüber hinaus die Erkenntnis, dass die Eigenschaften der Verfüllsuspensionen produktabhängig sehr heterogen sind. Entsprechend konnte lediglich für das Absetzmaß ein Zusammenhang mit der Verfüllqualität festgestellt werden. Damit ist die Vorgabe einheitlicher Prüfkriterien für alle Baustoffe mit Ausnahme eines sehr geringen Absetzmaßes von ca. 1 % oder weniger aktuell nicht möglich.

Für das weitere Vorgehen empfehlen die Autoren, sich an das im Betonbau etablierte Qualitätssicherungssystem anzulehnen. DIN Fachbericht 100 sowie die entsprechenden Folgenormen sehen hierzu ein dreistufiges Sicherungssystem bestehend aus Erstprüfung, Konformitätsprüfung und Identitätsprüfung vor, das entsprechend auf die Randbedingungen bei der EWS-Zementation angepasst werden müsste.

Ein wesentlicher Unterschied bei der Qualitätssicherung der hier verwendeten Materialien im Vergleich zu Transportbeton ist in der Tatsache zu sehen, dass die Herstellung der Verfüllbaustoffe auf der Baustelle durch den Verwender i.d.R. unter Verwendung fertiger Gebinde erfolgt. Weiterhin weicht die Mischtechnik bei der Anmischung auf der Baustelle von der im Labor (sowohl bei

der Erstprüfung als auch der Konformitätsprüfung) verwendeten Mischtechnik ab. Vor diesem Hintergrund empfehlen die Autoren zur Qualitätssicherung von EWS-Verfüllbaustoffen eine zusätzliche Sicherungsstufe, im Folgenden als Freigabeprüfung bezeichnet, einzuführen.

Erstprüfung:

Ausgangsbasis für alle Qualitätssicherungs-Maßnahmen sollte eine sogenannte Erstprüfung darstellen, die vom Hersteller der EWS-Verfüllbaustoffe (d.h. der entsprechenden Sackware) durchzuführen wäre. Die Erstprüfung sollte Untersuchungen zu allen relevanten Eigenschaften des Verfüllmaterials (siehe Kapitel 3.1.6.1. Eigenschaftsgruppen) umfassen. Aufgrund des signifikanten Einflusses der Temperatur der Baustoff suspension auf die Materialeigenschaften, sollten die Untersuchungen sowohl bei Normtemperatur (20 °C) als auch bei einer geringeren Temperatur (z. B. 10 °C) durchgeführt werden. Wichtig erscheint es weiterhin, dass der Hersteller die im Rahmen der Erstprüfung eingesetzte Herstellmethode (d. h. sowohl die verwendete Mischtechnik als auch das Anmischprozedere) genau spezifiziert. Hierdurch ist im Zweifelsfall eine nachträgliche Überprüfung der Materialeigenschaften am fertigen Gebinde im Labor möglich. Die umfangreiche Erstprüfung sollte einmalig bei der Entwicklung eines neuen Verfüllbaustoffs durchgeführt und bei ggf. vorgenommenen Änderungen in der Zusammensetzung bzw. den verwendeten Ausgangsstoffen wiederholt werden.

Konformitätsprüfung:

Die Konformitätsprüfung der Verfüllbaustoffe obliegt ebenfalls dem Hersteller und sollte mit den bereits in der Erstprüfung eingesetzten Prüf- und Herstellmethoden durchgeführt werden. Der Umfang der Konformitätsprüfung kann gegenüber der Erstprüfung reduziert werden, jedoch sollten alle wesentlichen physikalischen Eigenschaften abgedeckt sowie das eingesetzte Herstellverfahren, die bei der Herstellung vorliegenden Randbedingungen und die eingesetzten Prüfmethoden spezifiziert werden. Die Ergebnisse sollten chargenweise dokumentiert werden, wobei geeignete Prüfintervalle festzulegen sind bzw. mit dem Kunden vereinbart werden sollten.

Identitätsprüfung:

Die Identitätsprüfung obliegt dem Verwender des Baustoffes. Dieser erhält vom Baustoffhersteller eine qualitätsgesicherte, durch Erstprüfung und Konformitätsprüfung abgesicherte Trockenmischung und mischt diese mit dem durch den Baustoffhersteller vorgegebenen Wassergehalt an. Da die Mischtechnik, die Herstellmethode und die Umweltbedingungen gegenüber der Methodik der Erstprüfung bzw. Konformitätsprüfung abweichen werden, sollte der Baustoffverwender von jeder Charge eine Rückstellprobe entnehmen und diese mit der vom Baustoffhersteller für die Konformitätsprüfung spezifizierten Prüfmethodik (und Anmischtechnik) auf seine Identität hin prüfen. Durch Vergleich der so gewonnenen Kennwerte mit den Ergebnissen der Konformitätsprüfung wird die Qualität der verwendeten Charge sichergestellt.

Freigabeproofung:

Nach dem großtechnischen Anmischen des Verfüllbaustoffs auf der EWS-Baustelle, sollte die jeweils erste Charge auf seine Dichte und Temperatur, seine rheologischen Eigenschaften (Marsh-Zeit, Fließgrenze mit Kugelharfenversuch) sowie seine Entmischungsstabilität geprüft werden. Für die Freigabe des Materials zum Pumpen sollten durch den Baustoffhersteller geeignete Grenzwerte festgelegt werden, bei deren Einhaltung eine fehlerstellenfreie Verfüllung sichergestellt werden kann. Diese Freigabeproofung sollte in festgelegten Intervallen (z. B. Anzahl Prüfungen pro Verfüllmenge oder Verfülldauer) wiederholt werden.

Auf Basis des vorstehend beschriebenen Vorgehens wurde von den Autoren im Rahmen des EWS-tech Projekts ein **Vorschlag für die Mindestangaben in einem Datenblatt für EWS-Verfüllbaustoffe** erarbeitet (s. Anhang 30). Ergänzend wird auch ein Vorschlag für die Mindestangaben auf dem Baustoffsack gemacht (s. Anhang 30), da dieser auf der Baustelle im Gegensatz zum Datenblatt zwangsläufig vorhanden ist. Ergänzend hierzu wäre auch die Anbringung eines QR-Codes mit einer Verlinkung zu dem detaillierten Datenblatt auf dem Baustoffsack denkbar.

Auf dem Datenblatt bzw. dem Baustoffsack sollten neben den **Basisangaben** zum Produkt (Produktname, thermisch verbessernde Zusatzstoffe, Zementart, Haltbarkeit, Verarbeitungszeit) auch **Mischungsangaben**, d.h. Angaben zur Anmischung des Baustoffs, gemacht werden. Wichtig sind auf Basis der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens hierbei neben den heute bereits üblichen Angaben (W/F-Verhältnis, Dosierung, Ergiebigkeit) insbesondere konkrete Angaben zur Anmischtechnik für die Baustelle. Neben der Referenzvariante sollten die Baustoffhersteller auch weitere Alternativvarianten mit abweichenden Angaben zur Anmischung des Baustoffs spezifizieren können. Damit kann der je nach Baustoff ggf. stark ausgeprägten Abhängigkeit der Suspensionseigenschaften von der Anmischtechnik Rechnung getragen werden.

Sowohl für die Referenzvariante als auch für mögliche Alternativvarianten sollten auf dem Datenblatt bzw. auf dem Baustoffsack **Prüfangaben** zu den wesentlichen Suspensionsparametern gemacht werden. Der Mindestumfang der Prüfangaben auf dem Datenblatt umfasst u.a.: Dichte, Marsh-Zeit, Fließgrenze, Suspensionstemperatur, Absetzmaße nach 1 und 24 Stunden, Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte, Festigkeiten nach 1 und 28 Tagen, Wärmeleitfähigkeit, Angaben zur Frost-, Sulfat- und Säurebeständigkeit sowie eine Umweltverträglichkeitsbescheinigung. Genaue Angaben hierzu können Anhang 30 entnommen werden. Für die einzelnen Parameter wird in dem vorgeschlagenen Datenblatt unterschieden zwischen den Werteangaben der Erstprüfung und den zulässigen Wertebereichen für die auf der Baustelle von den Autoren empfohlene Freigabeproofung. Zusätzlich zu den Werten sind für die einzelnen Parameter die verwendeten bzw. zu verwendenden Prüfmethothen/Normen anzugeben.

Auf dem Baustoffsack sollten nach Empfehlung der Autoren neben den Basisangaben und den Mischungsangaben im Wesentlichen Prüfangaben für die Suspensionsparameter, die Teil der Freigabeproofung auf der Baustelle sind, enthalten sein. Daneben wird empfohlen, auf dem Baustoffsack Angaben zum Absetzmaß nach 24 Stunden sowie Angaben zur Sulfatbeständigkeit zu machen. Unabdingbar ist auf dem Baustoffsack außerdem die Angabe des Herstelldatums und ggf. ergänzend der Chargennummer, um dem Verwender des Baustoffs unter Berücksichtigung

der in den Basisangaben enthaltenen Haltbarkeitsangabe eine Beurteilung der Verwendbarkeit des Trockenbaustoffs zu ermöglichen.

Die empfohlene Freigabeprüfung umfasst wie bereits oben erwähnt die folgenden Parameter: Dichte, Marsh-Zeit, Fließgrenze, Suspensionstemperatur, Absetzmaß nach 1 Stunde und die Festigkeit nach 28 d. Hierbei nehmen die beiden Parameter des Absetzmaßes nach 1 Stunde und die Festigkeit nach 28 d eine Sonderstellung ein.

Das Einhalten des zulässigen Absetzmaß-Wertebereichs dient lediglich bei der ersten, vor dem Verfüllvorgang erfolgenden Freigabeprüfung als Annahmekriterium. Bei allen in bestimmten Intervallen folgenden Freigabeprüfungen dient die Messung des Absetzmaßes nur noch als Kontrollmessung. Auf Grund der Wartezeit von 1 Stunde zwischen Probenahme und Bestimmung des Absetzmaßes führt das vorgeschlagene Vorgehen dazu, dass der Verfüllvorgang frühestens eine Stunde nach Beginn der ersten Freigabeprüfung begonnen werden kann. Der sich hieraus ergebende Zusatzaufwand auf der Baustelle erscheint den Autoren angesichts der hohen Bedeutung eines geringen Absetzmaßes für die Sicherstellung einer guten Verfüllqualität als gerechtfertigt.

Die Festigkeitsprüfung an einem Probekörper, der aus der am Ende des Verfüllvorgangs oben aus dem Bohrloch austretenden Suspension hergestellt wird, soll nach 28 Tagen erfolgen und dient damit im eigentlichen Sinn nicht als Freigabeprüfung, sondern eher als Kontrollmessung.

Hinsichtlich der Probenahme für die Freigabeprüfung (mit Ausnahme der Festigkeitsbestimmung) empfehlen die Autoren das folgende Vorgehen:

Die Probenahme der ersten Freigabeprüfung muss mindestens 1 Stunde vor Verfüllbeginn durchgeführt werden. Weitere Probenahmen sollen mindestens alle 750 Liter bzw. bei Chargenmischern mindestens bei jeder 5. Mischcharge erfolgen (je nachdem welches Kriterium zuerst eintritt). Die Probenahme kann entweder aus dem Vorratsbehälter der Mischanlage (Chargenmischer) oder an einem Ablasshahn der Verfüllleitung zwischen Mischanlage und Bohrloch erfolgen.

Bei Anlagen, die den Baustoff gleichzeitig anmischen und ins Bohrloch verfüllen (sogenannte Durchlaufmischer) ist vor Beginn des Verfüllvorgangs die gewünschte Suspensionsdichte durch Anpassung der Wassermenge einzustellen, ohne dass dabei Verfüllsuspension ins Bohrloch eingebracht wird. Die hierzu erforderlichen Probenahmen müssen an einer geeigneten Stelle (z.B. an einem Ablasshahn oder direkt am Austritt der Mischanlage) entlang der für den späteren Verfüllvorgang zu verwendenden oberirdischen Verpressleitung zwischen Mischanlage und Bohrloch erfolgen. Bei jeder Probenahme ist sicherzustellen (z.B. durch eine ausreichend lange Wartezeit zwischen dem Anpassen der Wassermenge und der Probenahme), dass die für die Probenahme verwendete Verfüllsuspension die Suspensionseigenschaften wiedergibt, die der aktuell eingestellten Wassermenge entsprechen. Dies trifft sowohl auf die Probenahmen zur Einstellung der Solldichte als auch auf die späteren Probenahmen zur Freigabeprüfung zu. Nach Erreichen des zulässigen Wertebereichs der Dichte erfolgt auf diese Weise die Probenahme für die erste Freigabeprüfung. Sofern die zulässigen Wertebereiche bei dieser Freigabeprüfung eingehalten wer-

den, ist der Mischer beim Verfüllvorgang mit denselben, unveränderten Einstellungen zu betreiben wie bei der Probenahme der erfolgten ersten Freigabeprüfung. Andernfalls ist das Einbringen der Verfüllsuspension ins Bohrloch nicht erlaubt.

Auf Grund der in diesem Forschungsvorhaben aufgezeigten großen Bedeutung der Anmischbedingungen für die resultierenden Suspensionsparameter sind auf dem Datenblatt auch Angaben zu den Anmischbedingungen der für die Erstprüfung verwendeten Suspensionen zu machen (Rührwerk, U/min, Art und Durchmesser des Rührers, Anmischzeit, angemischte Menge, Art des Mischbehälters etc.). Eine weitere erforderliche Angabe stellt die Temperatur der Suspension und des ausgehärteten Baustoffs dar, bei der die Werte der Erstprüfung ermittelt wurden.

Es wird darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung von Alternativvarianten einige Erstprüfungs-Parameter (Absetzmaße, Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, Festigkeiten, Wärmeleitfähigkeit, Frost-, Sulfat- und Säurebeständigkeit) zur Minimierung des Aufwands lediglich für die Variante mit dem höchstzulässigen Wasser-Feststoff-Verhältnis (worst-case Fall) ermittelt werden müssen und auch für die anderen Varianten übernommen werden dürfen.

Es soll an dieser Stelle betont werden, dass es sich bei den Inhalten der vorgeschlagenen Datenblätter und Baustoffsackaufdrucke um Mindestangaben handelt. Selbstverständlich soll es den Verfüllbaustoffherstellern offenstehen, weitere Angaben in dem Datenblatt zu machen (z.B. auch Handlungsanweisungen) oder ergänzende Untersuchungen im Rahmen der Erstprüfung (z.B. Technikumsversuche gemäß Abschnitt 4) durchzuführen/durchführen zu lassen und deren Ergebnisse ggf. in das Datenblatt aufzunehmen.

Konkrete Beispiele der in Anhang 30 allgemeingültig dargestellten Mindestangaben für das Datenblatt und den Baustoffsack sind in Anhang 31 und Anhang 32 wiedergegeben. Anhang 31 zeigt ein Beispiel, bei dem neben der Referenzvariante auch zwei Alternativvarianten angegeben sind. Bei Anhang 32 handelt es sich hingegen um ein einfaches Beispiel ohne Alternativvarianten.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1. Prüfkonzep für zementäre Verfüllbaustoffe

Ziel der Laboruntersuchungen war die Identifikation reproduzierbarer und baustellentauglicher Prüfmethode die sich zur Qualitätssicherung von geothermischen Hinterfüllmaterialien eignen. Hierzu wurden 15 verschiedene Hinterfüllbaustoffe im Labor auf ihre chemischen, mineralogischen, physikalischen und rheologischen Eigenschaften mit Labormethoden und gängigen Baustellenmethoden untersucht und charakterisiert. Zur Validierung der Ergebnisse einerseits und zur Evaluierung geeigneter Baustellenmethoden andererseits, wurde jeder untersuchte Parameter mit mehreren verschiedenen Methoden untersucht und die verwendeten Methoden bewertet. Die Untersuchungen unterteilten sich dabei in die folgenden Eigenschaftsgruppen:

- Dichte
- rheologische Eigenschaften
- Homogenität und Suspensionsstabilität
- mechanische Stabilität

Darüber hinaus wurde an vier ausgewählten Hinterfüllbaustoffen im Rahmen zweier Szenarien der Einfluss einer Wasserüberdosierung auf der Baustelle sowie erniedrigter Temperaturen im Bohrloch untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Methoden verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse liefern und somit geeignet sind, um zur Qualitätssicherung und als Annahmekriterium auf der Baustelle herangezogen zu werden. Bezüglich der Dichte, den rheologischen Eigenschaften sowie der mechanischen Stabilität sind alle hier verwendeten Methoden uneingeschränkt anwendbar. Lediglich bei der Sedimentationsstabilität konnte keine geeignete alternative Methode identifiziert werden, um das zeitintensive Absetzmaß zu ersetzen. Die Ergebnisse legen hier jedoch nahe, dass in Abhängigkeit des Hinterfüllmaterials eine Bestimmung des Absetzmaßes schon nach 1 Stunde erfolgen kann. Hier besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

Die Erhöhung des Wassergehalts führt bei den vier untersuchten Hinterfüllbaustoffen tendenziell zu einer Verringerung der Viskosität und der Dichte sowie zu einem verzögerten Aushärteverhalten. Die Versuchsergebnisse bei erniedrigter Temperatur weisen anhand der rheologischen Eigenschaften und der Druckfestigkeiten auf eine Verlangsamung des chemischen Abbindeprozesses hin. Die Dichte und Filtratmenge blieben verglichen zur Normaltemperatur unbeeinflusst wohingegen die Suspensionsstabilität im Sinne des Absetzmaßes bei niedriger Temperatur verringert war.

