

Abschlussbericht

ENTWICKLUNG ÜBERPRÜFBARER QUALITÄTSKRITERIEN FÜR ERDWÄRMESONDEN-VERFÜLLUNGEN UNTER REALITÄTSNAHEN RANDBEDINGUNGEN

von

Solites (Projektkoordinator)
Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
Stuttgart

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe)
Karlsruhe
EIFER (European Institute for Energy Research)
Karlsruhe

Förderkennzeichen: L75 16008 bis 16011

Laufzeit: 01.04.16 – 31.12.19

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Dezember 2020



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

ABSCHLUSSBERICHT ZUM FORSCHUNGS- VORHABEN

EWS-tech II

ENTWICKLUNG ÜBERPRÜFBARER
QUALITÄTSKRITERIEN
FÜR
ERDWÄRMESONDEN-VERFÜLLUNGEN UNTER
REALITÄTSNAHEN RANDBEDINGUNGEN



PROJEKTLAUFZEIT

April 2016 bis Dezember 2019

PROJEKTNUMMERN

L75 16008 bis 16011

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 11.12.2020

Titelbild: Teilsegment des Bohrlochsimulators der MPA Karlsruhe

AUTOREN DES ZWISCHENBERICHTS ZU DEM VERBUNDFORSCHUNGSVORHABEN

EWS-TECH II



Solites (Projektkoordinator)
Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige
thermische Energiesysteme
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. Nico Herrmann,
Dipl.-Geol. Dipl.- Min. Asrid Hirsch,
Dipl.-Geol. Petra Schlager
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe



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

Neben den aufgeführten Autoren haben die folgenden Personen bei der Bearbeitung des Forschungsauftrages mitgewirkt:

Dr.- Ing. Mathieu Riegger, M.Sc. Julian Rolker, Dipl.- Ing. Tim Lutz, M.Sc. Yannick Reduth, Max Ring (Solites), Linda Schindler, Simon Schüppler, Felix Voss (EIFER), Luisa Bienstein, Kevin Altinger, Heinz Vögele, Samuel Schär, Moritz Paul (KIT-AGW), Dr. Oliver Blask, Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn, Prof. Dr. Jörg-Detlef Eckhardt, Dipl.-Ing. Lutz Gerlach, Prof. Dr.-Ing. Michael Haist, M. Sc. Julian Link, Ute Kiefer, Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, Dr. Moritz Zemann (KIT-IMB/MPA)

INHALT

1. Kurzfassung	1
1.1. Deutsche Kurzfassung	1
1.2. Englische Kurzfassung- Abstract.....	2
2. Einleitung.....	3
2.1. Motivation und Aufgabenstellung	3
2.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	3
3. Einführung (AP. A, AGW, EIFER, MPA)	5
Hydrogeologische Randbedingungen der Schadensfällen in Baden-Württemberg.....	6
4. Theorie (AGW; EIFER; MPA).....	9
4.1. Penetration	9
4.2. Rheologie.....	12
4.2.1. Grundbegriffe der Rheologie.....	12
4.2.2. Belastungsabhängiges Fließverhalten.....	13
4.2.3. Zeitabhängiges Fließverhalten	14
4.2.4. Messverfahren/-technik.....	15
4.3. Magnetismus (AP. C)	19
4.3.1. Einführung.....	19
4.3.2. Magnetische Dipole	19
4.3.3. Magnetisches Moment.....	20
4.3.4. Magnetische Feldvektoren.....	21
4.3.5. Dia-, Para- und Ferromagnetismus	23
4.3.6. Ferri- und Antiferromagnetismus	25
4.3.7. Einfluss der Partikelgröße.....	25
4.4. Einfluss zementaggressive Wässer auf Verfüllbaustoffe für EWS (AP. D).....	27
4.4.1. Zementnomenklatur	27
4.4.2. Zementhydratation	27
4.4.3. Sulfatbeständigkeit von Zement	31
4.4.3.1. Gipstreiben.....	33
4.4.3.2. Ettringitreiben.....	34
4.4.3.3. Bildung von Thaumasit	34
4.4.3.4. Einfluss von Kationen	35
4.4.4. Säureangriff.....	36
5. Material und Methoden (AGW; EIFER; MPA).....	39
5.1. Untersuchte Verfüllmaterialien	39