7.2. Systemdurchlässigkeit

Die untersuchten Verfüllbaustoffe zeigen innerhalb der Versuchszeiten eine strukturelle und chemische Veränderung bei hohen Sulfatgehalten in Verbindung mit hohen Alkali- und Erdalkalikonzentrationen. Ebenso kann eine Beeinflussung in Verbindung mit sauren Wässern bei allen Materialien nachgewiesen werden. Detailliert auf den Sulfat- bzw. den Säurewiderstand wurden die Materialien 01, 07, 13 und 16 untersucht. Dabei zeigt das Material 13 die besten Eigenschaften.

Danach folgen die Materialien 01 und 07, wobei beide Materialien sich in Bezug auf die Sulfat- bzw. Säurebeständigkeit sehr ähnlich verhalten. Die Baustellenmischung (Material 16) besitzt keine ausreichende Sulfat- bzw. Säurebeständigkeit und muss deshalb als besonders kritisch betrachtet werden. Generell ist daher eine Langzeitüberwachung und -bewertung von Erdwärmesonden, die mit Eigenmischungen hinterfüllt wurden, insbesondere in Wässern mit hohen Sulfatanteilen in Verbindung mit hohen Alkali- und Erdalkalikonzentrationen sowie in säurehaltigen Wässern, sinnvoll.

Alle untersuchten Baustoffe zeigten eine ausreichend geringe hydraulische Durchlässigkeit und Systemdurchlässigkeit, wobei Baustoff 13 besonders geringe hydraulische Durchlässigkeits- und Systemdurchlässigkeitsbeiwerte aufweist.

Die ausgearbeiteten Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen können bei der Erst- und Konformitätsprüfung der Verfüllbaustoffe von den Herstellern eingesetzt werden. Aus dem vorliegenden Bericht können die detaillierten Baupläne der Systemdurchlässigkeitszellen in Anlehnung an die DIN 18130-T1 entnommen und mit geringem Aufwand nachgebaut und anhand der Versuchsbeschreibung Systemdurchlässigkeitsversuche durchgeführt werden. Die Systemdurchlässigkeiten sollten in den vereinfachten Systemdurchlässigkeitsversuchen mindestens die Anforderungen der LQS EWS von maximal $5,0 \cdot 10^{-9}$ m/s erfüllen. Zu diskutieren ist, ob die vereinfachten Systemdurchlässigkeitsversuche aufgrund des Maßstabes alleine genügen, um eine dauerhafte Systemdurchlässigkeit beurteilen zu können. Sinnvoll erscheint, dass zur Vorprüfung eines Baustoffs zumindest einmal ein größerskaliger Systemdurchlässigkeitsversuch in Anlehnung an Kuckelkorn (2013) durchzuführen ist, der zur Erstprüfung herangezogen wird. Die Konformitätsprüfung der Baustoffe erfolgt dann anhand der im Rahmen des Vorhabens ausgearbeiteten kleinskaligen Systemdurchlässigkeitstests im Labor der Baustoffhersteller.

Die im Rahmen des Vorhabens ausgearbeiteten Umströmungsversuche zur Beurteilung von Hinterfüllmaterialien für Erdwärmesondenanlagen in Verbindung mit den durchgeführten Untersuchungsmethoden sind prinzipiell geeignet, den Sulfat- bzw. den Säurewiderstand von Verfüllbaustoffen bewerten zu können. Dabei können je nach Fragestellung und Anforderung unterschiedliche Verfüllbaustoffe und zementaggressive Wässer verwendet werden. Die detaillierten Baupläne des Versuchsaufbaus, sowie die Versuchsbeschreibung, können auch hier dem Bericht entnommen werden. Zur Bewertung der Sulfat- bzw. Säurewiderstände sollten Festigkeitsuntersuchungen herangezogen werden. Einfache beschleunigte Batchversuche können als ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden. Sie reichen aber alleine nicht aus, um die Beständigkeit eines Verfüllbaustoffes bewerten zu können.

7.3. Technikumsversuche

Es wurde ein transparenter Versuchsaufbau zur Visualisierung des Verfüll- und Aushärtevorgangs von 6 m langen Erdwärmesonden entwickelt und erfolgreich realisiert.

In diesem Versuchsaufbau wurde in 36 Versuchen der Einfluss zahlreicher Faktoren auf die Verfüllqualität von Erdwärmesonden untersucht.

Mit Hilfe der Versuche konnten wesentliche Erkenntnisse zur Fehlstellenbildung gewonnen werden. Unter anderem konnte gezeigt werden, dass die Bildung von Fehlstellen und Kanalstrukturen in der Verfüllung häufig mit dem Ausbluten bzw. Wasserabsetzen des Verfüllbaustoffs in Zusammenhang steht. Dieser Prozess wird durch die folgenden identifizierten drei Haupteinflussfaktoren der Verfüllqualität bestimmt:

- Art des Verfüllbaustoffs
- Art der verwendeten Misch- und Verfüllanlage
- Geometrie des Bohrlochs (Aufhängen von Wasserblasen, bevorzugte Kanalbildung entlang von Sondenrohren an der Bohrlochwand)

Es bleibt festzuhalten, dass die bei den Standardversuchsbedingungen (s. Tabelle 4-1 auf S. 234) ermittelte Verfüllqualität sehr stark von der Art des Verfüllbaustoffs abhängt. Positiv hervorzuheben ist, dass die Verfüllqualität von sieben der zehn untersuchten Verfüllbaustoffe schlechtestenfalls mit der Note 3 („befriedigend“) bewertet wurde (s. Kapitel 4.5.1). Auch wenn bei diesen Verfüllbaustoffen teilweise noch deutliches Verbesserungspotential vorhanden ist (z.B. hinsichtlich des Absetzmaßes), lassen die in den Technikumsversuchen für diese Baustoffe ermittelten Verfüllqualitäten keine direkten Rückschlüsse auf mögliche Systemdurchlässigkeiten zu. Bei den drei mit schlechteren Gesamtnoten bewerteten Verfüllbaustoffen liegt auf Basis der qualitativen Bewertung die Vermutung nahe, dass diese möglicherweise eine erhöhte Systemdurchlässigkeit aufweisen. Der Vertrieb der betroffenen Produkte wurde durch die Baustoffhersteller daher bereits auch eingestellt oder eingeschränkt.

Bei den Technikumsversuchen konnte außerdem gezeigt werden, dass sich die Verfüllqualität bei Verwendung von Misch- und Verfüllanlagen mit geringer Mischintensität je nach Art des Baustoffs teilweise drastisch verschlechtern kann. Für eine qualitätsgesicherte Verfüllung ist also zwangsläufig der Einsatz einer auf den eingesetzten Verfüllbaustoff abgestimmten Mischanlage erforderlich.

Eine weitere zentrale Erkenntnis ist die Tatsache, dass Verfüllqualitätsmangel häufig durch die komplexe Bohrlochgeometrie mit den zahlreichen, verdrillten Sondenrohren bedingt sind. Dies wurde an Hand von Versuchen in Bohrlöchern ohne Sondenrohre aufgezeigt. In diesen Bohrlöchern resultierte gegenüber den entsprechenden Verfüllungen in Bohrlöchern mit Sondenrohren signifikante Verbesserungen der Verfüllqualität.

7.4. Realmaßstabsversuche

Mit der erfolgreichen Errichtung der Realmaßstabsversuchsanlage wurde das erste dauerhaft nutzbare Versuchsgelände für Erdwärmesonden bis zu Einbautiefen von 30 m erschaffen. Die aus zwei Bohrungen bestehende Versuchsanlage ermöglicht den Ein-, sowie den zerstörungsfreien Rückbau von 30 m tiefen Erdwärmesonden. Mit den im Laufe des Projektes durchgeführten acht Realmaßstabsversuchen konnten die Ergebnisse der Technikumsversuche verifiziert werden. Es zeigte sich, dass die im Technikumsmaßstab beobachteten Verfüllqualitätsmängel auch

bei den Realmaßstabsversuchen entstehen, das Ausmaß dieser beobachteten Verfüllqualitätsmängel (Größe und Anzahl der Fehlstellen etc.) jedoch tendenziell verstärkt wird.

Es konnte aufgezeigt werden, dass die Verwendung eines Durchlaufmischers nicht zwangsläufig zu schlechteren Verfüllqualitäten führt und die Bewertung der Misch- und Verfüllanlage demnach nicht alleinstehend, sondern stets in Kombination mit dem zu verwendenden Verfüllbaustoff erfolgen sollte.

Zudem wurde für einige der eingebauten Erdwärmesonden mit dem von Riegger (2016) entwickelten Verfahren der effektive thermische Bohrlochwiderstand bestimmt. Mit den durchgeführten Untersuchungen und begleitenden Simulationen und Berechnungen zur theoretischen Bestimmung von effektiven thermischen Bohrlochwiderständen konnte gezeigt werden, dass insbesondere Koaxial-EWS mit großem Bohrlochdurchmesser unter Effizienzaspekten eine interessante Alternative zu 2-U-EWS sein können.

Im Zuge der Durchführung der Realmaßstabsversuche wurde außerdem deutlich, dass ein kontinuierlicher Verfüllvorgang mit einem Kolloidal-/Chargenmischer aufgrund des Zeitbedarfs für die Anmischung einer Charge unter Umständen schwer zu realisieren sein kann. Folglich wird eine genaue Planung des Verfüllvorgangs unter Berücksichtigung der verwendeten Misch- und Verfüllanlage, des eingesetzten Verfüllbaustoffs, der geplanten Verfüllgeschwindigkeit und der Bohrlochgeometrie empfohlen. Als Hilfsmittel hierfür wurde eine MS Office Excel Berechnungsmappe entwickelt, die auf der Internetseite erdsondeninfo.de kostenfrei zur Verfügung gestellt werden soll.

Auf dem dauerhaft nutzbaren Versuchsgelände können auch in Zukunft Untersuchungen an eingebauten Erdwärmesonden durchgeführt werden, wie zum Beispiel Eignungsuntersuchungen unterschiedlicher geophysikalischer Messverfahren zur Bestimmung der Verfüllqualität. Für dieses Beispiel könnten die Ergebnisse und Interpretationen der durchgeführten Messungen nach dem zerstörungsfreien Rückbau mit dem tatsächlichen Zustand im Bohrloch verglichen werden. Weiterhin lässt die Dimensionierung der Versuchsbohrungen in Zukunft zusätzliche Anpassungen der Versuchsrandbedingungen zu, sodass beispielsweise bei der Verfüllung eines Erdwärmesondenbohrlochs ein Grundwasserstrom durch die Aufbringung eines definierten Wasserstroms versuchstechnisch abgebildet werden kann.

7.5. Empfehlungen zur Prüfung von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen

Die Ergebniskorrelation der Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuche in Abschnitt 6 zeigt, dass die Festlegung einheitlicher Prüfkriterien für EWS-Verfüllbaustoffe aus verschiedenen Gründen (insbesondere Heterogenität der EWS-Verfüllbaustoffe) zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich ist (s. Abschnitt 6.1). Lediglich für das Absetzmaß konnte ein Zusammenhang mit der Verfüllqualität festgestellt werden, aus dem die Empfehlung resultiert, das Absetzmaß auf einen sehr geringen Wert (z. B. 1 %) zu begrenzen.

Weiterhin wurde bei der Ergebniskorrelation deutlich, dass insbesondere die verwendete Anmischtechnik einen großen Einfluss auf die resultierenden Suspensionseigenschaften hat. Ebenso ist die Lagerungsdauer der Verfüllbaustoffe sowie die Suspensionstemperatur ein für die Eigenschaften der Verfüllsuspension wichtiger Parameter.

Auf dieser Basis schlagen die Autoren in Abschnitt 6.2 für das weitere Vorgehen eine Anlehnung an das im Betonbau etablierte Qualitätssicherungssystem vor. Eine Erweiterung dieses dreistufigen, aus Erstprüfung, Konformitätsprüfung und Identitätsprüfung bestehenden Sicherungssystems, um eine Freigabeprüfung auf der Baustelle wird empfohlen, um den Unterschieden zwischen dem Betonbau (Anlieferung des angemischten Flüssigbetons auf die Baustelle) und der Verfüllung von Erdwärmesonden (Anmischung des Trockenbaustoffs auf die Baustelle) Rechnung zu tragen.

Zur Unterstützung des vorgeschlagenen Vorgehens wurden von den Autoren Mindestangaben für ein Datenblatt für EWS-Verfüllbaustoffe erarbeitet. In diesem Datenblatt empfehlen die Autoren neben Basisangaben (z. B. Produktname, Zementart, Haltbarkeit) und Mischungsangaben (z. B. W/F-Verhältnis, Dosierung, genaue Angaben zur Anmischtechnik) auch die Spezifizierung von Prüfangaben für wesentliche Parameter der Suspensionen und ausgehärteten Baustoffe, wobei zwischen den Werten der Erstprüfung und den zulässigen Wertebereichen für die Freigabeprüfung auf der Baustelle unterschieden wird.

Es wird darauf hingewiesen, dass auf dem vorgeschlagenen Datenblatt neben der Referenzvariante auch weitere Alternativvarianten mit abweichenden Angaben zur Anmischung des Baustoffs spezifiziert werden können, um der je nach Baustoff ggf. stark ausgeprägten Abhängigkeit der Suspensionseigenschaften von der Anmischtechnik Rechnung zu tragen.

Für die Freigabeprüfungen auf der Baustelle wird die Bestimmung der folgenden Parameter empfohlen: Suspensionsdichte, Marsh-Zeit, Fließgrenze, Suspensionstemperatur sowie das Absetzmaß nach 1 Stunde. Um die Bestimmung des für die Verfüllqualität zentralen Parameters des Absetzmaßes im Zuge der ersten Freigabeprüfung einer Erdwärmesondenverfüllung zu ermöglichen, ist mindestens eine Stunde vor Beginn der Verfüllung Verfüllsuspension in derselben Art und Weise anzumischen wie beim späteren Verfüllvorgang. Für die bei einer EWS-Verfüllung nach der ersten Freigabeprüfung in bestimmten Intervallen wiederkehrend empfohlenen Freigabeprüfungen wird die Bestimmung des Absetzmaßes lediglich als Kontrollmessung und nicht als Freigabeprüfung vorgeschlagen, um die Ausführung eines kontinuierlichen Verfüllvorgangs sicherzustellen.

Details zu dem vorgeschlagenen Vorgehen und zu den empfohlenen Mindestangaben im Verfüllbaustoff-Datenblatt sind in Abschnitt 6.2 wiedergegeben.

7.6. Ausblick

Die Analyse der im Zusammenhang mit der Erstellung von Erdwärmesonden insbesondere in Baden-Württemberg aufgetretenen Schadensfälle zeigt, dass stockwerksübergreifende Bohrungen, die Grundwasserleiter unterschiedlicher Druckpotentiale verbinden und nicht durch eine adäquate Verfüllung abgedichtet werden, als besonders kritisch einzustufen sind (Grimm et al. 2014). Bei der Beantwortung offener Fragestellungen zum Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften von Verfüllbaustoffen und der Verfüllqualität sollte bei zukünftigen Untersuchungen folglich der Berücksichtigung des Einflusses von Grundwasserflüssen eine große Bedeutung beigemessen werden. Für alle rheologischen Eigenschaften gilt, dass die Festlegung von Zielwerten – auch die in der LQS EWS gemachten Angaben – auf Erfahrungswissen basiert.

Abgesicherte Kriterien für eine sichere, fehlerstellenfreie Verfüllung sind somit unbekannt und sollten dringend durch weitere Forschungsprojekte identifiziert werden. Dabei gilt es insbesondere von rein qualitativen Betrachtungen auf quantitative Bewertungen überzugehen.

Entsprechende Untersuchungen finden in dem vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg bewilligten Forschungsprojekt EWS-tech II statt und bauen direkt auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens EWS-tech auf.

Hierzu sind Weiterentwicklungen der in dem vorliegenden Forschungsvorhaben erstellten Technikums- und Realmaßstabsversuchsanlagen vorgesehen, um in diesen Versuchsaufbauten Grundwasserflüsse bei der Verfüllung realisieren zu können. Diese Untersuchungsaspekte wurden bei der Dimensionierung der in dem Forschungsvorhaben EWS-tech entwickelten und aufgebauten Realmaßstabsversuchsanlage bereits berücksichtigt. Außerdem sollen in dem Forschungsprojekt EWS-tech II in einer zusätzlichen Versuchsanlage (Bohrlochsimulator) Untersuchungen unter Berücksichtigung der Bohrlochgeometrie/ -rauigkeit durchgeführt werden, die den quantifizierten Zusammenhang zwischen Fehlerstellen und der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden herstellen können. Bei den im Forschungsprojekt EWS-tech II geplanten Versuchen sollen vier im Rahmen jenes Vorhabens neu zu entwickelnde, magnetisch dotierte Referenz-Verfüllbaustoffe mit möglichst unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften eingesetzt werden, um den Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften und der Verfüllqualität untersuchen und somit Kriterien für möglichst günstige Baustoffeigenschaften ableiten zu können. In Verbindung mit der Neuentwicklung der Referenz-Verfüllbaustoffe sind zudem intensive Untersuchungen an magnetisch dotierten Verfüllbaustoffen geplant, um daraus Mindestanforderungen an die Dotierung und an die zugehörigen Überwachungstechniken des Verfüllvorgangs sowie an Langzeitüberwachungstechniken abzuleiten.

Aus den genannten Untersuchungsaspekten sollen Anforderungskriterien an Erdwärmesondenverfüllbaustoffe abgeleitet und dann in einem Pflichtenheft zusammengeführt werden.

8. WISSENSTRANSFER

Neben diversen projektinternen Besprechungen inklusive eines zweitägigen Workshops erfolgt/e ein intensiver Austausch mit den betroffenen Behörden und Fachfirmen

- Von Solites organisierte und geleitete erste Veranstaltung zum Forschungsvorhaben EWS-tech am 15.11.2013 im Arbeitskreis „Baustoffe für Erdwärmesonden“ des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Vorstellung des Forschungsvorhabens durch die Projektpartner und Festlegung der durch die MPA Karlsruhe (KIT) zu untersuchenden Verfüllbaustoffe in Abstimmung mit den betroffenen Fachfirmen
- Austausch von AGW (KIT) und EIFER unter Einbezug von Solites und der MPA Karlsruhe (KIT) mit Fachfirmen zum Thema Dauerdurchströmungs- und Lagerungsversuche, um die gewählten Versuchsbedingungen abzusichern (09.01.2013)
- Austausch der MPA Karlsruhe (KIT) mit den betroffenen Fachfirmen unter Einbezug von AGW (KIT), EIFER und Solites am 27.01.2014 mit dem Ziel, den für die Laborversuche der MPA Karlsruhe (KIT) zu verwendenden Mischer zu definieren und die detaillierten Versuchsbedingungen für die Laborversuche der MPA Karlsruhe (KIT) festzulegen.
- Diverse Besprechungen der Projektpartner zur Aufarbeitung von Versuchsergebnissen mit betroffenen Herstellerfirmen (alle Projektpartner)
- Fachaustausch mit dem Bundesamt für Energie der Schweiz (Solites in Vertretung des Projektkonsortiums)
- Teilnahme am Arbeitskreis Qualitätssicherung für Erdwärmesonden des Landes Baden-Württemberg (Solites in Vertretung des Projektkonsortiums)
- Einbringung im Anhörungsverfahren zur Anpassung und Änderung der „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)“ des Landes Baden-Württemberg anlässlich der verbindlichen Einführung der automatischen Abdichtungsüberwachung (Solites)

Präsentationen/Veröffentlichungen:

- Jährliche Präsentation beim Statuskolloquium Umweltforschung Baden-Württemberg inklusive Erstellung eines Zwischenberichts (alle Projektpartner)
- 30.10.2013 (Solites in Vertretung des Projektkonsortiums): Vorstellung des Forschungsvorhabens EWS-tech bei der Dienstbesprechung Geothermie des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- 20./21.02.2014 (Solites, EIFER, MPA Karlsruhe): Vorstellung des Forschungsvorhabens EWS-tech mit Versuchsexponaten und einem Roll-up am Stand des Landesforschungszentrums Geothermie auf der Messe GeoTHERM
- 01.07.2014 (Solites, MPA Karlsruhe, EIFER/AGW): Präsentationen beim 13. Internationalen Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie (OTTI)

- 04.07.2014 (Solites): Präsentation beim Workshop „Geothermie in der Praxis“ an der TU München
- 30.09.2014 (alle Projektpartner): Vorstellung der Zwischenergebnisse des Forschungsvorhabens EWS-tech bei der kleinen Dienstbesprechung Geothermie des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- 02.11.2014 (Solites): Präsentation beim Geothermiekongress (DGK) 2014 des Bundesverbands Geothermie
- 14.11.2014 (Solites): Präsentation beim Praxisforum Erdwärme des Bundesverband Wärmepumpe (BWP)
- 02.12.2014 (alle Projektpartner): Präsentationen bei der Veranstaltung „Oberflächennahe Geothermie – Planung, Ausführung, Qualitätssicherung“ des Fortbildungsverbundes Boden und Altlasten Baden-Württemberg
- 05./06.03.2015 (Solites, EIFER, MPA Karlsruhe): Vorstellung des Forschungsvorhabens EWS-tech mit Versuchsexponaten und einem Roll-up am Stand des Landesforschungszentrums Geothermie auf der Messe GeoTHERM
- 06.03.2015 (Solites, MPA Karlsruhe (KIT)): Präsentation beim Kongress der Messe GeoTHERM
- 08./09.04.2015 (Solites): Präsentation beim „1st Workshop of Numerical Geothermal Simulation“ an der TU München
- 16./17.06.2015 (Solites, MPA Karlsruhe (KIT)): Präsentation beim 14. Internationalen Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie (OTTI)
- 27.06.2015 (Solites): Tag der offenen Tür am KIT mit Vor-Ort-Präsentation des Realmaßstabsversuchsgeländes und Präsentation des Forschungsvorhabens EWS-tech mit Hilfe einer Infoplane
- 23.07.2015 (Solites): Vorstellung des Forschungsvorhabens beim PetroTherm Seminar des Instituts für Angewandte Geowissenschaften (KIT)
- 22.08.2015 (Solites): Unterstützung eines Sonderbeitrags in der Sindelfinger Zeitung/Böblinger Zeitung zum Forschungsvorhaben EWS-tech (inkl. Webvideo; siehe: <http://www.szbz.de/nachrichten/sonstiges/geothermie-schaeden/akteure/forschung/>)
- 16.09.2015 (Solites): Präsentation beim Fachgespräch Erdwärmennutzung in Hessen
- 27.10.2015 (alle Projektpartner): Vorstellung der Zwischenergebnisse des Forschungsvorhabens EWS-tech bei der kleinen Dienstbesprechung Geothermie des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- 29.10.2015 (alle Projektpartner): Vorstellung des Forschungsvorhabens und der bisherigen Ergebnisse im Rahmen einer Sitzung des DVGW Personenkreises W 120-2
- 02.11.2015 (Solites): Präsentation beim Geothermiekongress (DGK) 2015 des Bundesverbands Geothermie
- 25./26.02.2016 (Solites, EIFER): Vorstellung des Forschungsvorhabens EWS-tech mit Versuchsexponaten und einem Roll-up am Stand des Landesforschungszentrums Geothermie auf der Messe GeoTHERM

- 26.02.2016 (Solites, EIFER, MPA Karlsruhe (KIT)): Präsentation beim Kongress der Messe GeoTHERM
- 17./18.04.2016 (Solites in Vertretung des Projektkonsortiums): Präsentation beim 15. Internationalen Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie (OTTI)

9. LITERATUR

- Anbergen, H. (2015): Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechselflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden, Dissertation, TU Darmstadt
- Anbergen, H.; Frank, J.; Albrecht, I.; Dittrich, H. (2011): Prüfwelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterial für EWS, bbr 10/2011, S.38 – 43
- Anbergen, H.; Frank, J.; Müller, L.; Sass, I. (2014): Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchanger Grouts: Impact on the Hydraulic Properties, Geotechnical Testing Journal, Vol. 37/4
- Atkins, P. W. (2001): Physikalische Chemie, Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- Beier, R. A.; Acuña, J.; Mogensen, P.; Palm, B. (2013): Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers, In: Applied Energy 102, 665-675
- Benedix, R. (2011): Bauchemie, 5. Auflage, ISBN-978-3-8348-1348-0, 541 S. (Vieweg+Teubner-Verlag)
- Beton (2014): Zement-Merkblatt Betontechnik B1, 42014, www.beton.org
- Blomberg, T.; Claesson, J.; Eskilson, P.; Hellström, G.; Sanner, B. (2008): EED 3.0 Earth Energy Designer, Benutzerhandbuch, Blocon Sweden, Lund (Schweden)
- Bollmann, K. (2000): Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen, Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, 197 S.
- Breit, W. (2004): Säurewiderstand von Beton. Betontechnische Berichte, In: Thielen (Hrsg.): Betontechnische Berichte 2001-2003: S. 181-189; Düsseldorf (Verlag Bau + Technik)
- Brookins, D.G. (1988): Eh-pH Diagrams for Geochemistry, 1. Auflage, ISBN-13:978-3-642-73095-5, 176 S., (Springer Verlag)
- Busch, K. F.; Luckner, I. (1973): Geohydrologik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Carlé, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. Wiss. Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart
- Clausen, H. (2008): Durchführung von Simulationsrechnungen zum Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die thermische Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden, Diplomarbeit, Institut für Gebäudeenergetik, Universität Stuttgart, Stuttgart
- DAfStb (2003): Sulfatangriff auf Beton – Stellungnahme des DAfStb.- PositDAfStbSulfatprob2003-04-11Deckers.doc
- DHI-WASY GmbH (2013): DHI-WASY Software FEFLOW 6.2 Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System – User Manual, Berlin

- Diersch, H.-J. (2014): Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Berlin (Springer Verlag)
- Diersch, H.-J. G.; Bauer, D.; Heidemann, W.; Rühaak, W.; Schätzl, P. (2010): Finite element formulation for borehole heat exchangers in modeling geothermal heating systems by FEFLOW, In: DHI-WASY GmbH (Hrsg.): FEFLOW White Papers Vol. V; Berlin
- DIN EN 196-2 (2013): Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN 206 (2014): Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN 206/A1 Entwurf (2015): Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Änderung A1, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN 1015-11 (2007): Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk- Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 1045-2 Entwurf (2014): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 4030-1 (2008): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 4030-2 (2008): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 2: Entnahme und Analyse von Wasser- und Bodenproben, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN ISO 7980 (2000): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Calcium und Magnesium - Verfahren mittels Absorptionsspektrometrie, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN ISO 10523 (2012): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung des pH-Werts (ISO 10523: 2008), Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN 13577 (2007): Chemischer Angriff an Beton – Bestimmung des Gehalts an angreifendem Kohlendioxid in Wasser, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 18129 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Kalkgehaltsbestimmung, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 18130-T1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitbeiwerts; Teil 1: Laborversuche, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 19682-13 (2009): Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 13: Bestimmung der Carbonate, der Sulfide, des pH-Wertes und der Eisen(III)-Ionen, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN 27888 (1993): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit, Berlin (Beuth Verlag)

- DIN 38 414-T4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 38 414-T6 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C), Berlin (Beuth Verlag)
- DIN 66133 (1993): Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN-Fachbericht CEN/TR 15697 (2008): Zement – Prüfung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich des Sulfatwiderstandes – Bericht zum Stand der Technik, Berlin (Beuth Verlag)
- Dullien, F. A. L. (1992): Porous media - Fluid transport and pore structure, 2. Aufl., XX + 574 S.; San Diego (Academic Press, INC.)
- DVWK (1992): Regeln zur Wasserwirtschaft: Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau 128: 36 S., Hamburg (Parey Verlag)
- Ebert, H.-P. et al. (2000): Optimierung von Erdwärmesonden, Abschlussbericht zum DBU-Vorhaben AZ 17013, München
- Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde (2015): Informationen aus den Bund/Ländergruppen der Staatlichen Geologischen Dienste, Personenkreis „Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde“ der Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie, Bund/Länderausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer (SGD)
- EWS-tech (2015): Zwischenbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-tech (Weiterentwicklung des Erdwärmesonden-Technologie), Autoren: Riegger, M.; Rolker, J.; Stober, I.; Steger, H.; Haist, M.; Eckhardt, J.-D.; Schlager, P.; Zemann, M.; Zorn, R.; Huttenloch, P.; Stuttgart, Karlsruhe
- Frank, J. et al. (2011): Prü fzelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterialien für EWS, in: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Ausgabe 10/2011, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn
- Franke, L. (1996): Korrosion von Zementstein in sauren Wässern, 4. Internationales Kolloquium, Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzung, Technische Akademie Esslingen
- Gehlin, S. (2002): Thermal Response Test – Method Development and Evaluation, Dissertation; Luleå University

- Grimm, M.; Stober, I.; Kohl, T.; Blum, P. (2014): Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg, In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, DOI 10.1007/s00767-014-0269-1
- Grube, H.; Rechenberg, W. (1987): Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer, In: beton 37, Heft 11 und 12, Verlag Bau + Technik.
- Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S. (2001): Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin
- Gutberlet, T.; Hilbig, H.; Beddoe, R.E. (2015): Acid attack on hydrated cement – Effect of mineral acids on the degradation process, Cement and Concrete Research, 74: 35-43 S.
- Haist, M. (2009): Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, KIT Scientific Publishing
- Haus, R. (1993): Mikrogefügeänderungen toniger Böden nach Kohlenwasserstoffkontamination und Tensideinsatz. XV + 193 S.; Karlsruhe (Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe)
- Haus, R. (2002): Elektrokinetische Bodensanierung. XXII + 214 S. Bd.65; Karlsruhe (Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe)
- Hellström, G. (1991): Ground heat storage: Thermal Analyses of duct storage systems, ISBN 91-628-0290-9, Dissertation, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Lund (Schweden)
- Herrmann, V. (2008): Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden, Dissertation, Universität Karlsruhe, Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, KIT Scientific Publishing
- Hölting, B.; Coldewey, W.; G. (2013): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, Berlin Heidelberg (Springer-Verlag)
- ISO 4316 (1977): Grenzflächenaktive Stoffe, Bestimmung des pH-Wertes wäßriger Lösungen, Potentiometermethode.
- ISO 7150-1 (1984): Wasserqualität. Physikalische, chemische und biochemische Verfahren. Bestimmung von Ammonium: manuelles Spektrometerverfahren. British Standards Institution
- Maier, J. (2016): Oberflächennahe Geothermie: Vergleich von 2-U-Erdwärmesonden und Koaxial-Erdwärmesonden (Bewertung von Wirtschaftlichkeit und Effizienz unter Einbeziehung des Einsatzes verschiedener Verfüllmaterialien), Masterarbeit, Solites/Wissenschaftszentrum Straubing, Stuttgart, voraussichtliche Veröffentlichung 2016

- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2011): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS), Stand 07.10.2011
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2012): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS), Stand 01.07.2012
- Müller, L. (2009): Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden, In: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Ausgabe 07-08/2009, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn
- Niederbrucker, R.; Steinbacher, N. (2007): Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden, Amt der oberösterreichischen Landesregierung, Linz
- Jasmund, J. (1993): Bildung und Umbildung von Tonmineralen. In: Jasmund, J.; Lagaly, G. [Hrsg.]: Tonminerale und Tone: 168-192, Darmstadt (Steinkopff Verlag)
- Knoblauch, H.; Schneider, U. (2013): Bauchemie. 7. Aufl.: XIV + 449 S.; Köln (Werner Verlag)
- Koenig, A.; Dehn, F. (2015): Main considerations for the determination and evaluation of the acid resistance of cementitious materials. Materials and Structures, DOI 10.16117/s11527-015-0605-7
- König, H. (2010): Untersuchungen zur Kinetik grundlegender Reaktionsschritte bei der Hydratation von Portland- und Hochofenzementen. Dissertation, Technische Universität München, Lehrbereich Anorganische Chemie - Lehrstuhl für Bauchemie, 155 S.
- Koenigsdorff, R. et. al (2016): Abschlussbericht zu dem Verbundvorhaben: Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden
- Krauss, H. (2000): Quecksilberporosimetrie toniger Sedimente und Einfluss der Porengröße auf die Elektroosmose. 70 S.; Karlsruhe (unveröff. Dipl. Arb.)
- Lagaly, G. (1993): Reaktionen der Tonminerale. In: Jasmund, J.; Lagaly, G. [Hrsg.]: Tonminerale und Tone: 89-158; Darmstadt (Steinkopff Verlag)
- Locher, F. W.; Sprung, S. (1975): Die Beständigkeit von Beton gegenüber kalklösender Kohlensäure, In: Beton 25, Heft 7, Düsseldorf (Verlag Bau + Technik)
- Lohaus, L.; Petersen, L. (2007): Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand für den Kühlturbau. Beton-Informationen, 5/6: 71-79 S.; Düsseldorf (Verlag Bau + Technik)
- Lipus, K.; Puntke, S. (2004): Sulfatwiderstand unterschiedlich zusammengesetzter Betone. In: Thielen, G. [Hrsg.]: Betontechnische Berichte 2001-2003: 169-180 S., www.vdz-online.de, (Verlag Bau + Technik)
- Mangold, D.; Miedaner, O.; Primoudi Tziggili E.; Schmidt, T.; Unterberger, M.; Zeh, B. (2012): Technisch-Wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607N, Stuttgart

- Mineralienatlas: <https://www.mineralienatlas.de/> (letzter Zugriff: 22.11.2015)
- Mulenga, D.M. (2002): Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumasitbildung. 184 S., Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, dissertation.de
- Müllauer W. (2013): Mechanismen des Sulfatangriffs auf Beton – Phasenneubildungen und Expansionsdrücke in Mörteln unter Na_2SO_4 Belastung. Dissertation, Technische Universität München, 156 S.
- Parrott, J. E.; Stuckes, A. D. (1975): Thermal conductivity of soils, 157 S., London (Pion)
- Reuß, M.; Kuckelkorn, J. (2011): Systemdichtheit von Erdwärmesonden, Otti-Symposium Oberflächennahe Geothermie, Regensburg
- Riedel, E. (1990): Anorganische Chemie, 2. Aufl., XV + 849 S.; Berlin (Walter de Gruyter Verlag)
- Riegger, M. (2013): Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technik), Stuttgart
- Riegger, M. (2016): Entwicklung, Überprüfung und Anwendung eines neuen Mess- und Auswertverfahrens zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Erdwärmesonden, Dissertation, Stuttgart (in Vorbereitung)
- Rolker, J.; Riegger, M. (2015): Thermal-performance comparison of 2-U and coaxial borehole heat exchangers, 1st Workshop on Numerical Geothermal Simulation, Technische Universität München
- Santhanam, M.; Cohen, M. D.; Olek, J. (2002): Mechanism of sulfate attack: A fresh look – Part 1: Summary of experimental results, Cement and Concrete Research, 32: 915-921
- Santhanam, M.; Cohen, M. D.; Olek, J. (2003): Mechanism of sulfate attack: A fresh look – Part 2: Proposed mechanisms, Cement and Concrete Research, 33: 341-346.
- Stark, J.; Wicht, B. (2013): Dauerhaftigkeit von Beton, 2. Auflage, ISBN 978-3-642-35277-5, 479 S. (Springer Vieweg Verlag)
- Steger, H. (2005): Elektrokinetische In-situ-Sanierung LCKW-kontaminierter gering durchlässiger Lockergesteine, Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
- Stutzman, P.E.; Brown, R.H.; Good, M.L. (1996): Guide for X-Ray Powder Diffraction Analysis of Portland Cement and Clinker, NISTIR 5755, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburgh, MD 20899, 38 S.
- Thienel, K.-Ch. (2011): Werkstoffe des Bauwesens, Dauerhaftigkeit von Beton – Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- VDI Wärmeatlas (2005): 10. Auflage, VDI e.V., Heidelberg Berlin (Springer Vieweg Verlag)