5.2. Verwendete Wässer	39
5.3. Erdwärmerohr	40
5.4. Probenformen	40
5.5. Holzkugeln	40
5.6. Abstandshalter	40
5.7. Hilfsverrohrung	40
5.8. Anmischen der Baustoffe	41
5.9. Probennahme und Probenlagerung	41
5.10. Analytik	41
5.11. Wärmeentwicklung von Verfüllbaustoffen	43
5.12. Einfluss des Grundwassers auf die Verfüllung (AP. B)	44
5.12.1. Aquariumsversuche	45
5.12.2. Penetrationsversuche im Labormaßstab	46
5.12.3. Penetrationsversuche im Technikumsmaßstab	47
5.13. Magnetische Suszeptibilitätsmessmethoden (AP. C)	48
5.13.1. Bartington Messsystem für magnetische Suszeptibilitätsmessungen	48
5.13.1.1. Bartington MS2C Sensor mit „ASC Manual Core Analysis Track“ (AP. C)	49
5.13.1.2. Methoden zur Messung mit dem Bartington Anlegesensor MS2K (AP. C)	50
5.13.1.3. MS2H Bohrlochsensor (AP. C)	50
5.13.1.4. MS2B (AP. C)	51
5.13.2. CemTrakker (AP. C)	51
5.14. Probenherstellung für MS2C, MS2K, MS2H und CemTrakker (AP. C)	52
5.15. Labor-Messstand zur Untersuchung von Kernproben mit dem CemTrakker und MS2H Bohrlochsensor (AP. C)	53
5.16. Automatischer Verfüllstandskontrollversuch (AP. C)	54
5.17. Batchversuche (AP. D)	56
5.18. Umströmungsversuche (AP. D)	58
6. Ergebnisse (AGW; EIFER; MPA)	60
6.1. Entwicklung der Referenzverfüllbaustoffe (AP A)	60
6.1.1. Charakterisierung der Dotiermaterialien	61
6.1.2. Auswahl des Zementes	65
6.1.3. Versuche zur Auswahl und Dosierung des Dotiermaterials	66
6.1.4. Auswahl des Quarzfüllers	68
6.1.5. Eingesetzte Zusatzmittel	69
6.1.6. Angestrebte Eigenschaften der Referenzverfüllbaustoffe	72
6.1.7. Ansätze zur Mischungsvarianz	73
6.1.8. Mischungsrezeptur der Referenzverfüllbaustoffe mit definierten Eigenschaften	76
6.1.9. Rheologische Charakterisierung der Referenzverfüllbaustoffe	76
6.1.9.1. Fließgrenze	77
6.1.9.2. Absetzmaß	77

6.1.9.3. Setzmaß.....	79
6.1.9.4. Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter	81
6.1.9.5. Viskosität.....	83
6.1.9.6. Thixotropie	85
6.1.9.7. Dichte.....	87
6.1.9.8. Einfluss des Mischverfahrens auf rheologische Parameter	88
6.1.9.9. Zusammenfassende rheologische Charakteristika der Referenzverfüllbaustoffe ...	90
6.1.10. Charakterisierung der ausgehärteten Referenzverfüllbaustoffe	91
6.1.10.1. Rezepturen der entwickelten Referenzverfüllbaustoffe.....	92
6.2. Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung	94
6.3. Ergebnisse der Wärmeentwicklung von Verfüllbaustoffen.....	95
6.4. Einfluss des Grundwassers auf die Verfüllqualität (AP. B)	97
6.4.1. Ergebnisse der kleinen Aquariumsversuche	97
6.4.2. Ergebnis des großen Aquariumsversuchs	104
6.4.3. Ergebnisse der Penetrationsversuche im Labormaßstab.....	110
6.4.4. Ergebnisse der Penetrationsversuche im Technikumsmaßstab	116
6.5. Einfluss der Bohrlochtopographie und von Grundwasserbewegungen auf die Verfüllqualität.....	125
6.5.1. Erweiterung des Bohrlochsimulators	125
6.5.2. Einstellung der Wasserführung für die Grundwasserströmung	134
6.5.3. Verfüllversuche mit dem Bohrlochsimulator	136
6.5.4. Ergebnisse der Bohrlochsimulatorversuche	151
6.6. Ergebnisse der Magnetischen Suszeptibilitätsmessungen (AP. C).....	156
6.6.1. Untersuchung der mit Magnetit dotierten Verfüllbaustoffe 07d, 13+d, und der Suszeptibilitätsmesssysteme.....	157
6.6.1.1. Suszeptibilitätsbestimmung an Verfüllbaustoffpulvern mit dem MS2B	157
6.6.1.2. Bestimmung der optimalen Probenkernlänge für MS2C Messungen	158
6.6.1.3. Messfehleruntersuchungen für MS2C Messungen	159
6.6.1.4. Herstellungsfehleruntersuchungen mittels MS2C Messungen.....	160
6.6.1.5. Untersuchung der Langzeitstabilität des Messsignals mittels MS2C Messungen	161
6.6.1.6. Untersuchung von Qualitätsunterschieden bei unterschiedlichen Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min) und Chargen mittels MS2C Messungen	162
6.6.1.7. Untersuchung des Einflusses von Sondenrohren auf das Messsignal mittels MS2C Messungen	167
6.6.1.8. Untersuchung des Einflusses steigender W/F Verhältnisse auf das Messsignal mittels MS2C Messungen.....	168
6.6.1.9. Untersuchung des Einflusses geologischer Gegebenheiten auf das Messsignal mittels MS2C Messungen.....	173
6.6.1.10. Untersuchung der Eindringtiefe des CemTrakker und MS2H-Sensors	175