- Webb, P. A.; Orr, C. (1997): Analytical methods in fine particle technology. XVII + 301 S.; Norcross (Micromeretics Instrument Corporation).
- Wilhelm, S. (2008): Wasseraufbereitung – Chemie und chemische Verfahrenstechnik, Berlin Heidelberg (Springer-Verlag)
- Ulusay, R.; Erguler, Z.A. (2012): Needle penetration test: Evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks, Engineering Geology, 149 – 150.
- Ulusay, R.; Aydan, Ö.; Erguler, Z.A.; Ngan-Tillard, D.J.M.; Seiki, T.; Verwaal, W.; Sasaki, Y.; Sato, A. (2013): ISRM Suggested Method for the Needle Penetration Test, In: The ISRM Suggested Methods for the Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014, Wien (Springer-Verlag)
- United States Environmental Protection Agency (EPA): EPA Method 9038: Sulfate (Turbidimetric).
- Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Hooton, R.D. (2015): Test methods for resistance of concrete to sulfate attack – a critical review (Chapter 10), In: Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments, Eds: Alexander, M., Bertron, A., De Belie, N., State-of-the-Art report RILEM TC211-PAE, Springer Verlag
- VDI 4640 Blatt 2 (Entwurf) (2015): Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. VDI Handbuch Energietechnik – VDI-Handbuch Wärme-/Heiztechnik; VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU)
- VDZ-Tätigkeitsbericht 2003-2005; Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie; Kapitel 4: Umweltverträglichkeit von Zement und Beton, 128-137
- Verein Deutscher Zementwerke (2002): Zement-Taschenbuch, 50. Ausgabe, ISBN 3-7640-427-4, 844 S., Herausgeber: Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf (Verlag Bau + Technik)
- Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung -TrinkwV 2001), Ausfertigungsdatum: 21.05.2001, 41 S.
- Wisotzky, F. (2011): Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrochemische Modellierung – Grundlagen, Anwendungen und Problemlösung, Berlin Heidelberg (Springer-Verlag)
- ZAE Bayern (2012): Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren, Abschlussbericht FKZ 0327453A, 579 S
- Zervantonakis, I.K.; Reuß, M. (2006): Quality requirements of a thermal response test, Ecstock Conference Proceedings, Pomona, New Jersey (USA)

10. ANHANG

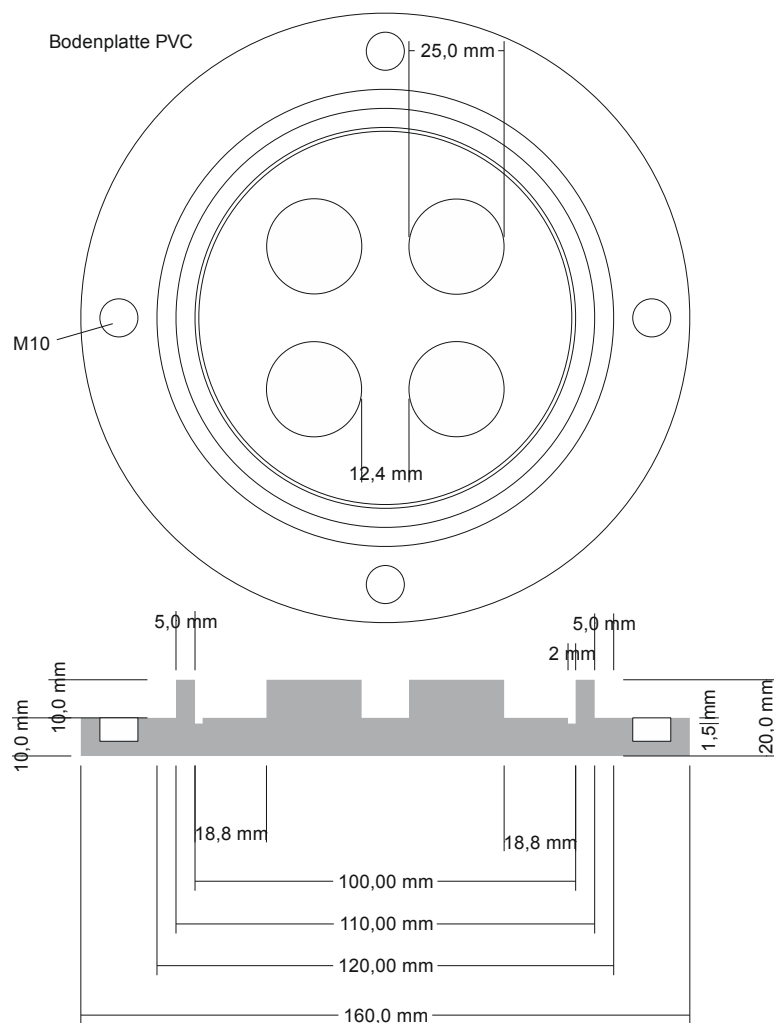
10.1. Anhang MPA Karlsruhe (KIT)

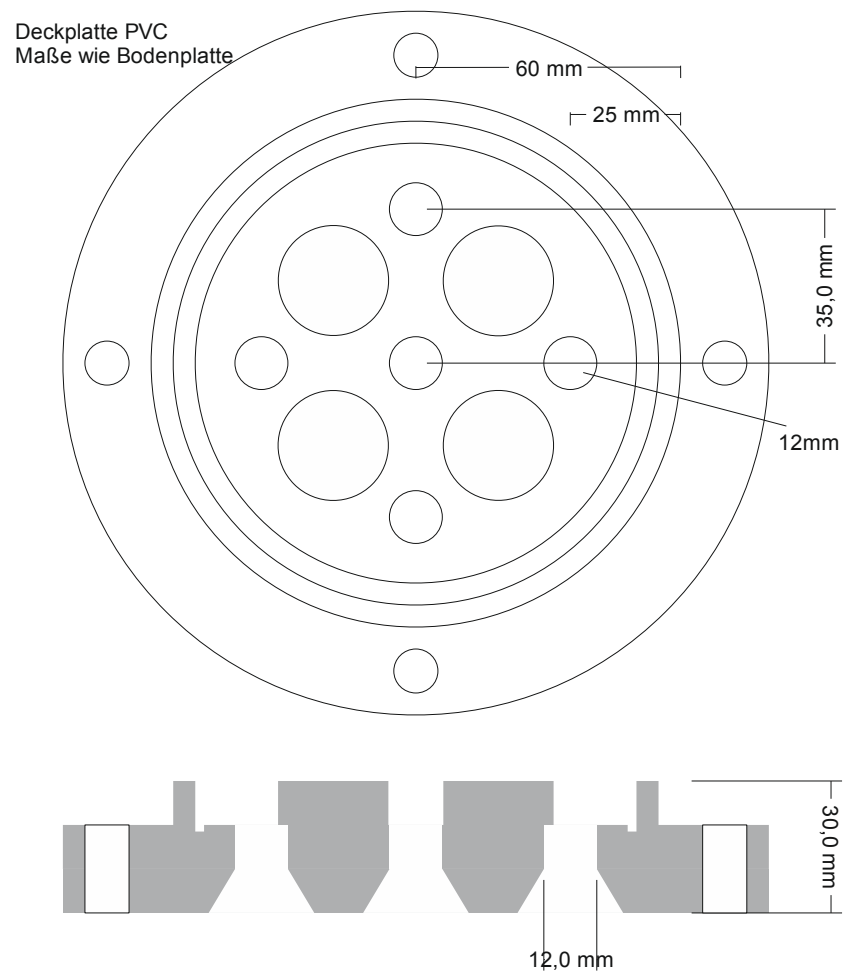
Aufgrund des großen Umfangs wird auf einen Abdruck der Laborergebnisse der MPA Karlsruhe verzichtet. Auf Wunsch können die Daten digital zur Verfügung gestellt werden.

10.2. Anhang AGW (KIT), EIFER

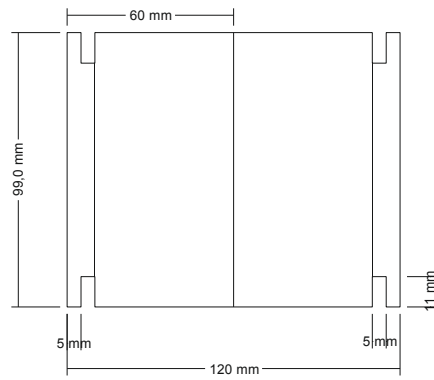
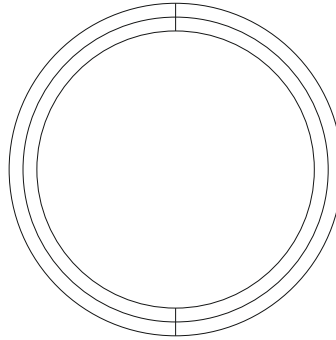
Technische Zeichnung der entwickelten Versuchsanlage:

Anhang 1: Technische Zeichnung der Vorrichtung zur Probenkörperpräparation der Proben für die Systemdurchlässigkeitsversuche

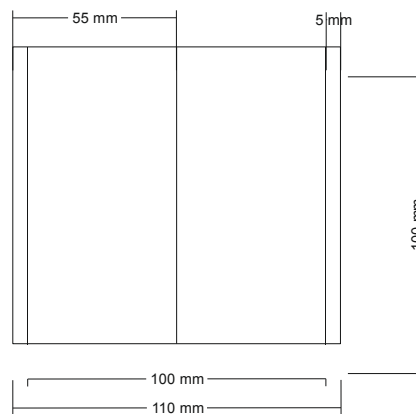
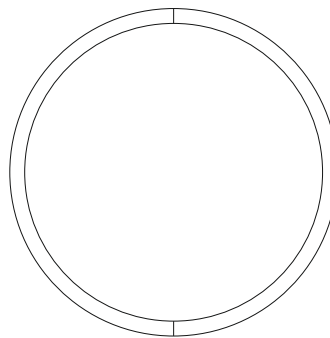




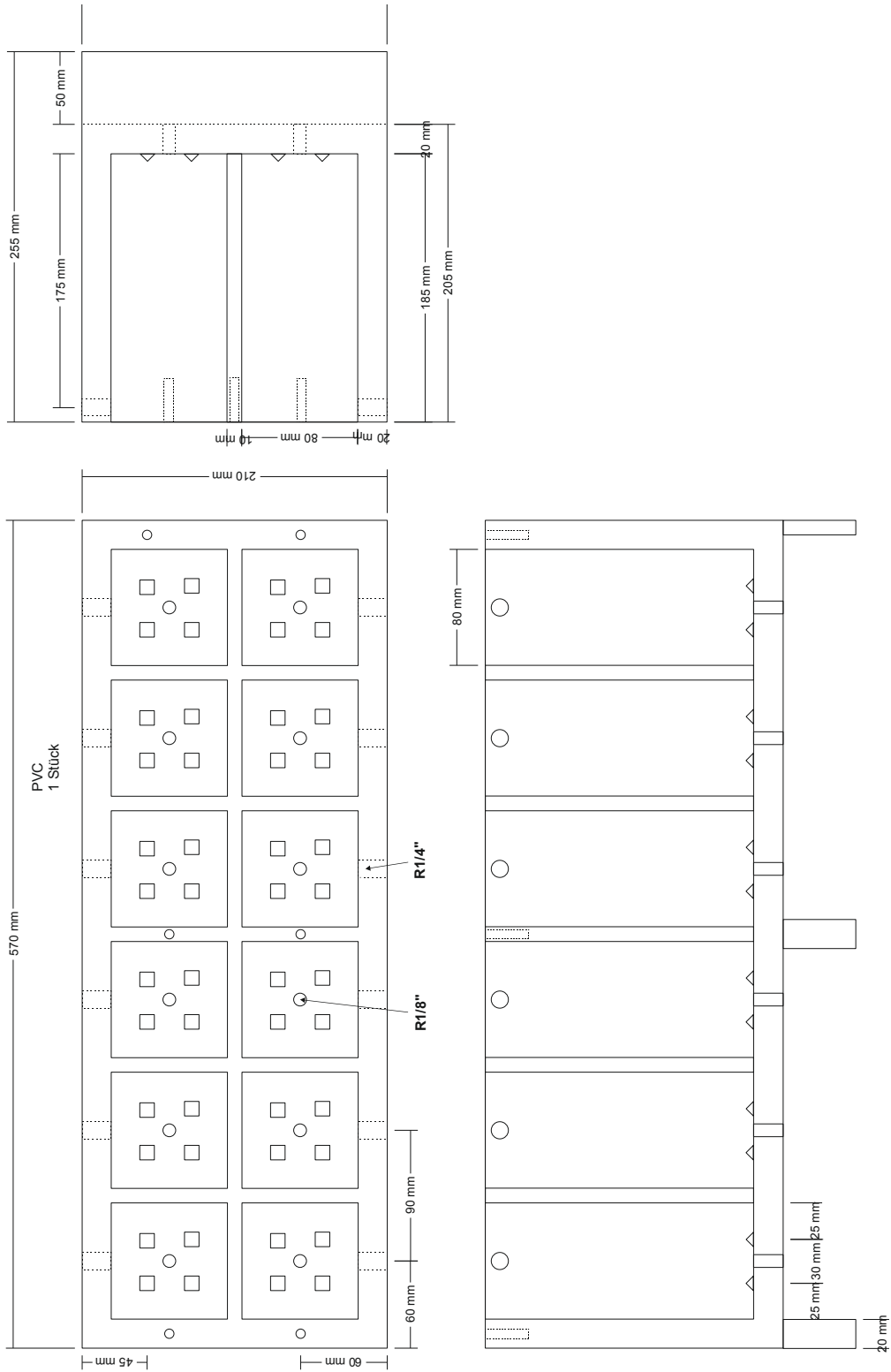
2 Halbschalen aus PVC



2 Halbschalen aus PVC



Anhang 2: Technische Zeichnung des Umströmungsversuchs



Daten der Wärmeleitfähigkeitsmessungen:

Anhang 3: Messwerte der Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe 01, 07, 13 und 16 in Abhängigkeit von der Zeit und den verwendeten Wässern bei Raumtemperatur (21 °C)

Material	Baustoff 01				
angesetzt mit	Leitungswasser	Dest. Wasser	S1	S2	S3
λ (7 Tage) [W/mK]	1,04	1,05	1,04	1,07	1,01
λ (14 Tage) [W/mK]	1,04	1,06	1,08	1,07	1,02
λ (21 Tage) [W/mK]	1,03	1,06	1,04	0,98	1,01
λ (28 Tage) [W/mK]	1,06	1,06	1,02	1,03	1,02
λ (35 Tage) [W/mK]			1,03	1,04	1,03
Material	Baustoff 07				
angesetzt mit	Leitungswasser	Dest. Wasser	S1	S2	S3
λ (7 Tage) [W/mK]	2,29	2,28	2,12	2,11	2,13
λ (14 Tage) [W/mK]	2,31	2,25	1,90	2,07	2,11
λ (21 Tage) [W/mK]	2,25	2,24	1,62	1,92	1,73
λ (28 Tage) [W/mK]	2,27	2,21	1,57	1,71	1,68
λ (35 Tage) [W/mK]			1,57	1,69	1,75
Material	Baustoff 13				
angesetzt mit	Leitungswasser	Dest. Wasser	Typ S1	Typ S2	Typ S3
λ (7 Tage) [W/mK]	2,22	2,83	2,98	2,45	2,76
λ (14 Tage) [W/mK]	2,26	2,88	2,84	2,57	2,82
λ (21 Tage) [W/mK]	2,26	2,87	2,88	2,23	2,61
λ (28 Tage) [W/mK]	2,20	2,87	2,84	2,22	2,67
λ (35 Tage) [W/mK]			2,84	2,10	2,61
Material	Baustoff 16				
angesetzt mit	Leitungswasser	Dest. Wasser	S1	S2	S3
λ (7 Tage) [W/mK]	1,12	1,15	1,46	1,42	1,31
λ (14 Tage) [W/mK]	1,11	1,13	1,52	1,46	1,27
λ (21 Tage) [W/mK]	1,11	1,14	1,39	1,40	1,26
λ (28 Tage) [W/mK]	1,12	1,12	1,32	1,36	1,25
λ (35 Tage) [W/mK]			1,43	1,40	1,34
Baustoff 13 Typ S2 war Messoberfläche nicht 100% eben					

Anhang 4: Messwerte der Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe 02, 03, 04, 05, 06, 08, 09, 11, 12, 14, und 15 in Abhängigkeit von der Zeit bei Raumtemperatur (21 °C)

Baustoff	Sonde	Messbereich	7 d λ [W/mK]	14 d λ [W/mK]	21 d λ [W/mK]	28 d λ [W/mK]
2	8120040	0,3-2,0	0,83	0,83	0,82	0,82
3	8120040	0,3-2,0	0,98	0,97	0,96	0,99
4	8120040	0,3-2,0	0,99	0,99	1,00	1,01
5	8120040	0,3-2,0	0,93	0,92	0,90	0,92
6	8120040	0,3-2,0	0,90	0,91	0,89	0,88
8	1212001	0,3-2,0	1,80	1,81	1,84	1,85
9	8120040	0,3-2,0	1,57	1,41	1,41	1,36
10						
11	5130021	2,0-6,0	2,15	2,14	2,10	2,11
12	8120040	0,3-2,0	1,32	1,34	1,28	1,31
14	5130021	2,0-6,0	2,17	2,26	2,23	2,10
15	5130021	2,0-6,0	2,08	2,06	2,08	2,10

Daten der Batchversuche:

Wässrige Lösungen:

Die Rohdaten aller durchgeführten Batchversuche (hydratisierte und nicht hydratisierte Proben für die Wässer des Typs S1-3 und Leitungswasser Karlsruhe) befinden sich aufgrund ihres Umfangs auf der beigefügten Daten-CD.