6.6.1.11.	Fehlstellenuntersuchungen mittels CemTrakker und MS2H-Sensor	179
6.6.1.12.	Untersuchung des Einflusses einer Hilfsverrohrung auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors.....	184
6.6.1.13.	Untersuchung des Einflusses von Abstandshaltern auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors.....	191
6.6.1.14.	Untersuchung des Einflusses der Raumlage von Sondenrohren im Bohrloch auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors	193
6.6.1.15.	Untersuchung des Einflusses steigender W/F Verhältnisse auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors.....	195
6.6.1.16.	Untersuchung des Einflusses geologischer Gegebenheiten auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors.....	197
6.6.1.17.	Zusammenfassung und Lösungsvorschläge für ein verbessertes magnetisches Messsystem und dotierte Verfüllbaustoffe	204
6.6.2.	Entwicklung und Untersuchung Magnetit dotierter Referenzverfüllbaustoffe, und der Suszeptibilitätsmesssysteme.....	207
6.6.2.1.	Untersuchung und Bewertung von Referenzverfüllbaustoffen mit Dotierungen unterschiedlicher Korngröße und Vol.% mittels MS2C + B Messungen	207
6.6.2.2.	Suszeptibilitätsbestimmung an Referenzverfüllbaustoffpulvern mit dem MS2B	210
6.6.2.3.	Untersuchungen von Referenzverfüllbaustoffsuspensionen nach LQS-EWS ...	211
6.6.2.4.	Untersuchung von Qualitätsunterschieden bei M1-M4 und unterschiedlichen Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min)	214
6.6.2.5.	Untersuchung des Einflusses steigender W/F Verhältnisse und Anmischbedingungen auf das Messsignal	215
6.6.2.6.	Fehlstellenuntersuchungen mittels CemTrakker und MS2H-Sensor	225
6.6.2.7.	Untersuchung des Einflusses der Raumlage von Sondenrohren im Bohrloch auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors	227
6.6.2.8.	Korrelation der Messsysteme bei unterschiedlicher Dotierung	228
6.6.2.9.	Zusammenfassung und Analyse günstiger Verfüllbaustoffeigenschaften.....	230
6.7.	Ergebnisse der automatischen Verfüllstandskontrollversuche (AP. C).....	233
6.7.1.	Baustoff 15d.....	234
6.7.1.1.	~40 l/min Volumenstrom, exemplarische detaillierte Auswertung	234
6.7.1.2.	~60 l/min Volumenstrom	254
6.7.1.3.	Erhöhtes W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom)	260
6.7.1.4.	Baustoff 15d, Vergleich der Versuche	266
6.7.2.	Baustoff 02d	274
6.7.3.	Baustoff 07d	282
6.7.4.	Baustoff 13+	291
6.7.5.	Eigenmischungen M3 und M4	307
6.7.6.	Bewertung und Fazit der Füllstandkontrollversuche.....	314
6.8.	EWS-Langzeitintegrität - Untersuchung beeinflussender Faktoren (AP. D)	321