XRD-Analyse nicht hydratisierter und hydratisierter Batchversuche (Feststoff):

Die vollständig ausgewerteten der in Kapitel 3.2.4.4.2 beschriebenen Röntgendiffraktogramme befinden sich aufgrund ihres Umfangs auf der beigefügten Daten-CD.

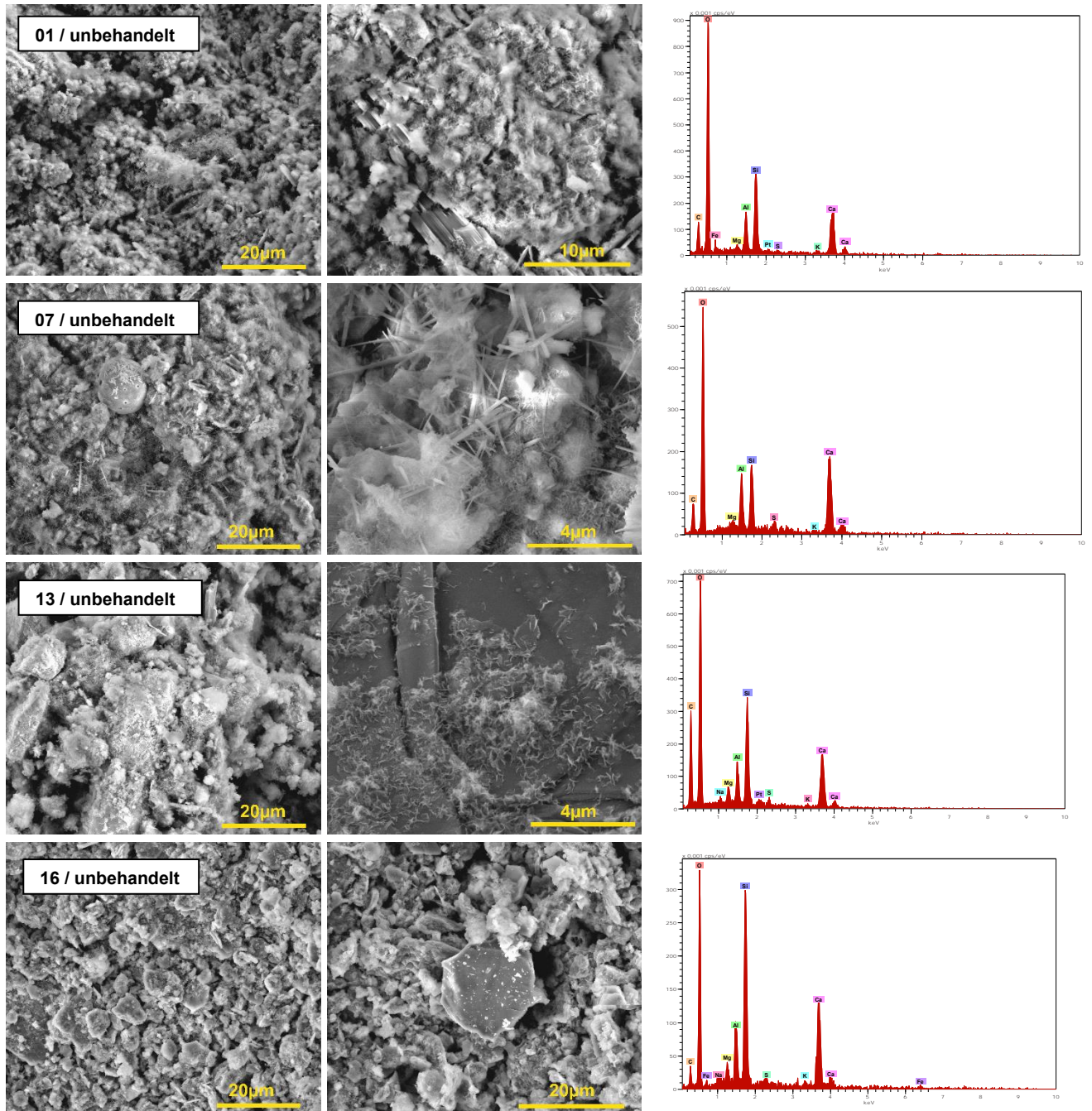
REM/EDX hydratisierter Batchproben (Feststoff):

REM/EDX Analysen für

- Übersichtsaufnahmen für die Reaktionslösung S3
- Versuche mit Wasser des Typs S1

befinden sich auf der beigefügten Daten-CD

Anhang 5: REM-Aufnahmen der hydratisierten, nicht mit Reaktionslösung versetzten Proben der Materialien 01, 07, 13 und 16 und ausgewählte EDX-Spektren (rechts) (Kommentar: diese Proben wurden nicht als Pulverproben gemessen; kleine Probestücke)

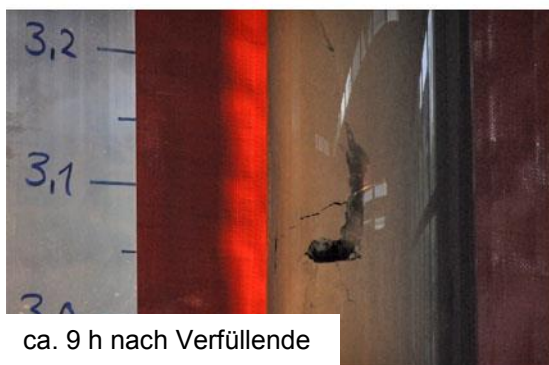
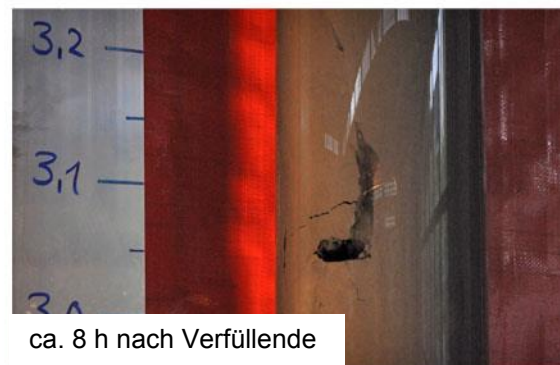
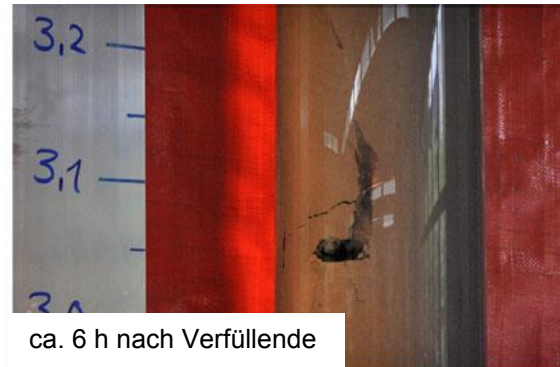


Anhang 6: Minimal- und Maximalwerte der elektrochemischen Parameter während der Versuchsdauer von 56 d => Hydratisierte Proben

Material / Wasser	pH		El. LF [mS/cm]		Eh [mV] (Ref.: Ag/AgCl)	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
01						
LW	12,85	13,27	3,67	7,68	-68	-32
S1	12,68	13,35	8,53	11,42	-65	-49
S2	12,6	13,21	5,85	7,93	-39	-71
S3	12,49	13,16	4,66	6,14	-27	-66
07						
LW	11,28	12,81	0,92	2,98	-115	-32
S1	11,68	13,08	4,93	7,89	-167	-44
S2	11,46	12,97	2,2	4,85	-96	-33
S3	10,63	12,49	1,78	4,32	-115	-16
13						
LW	11,47	12,6	1,23	3,91	-558	-109
S1	11,68	12,93	4,93	7,11	-588	-126
S2	10,13	12,38	2,57	3,81	-588	-93
S3	10,11	12,24	2,45	3,45	-582	-71
16						
LW	12,31	12,99	2,4	4,76	-45	-15
S1	12,46	13,27	6,27	10,45	-56	-25
S2	11,47	12,82	3,61	5,23	-60	-2
S3	10,95	12,75	2,75	4,28	-63	-2
Zusammen- fassung	pH-Werte steigen auf Werte bis ± 13 Hinweis auf Fort-setzung des Hydratationsprozesses		Alle Materialien zeigen in der entsprechenden Lö- sung eine Zunahme der el. Leitfähigkeit		negatives Redoxpotential signifikant für Material 13 => Unterdruck in Fla- schen, ausgeprägter H ₂ S-Geruch!	

10.3. Anhang Solites

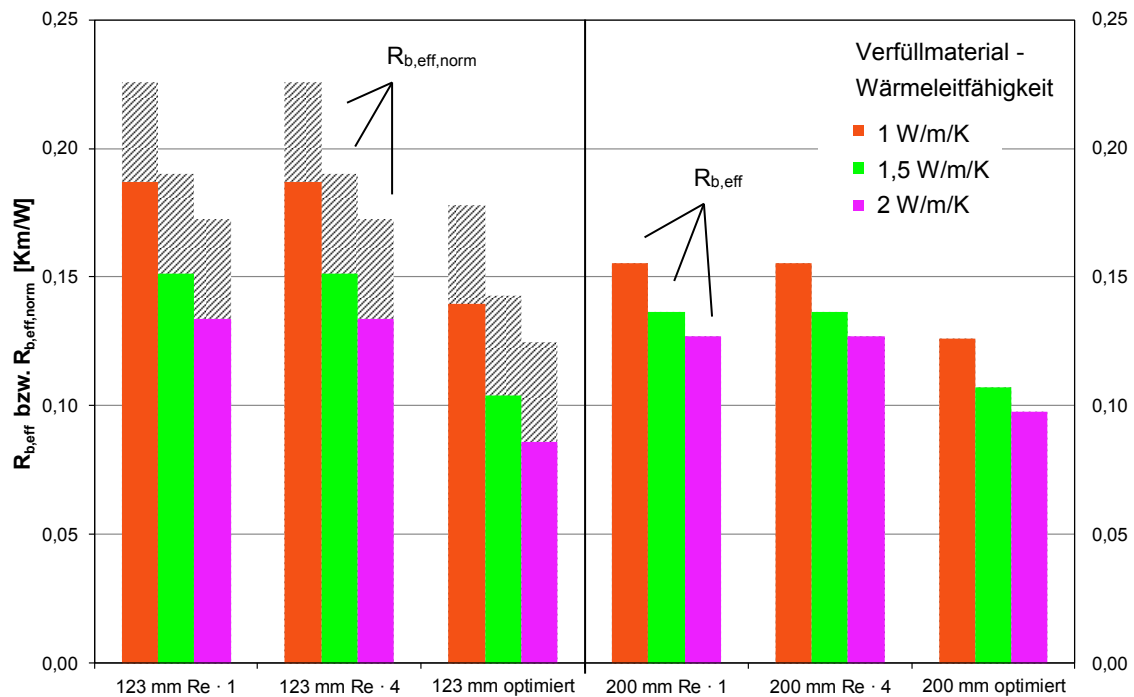
Anhang 7: Langzeitdokumentation des Aushärtevorgangs von EWS 8-3



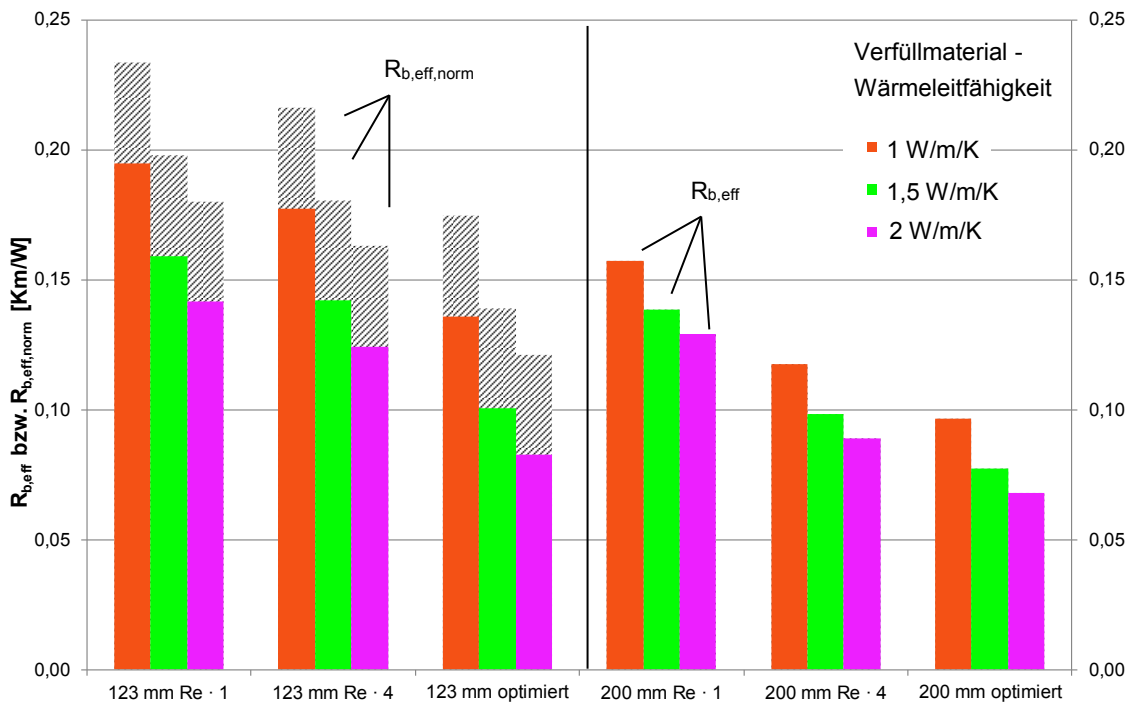
Anhang 8: Fehlstelle von EWS 8-3 im ausgehärtetem Zustand nach einer Aushärtezeit von ca. 9 Wochen



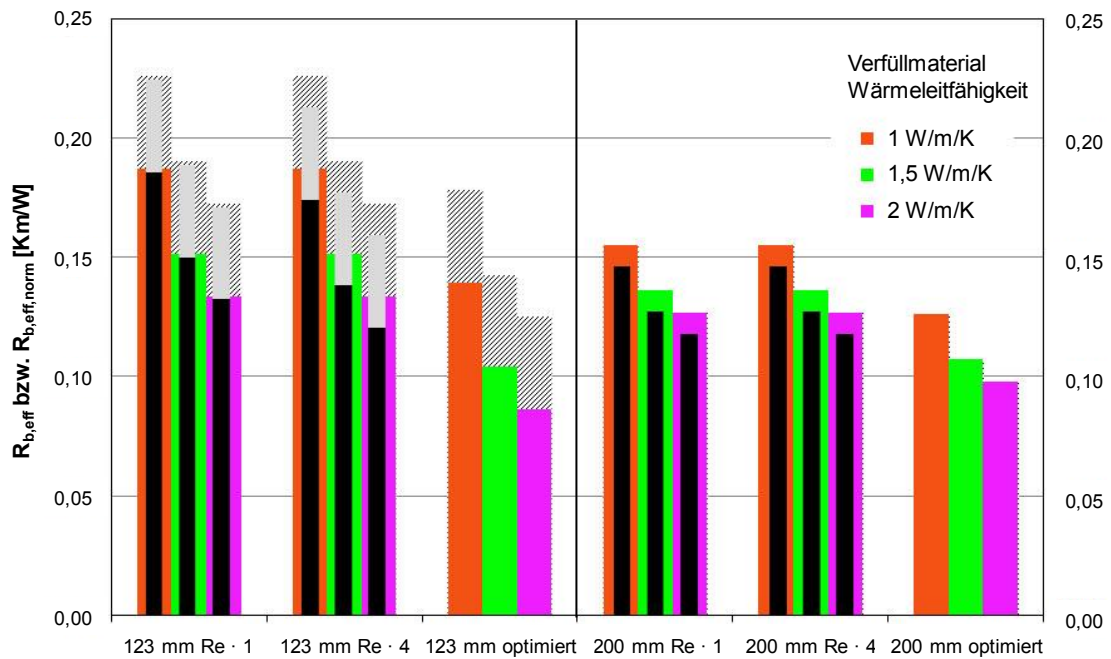
Anhang 9: Vergleich verschiedener 30 m tiefer Koaxial-EWS. Linke Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ (gestrichelte Balken) für die kleine Koax-EWS mit einem Bohrllochdurchmesser von 123 mm. Rechte Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ für die große Koaxial-EWS mit einem Bohrllochdurchmesser von 200 mm. Bei der optimierten Koaxial-EWS („123 mm optimiert“ bzw. „200 mm optimiert“) wurde für die Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres $\lambda = 0,1 \text{ W/m/K}$ und für das Außenrohr $\lambda = 1,0 \text{ W/m/K}$ angesetzt. Zusätzlich ist bei diesen Varianten die Reynoldszahl im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr um den Faktor 4 erhöht. Sämtliche Konfigurationen wurden für drei unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Verfüllmaterials betrachtet (1 W/m/K, 1,5 W/m/K und 2 W/m/K)



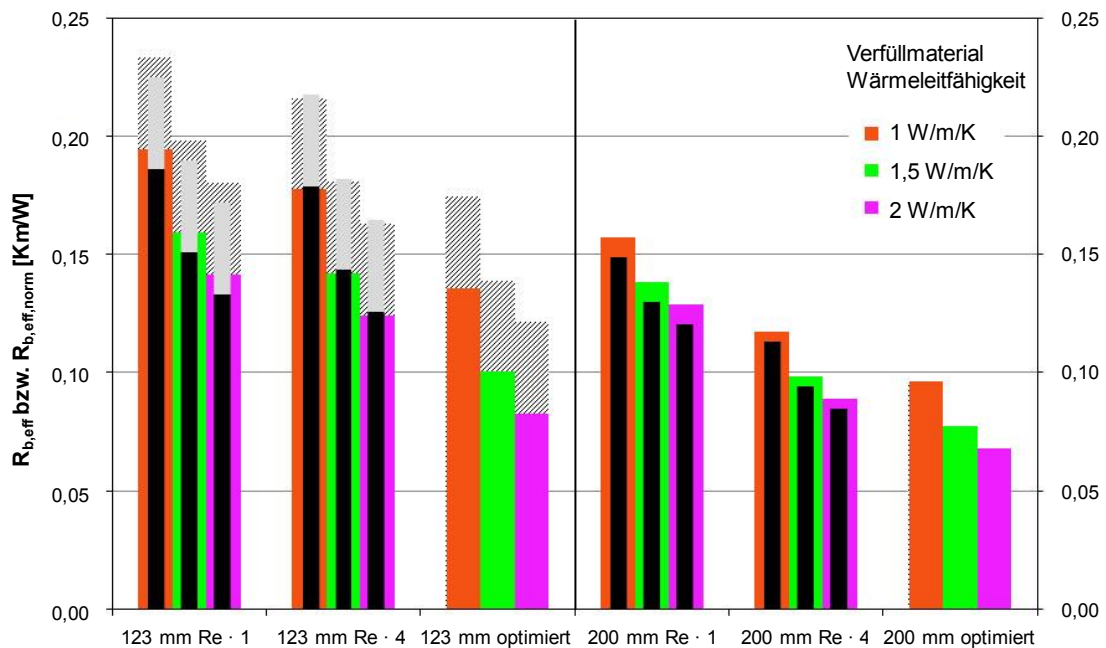
Anhang 10: Vergleich verschiedener 100 m tiefer Koaxial-EWS. Linke Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ (gestrichelte Balken) für die kleine Koaxial-EWS mit einem Bohrllochdurchmesser von 123 mm. Rechte Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ für die große Koaxial-EWS mit einem Bohrllochdurchmesser von 200 mm. Bei der optimierten Koaxial-EWS („123 mm optimiert“ bzw. „200 mm optimiert“) wurde für die Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres $\lambda = 0,1 \text{ W/m/K}$ und für das Außenrohr $\lambda = 1,0 \text{ W/m/K}$ angesetzt. Zusätzlich ist bei diesen Varianten die Reynoldszahl im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr um den Faktor 4 erhöht. Sämtliche Konfigurationen wurden für drei unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Verfüllmaterials betrachtet (1 W/m/K, 1,5 W/m/K und 2 W/m/K)



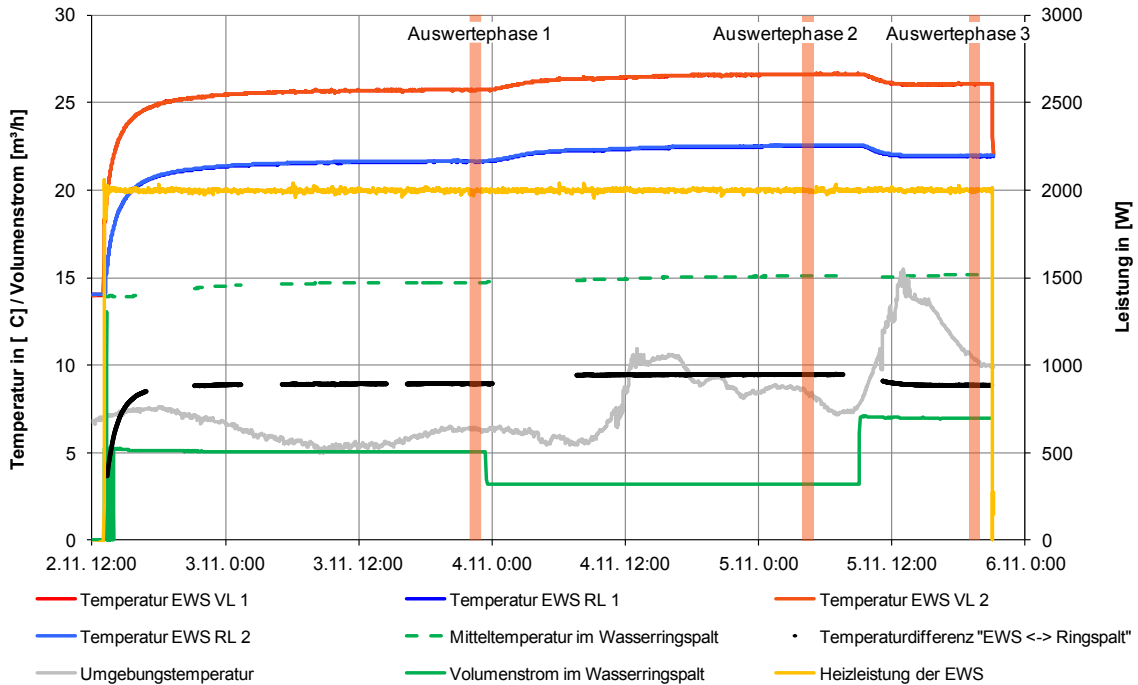
Anhang 11: Vergleich verschiedener 30 m tiefer Koaxial-EWS mit unterschiedlichen Wärmeträgermedien. Farbige Balken: Wasser-Glykol-Gemisch; Schwarze Balken: Wasser. Linke Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ (gestrichelte bzw. graue Balken) für die kleine Koaxial-EWS mit einem Bohrlochdurchmesser von 123 mm. Rechte Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ für die große Koaxial-EWS mit einem Bohrlochdurchmesser von 200 mm. Bei der optimierten Koaxial-EWS („123 mm optimiert“ bzw. „200 mm optimiert“) wurde für die Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres $\lambda = 0,1 \text{ W/m/K}$ und für das Außenrohr $\lambda = 1,0 \text{ W/m/K}$ angesetzt. Zusätzlich ist bei diesen Varianten die Reynoldszahl im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr um den Faktor 4 erhöht. Sämtliche Konfigurationen wurden für drei unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Verfüllmaterials betrachtet (1 W/m/K, 1,5 W/m/K und 2 W/m/K)



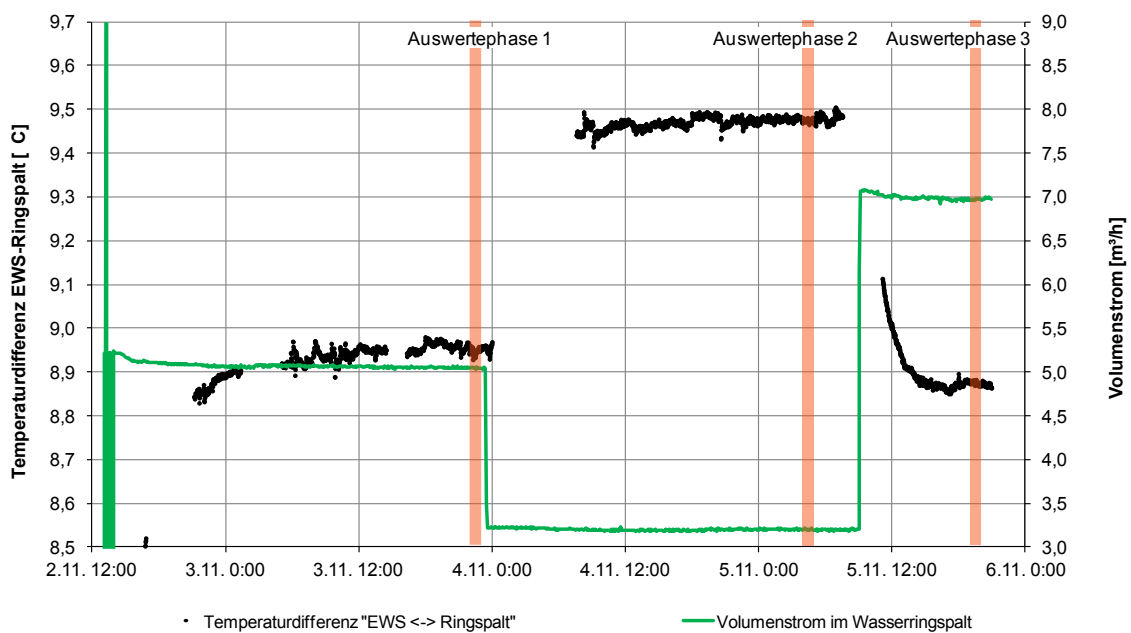
Anhang 12: Vergleich verschiedener 100 m tiefer Koaxial-EWS mit unterschiedlichen Wärmeträgermedien. Farbige Balken: Wasser-Glykol-Gemisch; Schwarze Balken: Wasser. Linke Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ (gestrichelte bzw. graue Balken) für die kleine Koaxial-EWS mit einem Bohrlochdurchmesser von 123 mm. Rechte Hälfte: $R_{b,eff}$ und $R_{b,eff,norm}$ für die große Koaxial-EWS mit einem Bohrlochdurchmesser von 200 mm. Bei der optimierten Koaxial-EWS („123 mm optimiert“ bzw. „200 mm optimiert“) wurde für die Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres $\lambda = 0,1 \text{ W/m/K}$ und für das Außenrohr $\lambda = 1,0 \text{ W/m/K}$ angesetzt. Zusätzlich ist bei diesen Varianten die Reynoldszahl im Außenring zwischen Innen- und Außenrohr um den Faktor 4 erhöht. Sämtliche Konfigurationen wurden für drei unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Verfüllmaterials betrachtet (1 W/m/K, 1,5 W/m/K und 2 W/m/K)



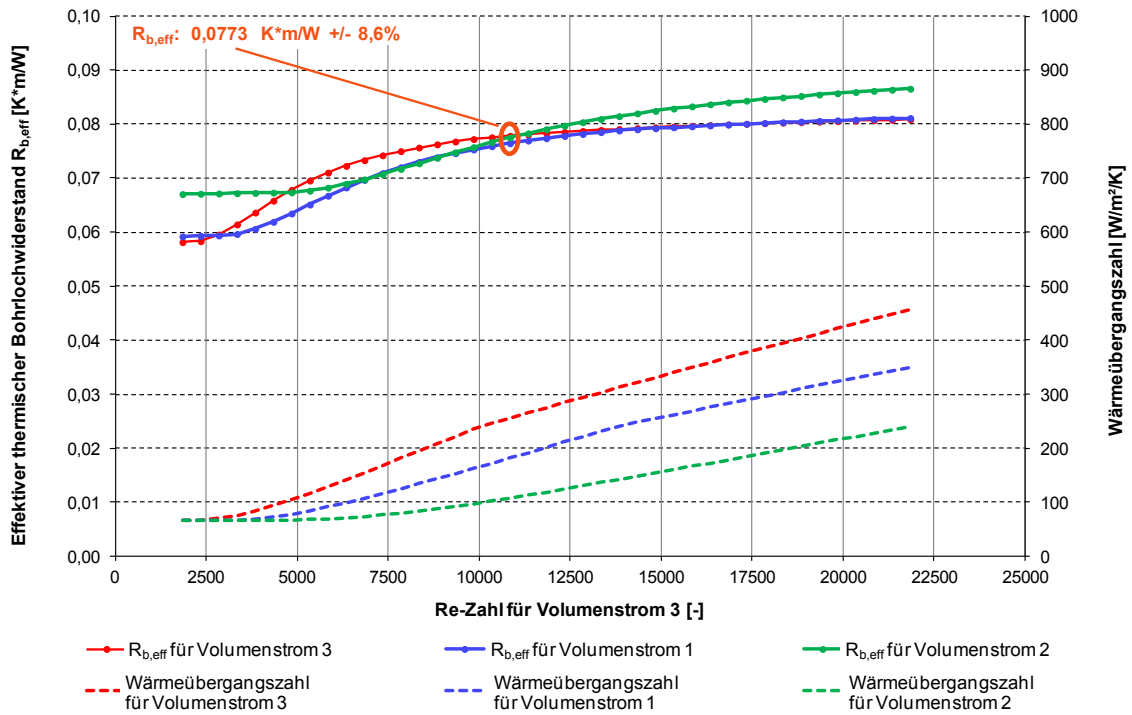
Anhang 13: Verlauf der wesentlichen Messdaten des Versuchs an EWS 3-O zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands



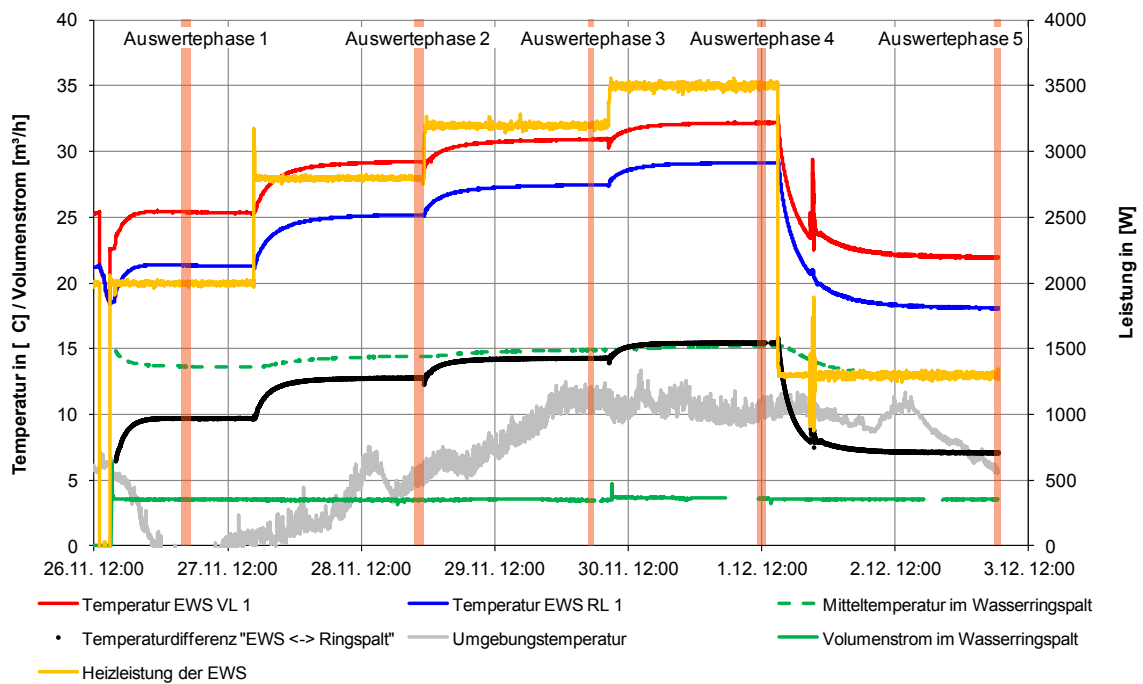
Anhang 14: Detaildarstellung der Temperaturdifferenz zwischen der arithmetischen EWS-Fluidmitteltemperatur und der Temperatur im Wasserringspalt bei der Messung zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von EWS 3-0