6.8.1. Sulfatbeständigkeit und Beständigkeit gegenüber sauren Wässern von Verfüllbaustoffen.....	322
6.8.1.1. Chemisch-physikalische Eigenschaften der Reaktionslösungen	323
6.8.1.2. Feststoffanalyse (XRD).....	326
6.8.1.3. Bewertung der Batchversuche.....	338
6.8.1.4. Fazit zur Sulfatbeständigkeit und Beständigkeit gegenüber sauren Wässern ...	338
6.8.2. Ergebnisse der Umströmungsversuche (AP. D).....	340
6.8.3. Reaktivität und Reaktionskinetik von Verfüllbaustoffen im Kontakt mit Gipskeuper	360
6.8.3.1. Probenmaterial.....	360
6.8.3.2. Untersuchungsprogramm	361
6.8.3.3. Untersuchungsergebnisse zu Reaktivität und Reaktionskinetik.....	368
6.8.3.4. Fazit zu Reaktivität und Reaktionskinetik	381
6.8.4. Entwicklung und Bau einer Simulationszelle zur experimentellen Bestimmung der Quelldrücke.....	381
6.8.4.1. Literatursichtung und Vorversuche zur Erfassung der Quelldrücke der verwendeten Materialien.....	382
6.8.4.2. Herstellungsverfahren für kombinierte Probekörpern.....	387
6.8.4.3. Planung und Konstruktion der Druckmesszelle	392
6.8.4.4. Fazit zu Entwicklung und Bau einer Simulationszelle	400
6.8.5. Versuche zu Korrosion von Magnetit im Milieu zementgebundener Verfüllbaustoffe	400
6.8.5.1. Literatursichtung	400
6.8.5.2. Batch- und Einlagerungsversuche.....	402
6.8.5.3. ESEM-Untersuchungen	405
6.8.5.4. Fazit zu Korrosion von Magnetit im Milieu zementgebundener Verfüllbaustoffe	408
6.9. Einfluss der Mischgeschwindigkeit auf die Eigenschaften der Verfüllbaustoffe.....	409
7. Mechanismen der Fehlstellenbildung (Solites)	410
7.1. Problemstellung	410
7.2. Stand zum Vorgehen beim Verfüllen von stockwerksübergreifenden Bohrungen	411
7.2.1. Umfrage bei Bohrunternehmern	412
7.2.2. Bohrunternehmerworkshop.....	413
7.3. Entwicklung des Versuchsaufbaus zur Nachbildung eines aufsteigenden Grundwasserpotentials.....	414
7.3.1. Vorgehen und Versuchsrandbedingungen	414
7.3.1.1. Ermittlung von realistischen Versuchsrandbedingungen	414
7.3.1.2. Literaturrecherche.....	414
7.3.2. Skalierung der Druckverhältnisse des Versuchsaufbaus	415
7.3.3. Vorbetrachtungen	417
7.3.3.1. Anmischversuche.....	417
7.3.3.2. Einfluss der Temperatur auf das Absetzverhalten.....	418

7.4. Berechnungsmodell zur Festlegung der Versuchsrandbedingungen	428
7.4.1. Theoretische Vorüberlegungen	428
7.4.2. Benutzeroberfläche des Berechnungstools	431
7.4.3. Allgemeiner Ablauf des Berechnungszykluses	431
7.4.4. Ablauf der Berechnungen	435
7.5. Versuchsanlage	436
7.5.1. Technikum	436
7.5.2. Realmaßstabsversuch	439
7.6. Messtechnik der Versuchsanlage	439
7.7. Versuchsprogramm	443
7.8. Versuchsauswertung	444
7.8.1. Nomenklatur der Versuche	444
7.8.2. Auswertung für Referenzbaustoffe	444
7.8.3. Auswertung für Technikums- und Realmaßstabsversuche	446
7.9. Ergebnisse der Versuche mit den Referenzbaustoffen hinsichtlich der Verfüllqualität..	446
7.10. Versuche zur Abdichtung aufsteigender Grundwasserpotentiale während der Verfüllung.....	448
7.10.1. Vorversuch 3	450
7.10.2. Vorversuch 6	452
7.10.3. Vorversuch 7	454
7.10.4. Versuch 023	455
7.10.5. Versuch 024	457
7.10.6. Versuch 025 (gezogene Verrohrung).....	460
7.10.7. Vorversuch 2	461
7.10.8. Vorversuch 4	463
7.10.9. Versuch 021	465
7.10.10. Versuch 022	467
7.10.11. Ergebnisse des Realmaßstabversuchs	469
7.11. Bewertung der Versuche	473
7.12. Diskussion einzelner Punkte der LQS.....	477
7.12.1. GWL < 0,5 l/sek als unkritisch eingestuft	477
7.12.2. LQS EWS Anlage 4	482
8. Empfehlungskatalog.....	482
8.1. Anforderungskriterien für Erdwärmesondenverfüllbaustoffe	482
8.2. Vorschläge zur Weiterentwicklung der LQS EWS.....	483
8.3. Hinweise zur Verfülltechnik bei Vorliegen von Grundwasserströmungen.....	484
9. Literatur	487
10. Anhang	496