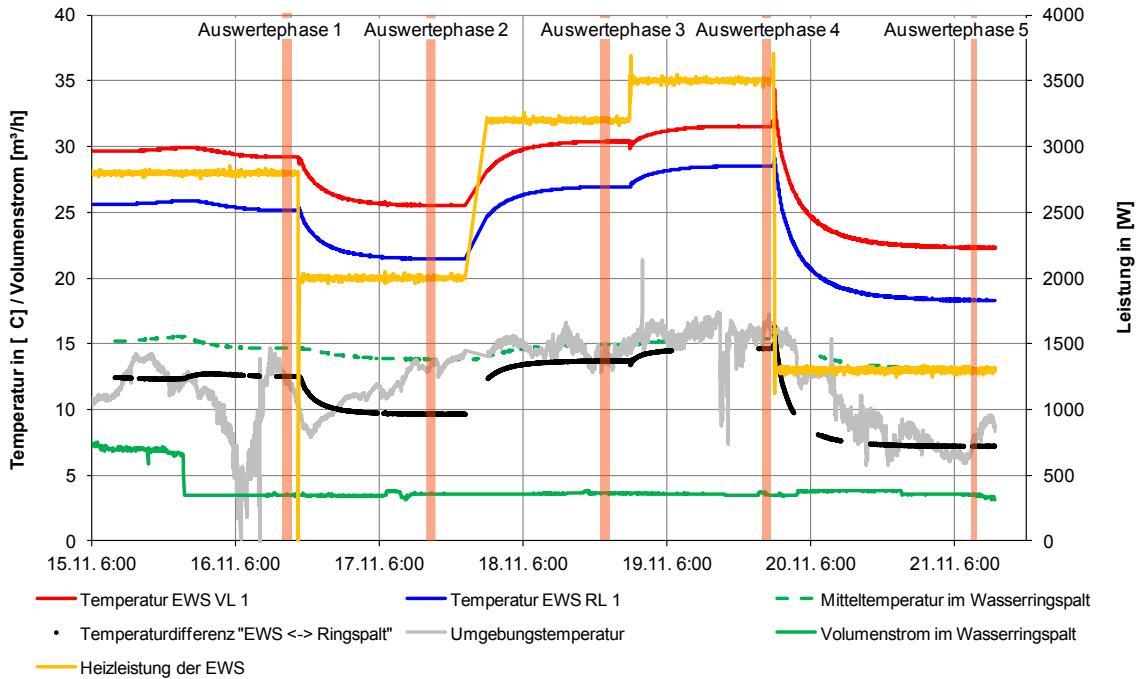
Anhang 15: Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands $R_{b,eff}$ von EWS 3-0 durch fiktive Erhöhung der Re-Zahlen im Wasserringspalt



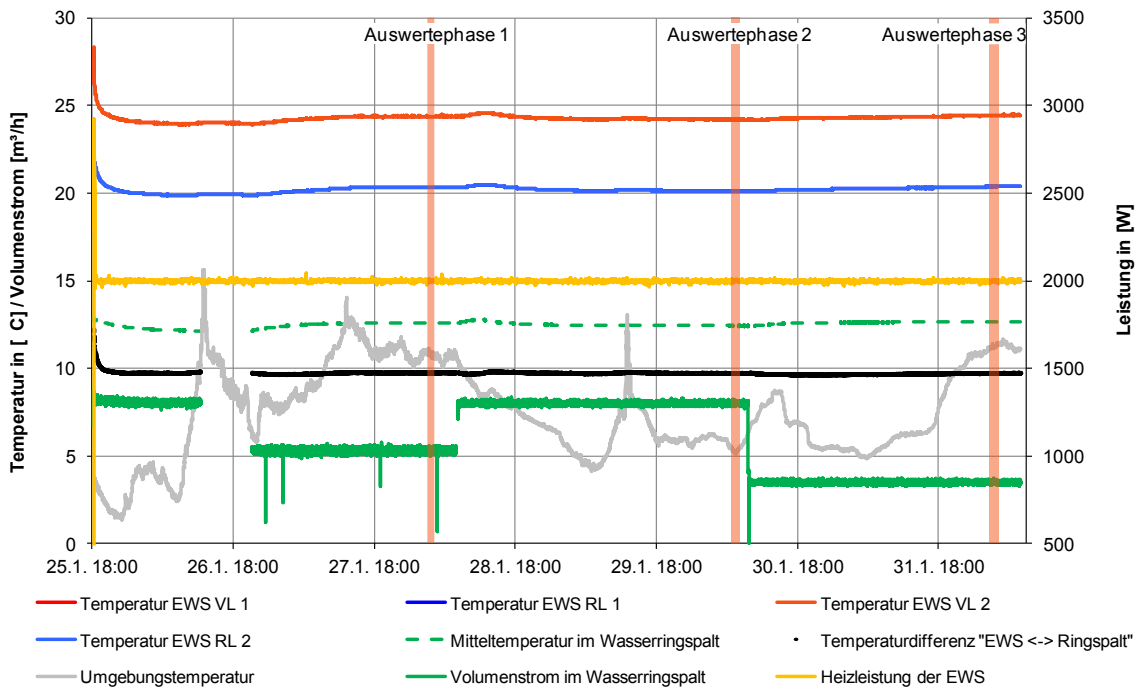
Anhang 16: Verlauf der wesentlichen Messdaten des Versuchs an EWS 4-W ohne Verwirbler zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands



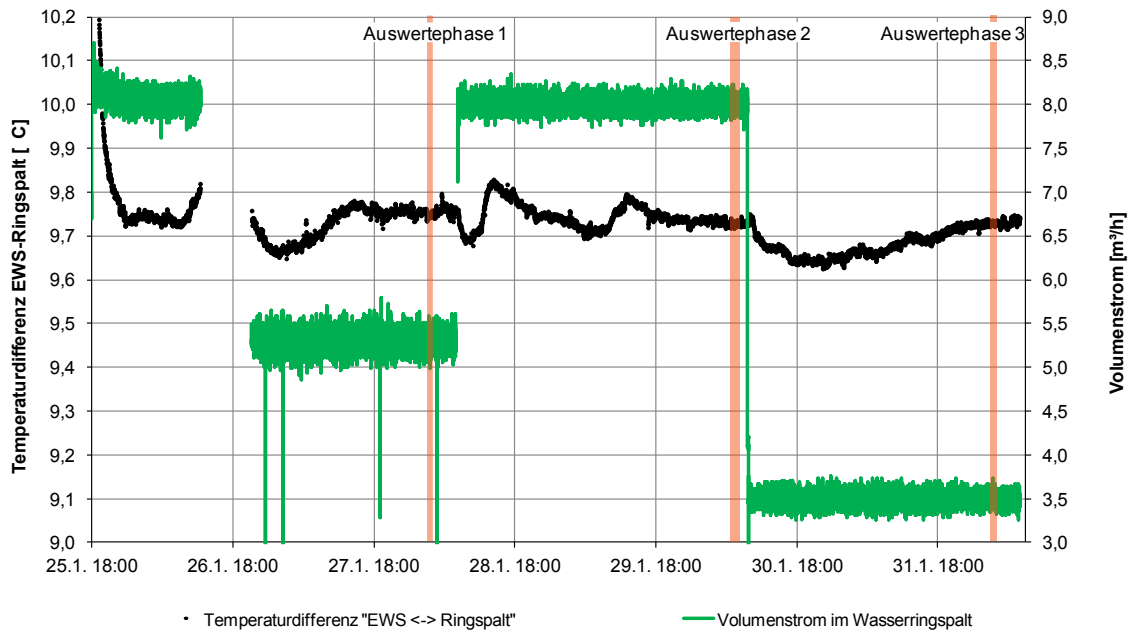
Anhang 17: Verlauf der wesentlichen Messdaten des Versuchs an EWS 4-W mit Verwirblern zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands



Anhang 18: Verlauf der wesentlichen Messdaten des Versuchs an EWS 8-W zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands



Anhang 19: Detaildarstellung der Temperaturdifferenz zwischen der arithmetischen EWS-Fluidmitteltemperatur und der Temperatur im Wasserringspalt bei der Messung zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von EWS 8-W



10.4. Allgemeiner Anhang

Anhang 20: Einfluss verschiedener Baustellenanmischtechniken und Randbedingungen auf die Suspensionseigenschaften von Verfüllbaustoff 07 neu

	W/F-Verhältnis	Nachmischzeit	Suspensionsentnahme	Dichte	Suspensionstemperatur	Marsh-Zeit Restauslaufzeit	Absetzmaß nach ca. 24 Stunden**	Filterpresse	Fließgrenze Kugelhafte
Durchlaufmischer	eingestellt zur Erreichung der Suspensionsdichte nach Datenblatt	-	aus Verpressleitung direkt nach dem Mischer	1,95 kg/l 1,93 kg/l	9 °C	291 s unendlich	1,5%	56 ml 4 min 25 s 55 mm	30,74 N/m ² (Kugel Nr. 7)
		-	nach langer Verpressleitung (20 m Mörtelschlauch DN 25 + 50 m PE-Schlauch 32 x 2,9 mm)	1,95 kg/l 1,92 kg/l	9 °C	218 s 195 s	0,5%	56 ml 7,5 min 60 mm	
Silomischer	eingestellt zur Erreichung der Suspensionsdichte nach Datenblatt	-	aus Verpressleitung direkt nach dem Mischer (während Realmaßstabsversuch EWS 7-O)	1,98 kg/l 1,95 kg/l	8,6 °C	401 s unendlich	0,0%	50 ml 7,5 min 47 mm	50,74 N/m ² (Kugel Nr. 9)
		-	aus Verpressleitung direkt nach dem Mischer (während Realmaßstabsversuch EWS 8-W)	1,96 kg/l 1,96 kg/l	8,1 °C	288 s 281 s	0,5%	44 ml 7,5 min 45 mm	41,09 N/m ² (Kugel Nr. 8)
		-	nach langer Verpressleitung (20 m Mörtelschlauch DN 25 + 50 m PE-Schlauch 32 x 2,9 mm)	1,91 kg/l 1,88 kg/l	9,8 °C	180 s 182 s	0,5%		
Kolloidalmischer	nach Datenblatt	0 s	aus Vorratsbehälter des Mixers	1,95 kg/l 1,92 kg/l	10,8 °C	102 s 96 s	0,5%	80 ml * 34 min * 55 mm *	41,09 N/m ² (Kugel Nr. 8)
			aus Verpressleitung direkt nach dem Mischer	1,93 kg/l 1,91 kg/l	10,8 °C	79 s 70 s	0,0%		
			nach langer Verpressleitung (20 m Mörtelschlauch DN 25 + 50 m PE-Schlauch 32 x 2,9 mm)	1,96 kg/l 1,93 kg/l	10,8 °C	90 s 90 s	0,0%		
		90 s	aus Vorratsbehälter des Mixers	1,96 kg/l 1,93 kg/l	12 °C	148 s 180 s	0,0%	48 ml 7,5 min 45 mm	59,29 N/m ² (Kugel Nr. 10)
			aus Verpressleitung direkt nach dem Mischer	1,97 kg/l 1,93 kg/l	12 °C	176 s 208 s	0,0%		
			nach langer Verpressleitung (20 m Mörtelschlauch DN 25 + 50 m PE-Schlauch 32 x 2,9 mm)	1,97 kg/l 1,93 kg/l	12 °C	164 s 202 s	0,0%		

1. Wert: Filtratwassermenge
2. Wert: Versuchszeit
3. Wert: Filterkuchenhöhe

1. Dichtewert: Spülungswaage
2. Dichtewert: Aräometer

*: Werte auf Grund der versehentlichen Versuchsdauer von 34 min nicht für
**: gemessen in 1 Liter Zylinder mit hoher Form

Anhang 21: Einfluss verschiedener Laboranmischtechniken und Randbedingungen auf die Suspensionseigenschaften von Verfüllbaustoff 07 neu

Bezeichnung	W/F-Verhältnis	Mischzeit	Drehzahl	Beschreibung	Dichte	Suspensions-temperatur	Marsh-Zeit Restauslaufzeit	Absetzmaß nach ca. 24 Stunden	Filter- presse	Fließgrenze Kugelhafte
IKA RE 24 mit IKA R 1300 Dissolverrührer (d = 80 mm) (für EWS-tech Laborversuche verwendeter Mischer, s. Abschnitt 3.1)	LA 1a	5 min	650 U/min	EWS-tech Standardverfahren (s. Abschnitt 3.1.4.2.1)	1,92 kg/l	22,1 °C	85 s	0,8 % (250 ml Glas)	53,1 ml 7,5 min	31,03 N/m ²
	LA 1b	5 min	1400 U/min	max. mögliche Drehzahl des Mixers	1,93 kg/l	22 °C	92 s	0 % (250 ml Glas)	42,16 ml 7,5 min	41,09 N/m ²
drehzahleigbarer Labormischer mit IKA R 1302 Dissolverrührer oder ähnlich (d = 80 mm) (für EWS-tech Laborversuche verwendeter Mischer, s. Abschnitt 3.2)	LA 2a	5 min	650 U/min	EWS-tech Standardverfahren (s. Abschnitt 3.1.4.2.1)	1,96 kg/l 1,93 kg/l	20,7 °C	90 s 86 s	1,2 % (250 ml PP)	-	30,74 N/m ² (Kugel Nr. 7)
	LA 2b	5 min	1400 U/min	entspricht max. möglicher Drehzahl von IKA RE 24	1,97 kg/l 1,95 kg/l	20,8 °C	122 s 144 s	0 % (250 ml PP)	-	59,29 N/m ² (Kugel Nr. 10)
	LA 2c	5 min	2000 U/min	Umfangsgeschwindigkeit entspricht ca. derjenigen von LA 3 und LA 4 c	1,98 kg/l 1,95 kg/l	21,2 °C	147 s unendlich	0 % (250 ml PP)	-	nicht messbar mit vorhandenem Kugelsatz
IKA Ultra-Turax T50 mit IKA R 50 Rührwelle "high speed" mit Dissolverscheibe R1402 (d = 42 mm)	LA 3	5 min	3500 U/min	vom Hersteller des Verfüllbaustoffs "VM 07 neu" angewandtes Standardverfahren	1,93 kg/l	nicht gemessen	94 s nicht gemessen	< 1 % (1000 ml PP)	24 ml 7,5 min	50,74 N/m ² (Kugel Nr. 9)
	LA 4a	5 min	1250 U/min	Umfangsgeschwindigkeit entspricht ca. derjenigen von LA 1a und LA 2a (Kommentar: Anhaftung im Behälter, zwischenzeitlich händisch gerührt)	1,92 kg/l	18 °C	104 s nicht gemessen	2 % (500 ml PP)	50 ml 75 s	42 N/m ² (Kugel Nr. 8)
IKA Eurostar power control- visc 6000 mit IKA R1402 Dissolver (d = 42 mm)	LA 4b	5 min	2500 U/min	Drehzahl zwischen derjenigen von LA 4a und LA 4c	1,94 kg/l	19 °C	103 s nicht gemessen	1 % (500 ml PP)	48 ml 6,5 min	52 N/m ² (Kugel Nr. 9)
	LA 4c	7,5 min	3750 U/min	Standardverfahren Fa. ESIOMConsulting	1,93 kg/l	20 °C	102 s nicht gemessen	< 1 % (500 ml PP)	29 ml 7,5 min	> 70 N/m ² (Kugel > Nr. 10)

*: LA = Laboranmischung

1. Wert: Spülungswaage

2. Wert: Aräometer

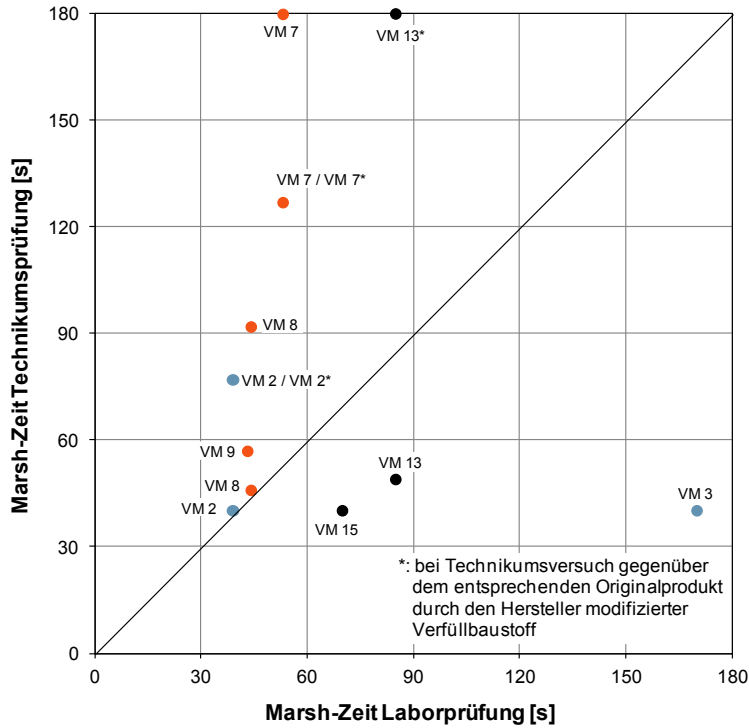
bei lediglich einer Messung: Präzisionswaage