10.1.	Aufbau automatischer Verfüllstandskontrollversuch (AP. C)	496
10.2.	Ergebnisse automatischer Verfüllstandskontrollversuch (AP. C).....	502
10.3.	Ergebnisse der Penetrationsversuche im Labormaßstab	529
10.4.	Ergebnisse der magnetischen Suszeptibilitätsmessung.....	532
10.5.	Ergebnisse der Batchversuche: Graphische Auswertung.....	533
10.5.1.	07 d.....	533
10.5.2.	13+d.....	539
10.5.3.	M3.....	545
10.5.4.	M4.....	551
10.6.	Ergebnisse der Batchversuche: Daten (Anionen- und Kationenkonzentrationen, physico-chemische Parameter).....	557
10.7.	Ergebnisse der Umströmungsversuche zur Untersuchung der Stabilität unter zementaggressiven Wässern.....	569
10.7.1.	Vorortparameter der Suspensionen	569
10.7.2.	Visuelle Begutachtung der Versuchsprismen (Initial (I) und nach Ausbau (A))	570
10.7.3.	pH-Wert der Reaktionswässer	574
10.7.4.	Redoxpotential der Reaktionswässer.....	575
10.7.5.	Elektrische Leitfähigkeit der Reaktionswässer	576
10.7.6.	Wasserchemismus im Eluat der Umströmungsversuche.....	578
10.7.6.1.	Versuch 1	578
10.7.6.2.	Versuch 2	582
10.7.6.3.	Versuch 3	586
10.7.6.4.	Versuch 4	590
10.7.7.	Mineralogie ber Versuchsprismen aus den Umströmungsversuchen.....	597
10.7.8.	Porenöffungsverteilung der Probekörper aus den Umströmungsversuchen	600
10.7.9.	Relative Gewichtsveränderung der Versuchsprismen	606
10.7.10.	Durchströmte Wassermeng in Versuch 4.....	606
10.8.	Umfrage Bohrunternehmen (Juni 2016): Detektion, Abdichtungsmaßnahmen und Fallbeispiele von stockwerksübergreifenden Bohrungen bzw. vertikalen Grundwasserflüssen	607
10.9.	Protokoll Workshop mit Bohrunternehmern vom 17.11.2016	615
10.10.	Literaturrecherche von Schadensfällen im Zusammenhang mit Erdwärmebohrungen	619
10.11.	Dokumentation der Referenzversuche ohne Sondenrohre.....	621
10.12.	Dokumentation der Referenzversuche mit Sondenrohren.....	625
10.13.	Dokumentation Realmaßstabsversuch	629

1. KURZFASSUNG

1.1. Deutsche Kurzfassung

Das Verbundvorhaben EWS-tech II zielt auf Qualitätsverbesserungen bei der Erstellung von Erdwärmesonden ab, die im Zusammenhang mit der bei der Erstellung von Erdwärmesonden, insbesondere in Baden-Württemberg, aufgetretenen Schadensfälle erforderlich sind.

Die Analyse der aufgetretenen Schadensfälle zeigt, dass stockwerksübergreifende Bohrungen, die Grundwasserleiter unterschiedlicher Druckpotentiale verbinden und nicht durch eine adäquate Verfüllung abgedichtet werden, als besonders kritisch einzustufen sind. Daher bilden Untersuchungen zum Einfluss von Grundwasserflüssen beim Verfüllen eines Bohrlochs und die dabei resultierende Qualität des Verfüllkörpers einen der Schwerpunkte des Forschungsvorhabens EWS-tech II.