1. Wert: Filtratwassermenge

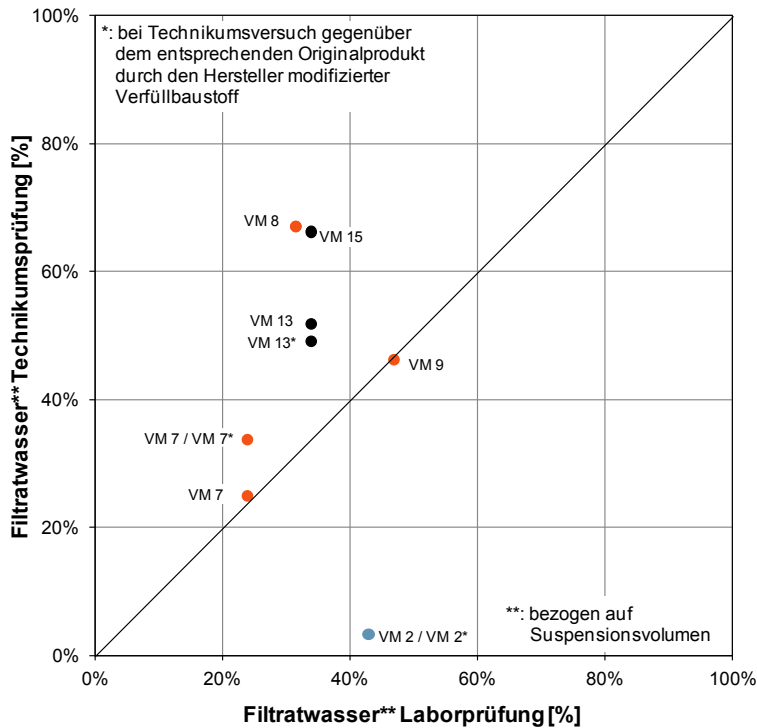
2. Wert: Versuchszeit

3. Wert: Filterkuchenhöhe

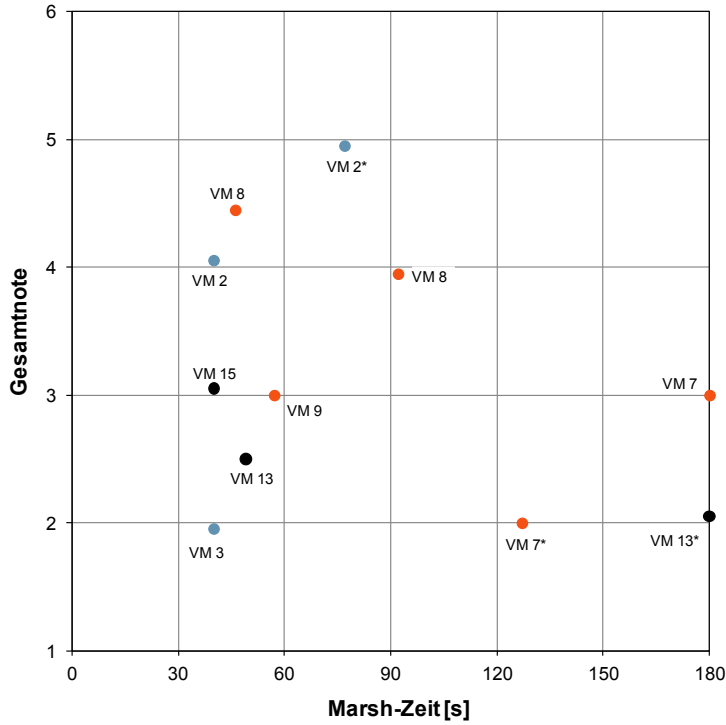
Anhang 22: Vergleich der ermittelten Marsh-Zeit bei den Technikums- bzw. Laborversuchen



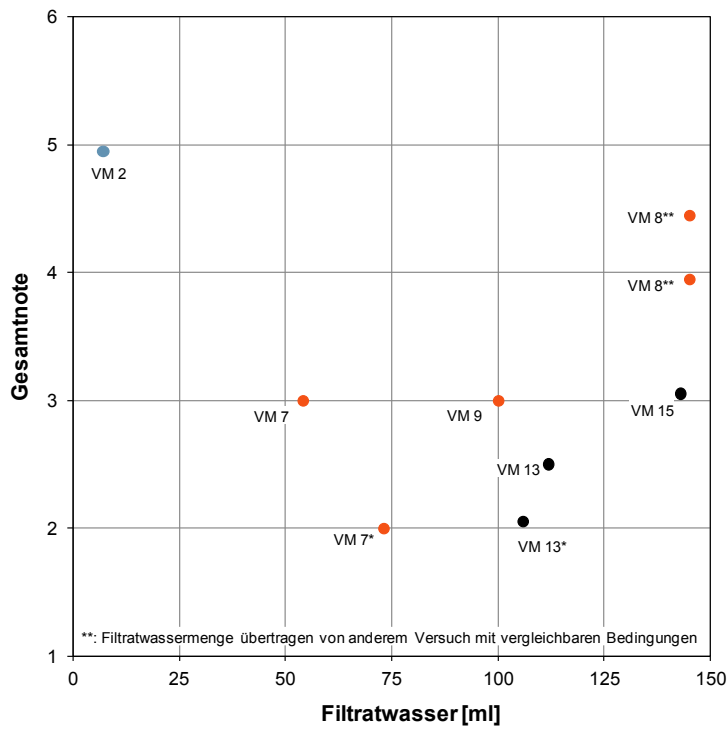
Anhang 23: Vergleich der ermittelten Filtratwassermenge bei den Technikums- bzw. Laborversuchen



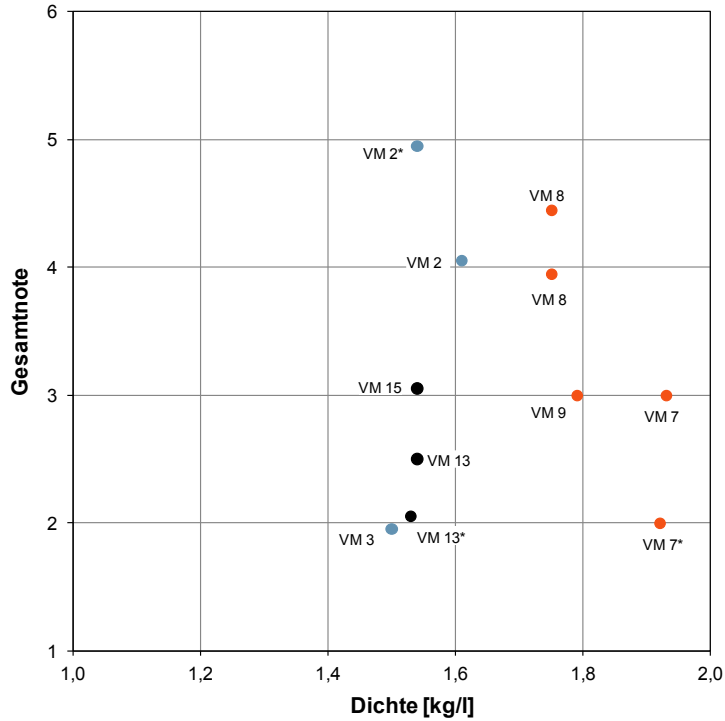
Anhang 24: Technikum, Gesamtnote vs. Marshzeit



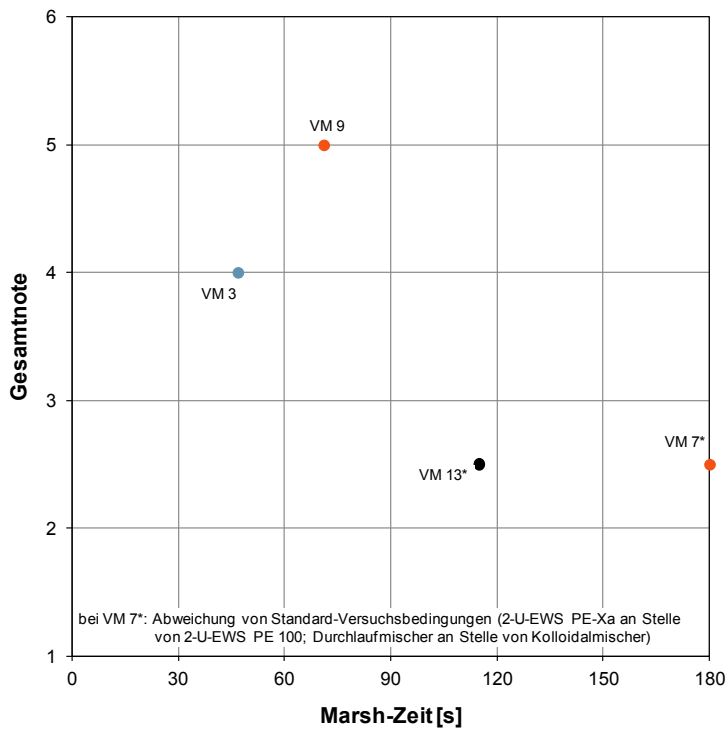
Anhang 25: Technikum, Gesamtnote vs. Filtratwasser



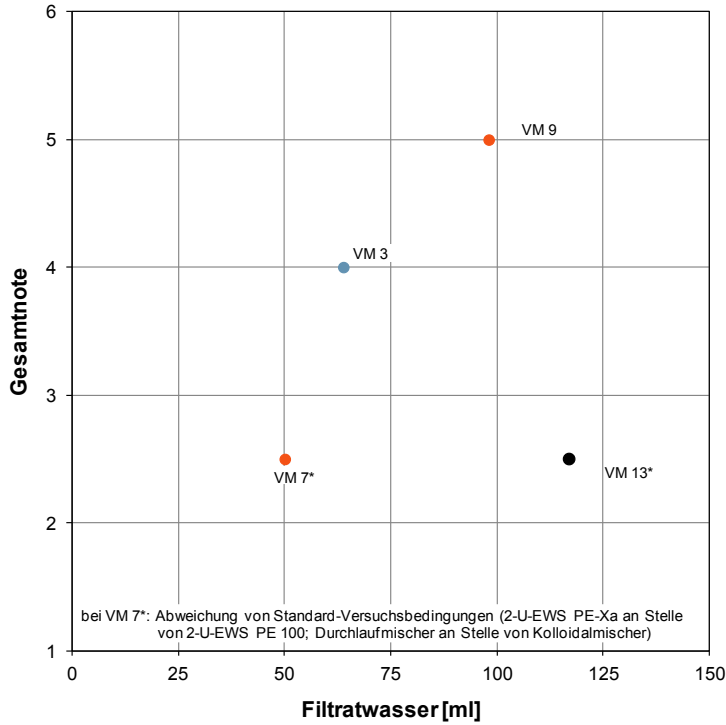
Anhang 26: Technikum, Gesamtnote vs. Dichte



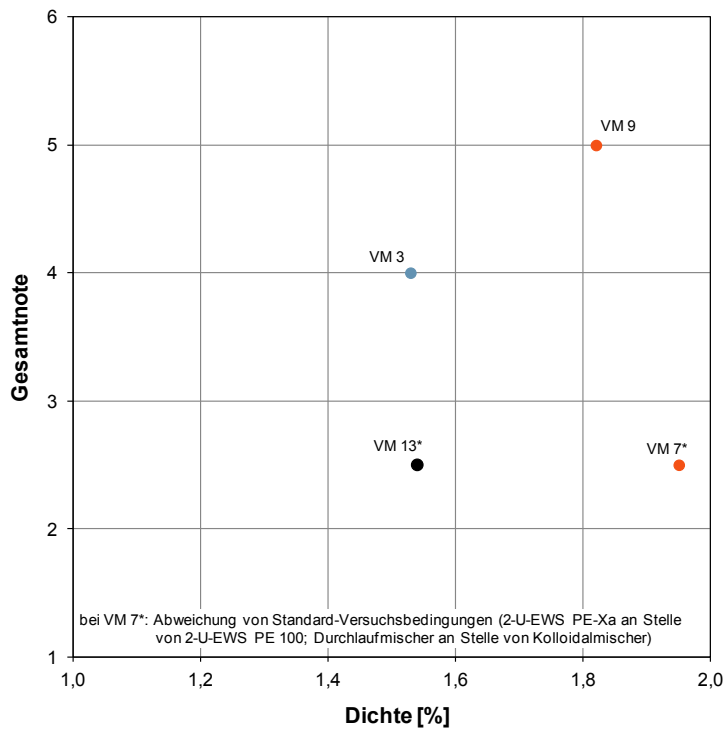
Anhang 27: Realmaßstab, Gesamtnote vs. Marshzeit



Anhang 28: Realmaßstab, Gesamtnote vs. Filtratwasser



Anhang 29: Realmaßstab, Gesamtnote vs. Dichte



Anhang 30: Vorschlag für Mindestangaben, die auf dem Datenblatt bzw. auf dem Baustoffsack aufgelistet werden sollten

Basisangaben	Mindestangaben Datenblatt	Mindestangaben Baustoffsack
Produktname	x	x
thermisch verbesserte Zusatzstoffe	x	x
Zementart	x	x
Haltbarkeit [in Monaten]	x	x
Verarbeitungszeit [in Stunden]	x	x
Mischungsangaben	mögliche Alternativvariante/n	mögliche Alternativvariante/n
Amischtechnik für die Baustelle	x (x)	x (x)
Wasser-Feststoff-Verhältnis	x (x)	x (x)
Dosierung	x (x)	x (x)
Ergieblichkeit	x (x)	x (x)
Prüfangaben	mögliche Alternativvariante/n	mögliche Alternativvariante/n
Dichte [kg/l]	schwarz: Erstprüfung orange: zulässiger Wertebereich für Freigabeprüfung x (x) x (x)	schwarz: Erstprüfung orange: zulässiger Wertebereich für Freigabeprüfung x (x) x (x)
Marsh-Zeit $t_{M,1000}$ [s]	x (x) x (x)	x (x) x (x)
Fließgrenze [N/m ²]	x (x) x (x)	x (x) x (x)
Suspensionstemperatur [°C]	x (x) x (x)	x (x) x (x)
Absetzmaß nach 1 Stunde [%]	x ¹ (x ¹) x ² (x ²)	x ¹ (x ¹) x ² (x ²)
Absetzmaß nach 24 Stunden [%]	x ¹ (x ¹)	x ¹ (x ¹)
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (k_f - Wert) [m/s]	x ¹ (x ¹)	x ¹ (x ¹)
Festigkeit nach 1 d [N/mm ²]	x ¹ (x ¹)	x ¹ (x ¹)
Festigkeit nach 28 d [N/mm ²]	x ¹ (x ¹) x ³ (x ³)	x ¹ (x ¹) x ³ (x ³)
Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]	x ¹ (x ¹)	x ¹ (x ¹)
Umweltverträglichkeits-beschleunigung	ja/nein	ja/nein ¹
Frostbeständigkeit	ja/nein ¹	ja/nein ¹
Sulfatbeständigkeit	ja/nein ¹	ja/nein ¹
Säurebeständigkeit	ja/nein ¹	ja/nein ¹
Kommentar		
gesonderter Aufdruck auf Baustoffsack		Herstellungsdatum und ggf. Chargennummer

Anmerkungen:

- 1: Die für die Variante mit dem höchstzulässigen Wasser-Feststoff-Verhältnis ermittelten Werte dürfen auch für die anderen Varianten übernommen werden.
- 2: Das Einhalten des zulässigen Absetzmaß-Wertebereichs dient lediglich bei der ersten, vor dem Verfüllvorgang erfolgenden Messung als Annahmekriterium. **D.h. der Verfüllvorgang kann frühestens 1 Stunde nach Beginn der ersten Freigabeprüfung begonnen werden!** Die folgenden Messungen des Absetzmaßes dienen als Kontrollmessungen.
- 3: Die Prüfung erfolgt an einem Probekörper, der aus der am Ende des Verfüllvorgangs oben am Bohrtisch austretenden Suspension hergestellt wird.

Weitere erforderliche Angaben:

- Anmischbedingungen (Rührwerk, U/min, Art und Durchmesser des Rührers, Anmischzeit, angemischte Menge, Art des Mischbehälters etc.) der für die Erstprüfung verwendeten Suspensionen.
- Temperatur der Suspension und des ausgehärteten Baustoffs, bei der die Werte der Erstprüfung ermittelt wurden (z.B. 20 °C).

Optionale Zusatzangaben: Über die aufgelisteten Mindestangaben hinausgehende Zusatzangaben (auch Handlungsanweisungen o.ä.) sind möglich.

Probenahmen für die Freigabeprüfung:

Die Probenahme der ersten Freigabeprüfung muss mindestens 1 Stunde vor Verfüllbeginn durchgeführt werden. Weitere Probenahmen mindestens alle 750 Liter bzw. bei Chargenmischern mindestens bei jeder 5. Mischcharge (je nachdem welches Kriterium zuerst eintritt). Die Probenahme kann entweder aus dem Vorratsbehälter der Mischanlage (Chargenmischer) oder an einem Ablasshahn der Verfüllleitung zwischen Mischanlage und Bohrtisch erfolgen.

Bei Anlagen, die den Baustoff gleichzeitig anmischen und ins Bohrtisch füllen (sogenannte Durchlaufmischer) ist vor Beginn des Verfüllvorgangs die gewünschte Suspensionsdichte durch Anpassung der Wassermenge einzustellen, ohne dass dabei Verfüllsuspension ins Bohrtisch eingebracht wird. Die hierzu erforderlichen Probenahmen müssen an einer geeigneten Stelle (z.B. an einem Ablasshahn oder direkt am Austritt der Mischanlage) entlang der für den späteren Verfüllvorgang zu verwendenden oberirdischen Verpressleitung zwischen Mischanlage und Bohrtisch erfolgen. Bei jeder Probenahme ist sicherzustellen (z.B. durch eine ausreichend lange Wartezeit zwischen dem Anpassen der Wassermenge und der Probenahme), dass die für die Probenahme verwendete Verfüllsuspension die Suspensions Eigenschaften wiedergibt, die der aktuell eingestellten Wassermenge entsprechen. Dies trifft sowohl auf die Probenahmen zur Einstellung der Solidichte als auch auf die späteren Probenahmen zur Freigabeprüfung zu. Nach Erreichen des zulässigen Wertebereichs der Dichte erfolgt auf diese Weise die Probenahme für die erste Freigabeprüfung. Sofern die zulässigen Wertebereiche bei dieser Freigabeprüfung eingehalten werden, ist der Mischer beim Verfüllvorgang mit denselben, unveränderten Einstellungen zu betreiben wie bei der Probenahme der erfolgten ersten Freigabeprüfung. Andernfalls ist das Einbringen der Verfüllsuspension ins Bohrtisch nicht erlaubt.