Hierzu werden drei sich ergänzende Versuchsaufbauten eingesetzt, so dass durch die Visualisierung und durch die quantifizierte Erfassung des Verfüll- und Aushärtvorgangs bei verschiedenen ausgeprägten Grundwasserströmungen sowie durch die Berücksichtigung der Bohrlochgeometrie und -rauigkeit und größenmaßstäblich realistischer Grundwasserstockwerksverbindungen eine umfassende Bewertung möglich wird.

Für einige Versuche werden vier im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte, magnetisch dotierte Referenz-Verfüllbaustoffe mit individuellen rheologischen Eigenschaften eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften und der Verfüllqualität zu untersuchen und somit Kriterien für möglichst günstige Baustoffeigenschaften ableiten zu können.

Die magnetische Dotierung der eingesetzten Verfüllbaustoffe ermöglicht es, die verfügbaren miniaturisierten Suszeptibilitätsmesssonden auf Ihre Eignung für eine automatische Abdichtungsüberwachung des Verfüllvorgangs sowie eine Nachmessung zur Bestimmung der Verfüllqualität zu untersuchen. Dabei wurde die Qualität der erzielbaren Messergebnisse, sowie Grenzen der Einsatzfähigkeit bestimmt.

In Verbindung mit intensiven Untersuchungen an magnetisch dotierten Verfüllbaustoffen werden daraus Mindestanforderungen an die Dotierung und an die zugehörigen Überwachungstechniken des Verfüllvorgangs sowie an Langzeitüberwachungstechniken abgeleitet.

Darüber hinaus werden in dem Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech II Basiskennnisse zur Langzeitintegrität von EWS-Bohrungen in Gipskeuper-Quellbereichen erarbeitet.

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

1.2. Englische Kurzfassung- Abstract

The EWS-tech II collaboration project aims at quality improvements in the construction of borehole heat exchangers. The analysis of damage cases that have especially occurred in Baden-Württemberg shows that boreholes that connect several groundwater layers with different pressure potentials, which are not sealed properly by backfill material, are to be classified as particularly critical. For this reason, investigations on the influence of groundwater flows during the backfilling process of a borehole and the resulting quality of the backfill are one of the main focuses of the EWS-tech II research project.

For this purpose, three complementary test set-ups are used, enabling a comprehensive evaluation by visualization and quantified recording of the backfilling and hardening process for different groundwater flows, taking also into account the borehole geometry, roughness and realistic groundwater scales.

For some of the tests, four magnetically doped reference backfill materials with individual rheological properties developed within this project are used to investigate the correlation between the rheological properties and the backfill quality and thus to be able to derive criteria for the most favourable backfill material properties.

The magnetic doping of the used backfill materials enables the available miniaturised susceptibility measuring equipment to be tested for its suitability for automatic sealing monitoring of the backfilling process as well as for a subsequent measurement for determination of the backfill quality. At the same time the quality of the achievable measuring results as well as limits of the operational capability were determined. In connection with investigations on magnetically doped backfilling materials, minimum requirements for the doping and for the associated monitoring techniques of the backfilling process as well as for long-term monitoring techniques are derived. In addition, the EWS-tech II collaboration research project develops basic knowledge on the long-term integrity of borehole heat exchangers in Gipskeuper swelling areas.

Requirement criteria for backfilling materials of geothermal heat exchangers are derived from the above-mentioned investigation aspects and summarized in a catalogue of recommendations.

2. EINLEITUNG

2.1. Motivation und Aufgabenstellung

Im Rahmen des integrierten Klimaschutzziels Baden-Württembergs ist die Geothermie ein zentraler Baustein. Bereits seit einigen Jahrzehnten trägt die oberflächennahe Geothermie mit derzeit etwa 44000 Erdwärmesonden in Baden-Württemberg zur Wärme- und Warmwasserversorgung bei.

In schwierigen geologischen Situationen sind in der Vergangenheit Schadensfälle insbesondere im Zusammenhang mit quellenden Anhydritkhorizonten oder entwässernden Grundwasserhorizonten aufgetreten. Dabei war der Anlass für die beobachteten Schäden bei nahezu allen dokumentierten Schadensfällen eine nicht ausreichend dichte Verfüllung des Bohrlochs für die Erdwärmesonden. Dies hatte einen unkontrollierten Wasserfluss zwischen unterschiedlichen, teilweise quellfähigen bzw. sich entwässernden und dadurch setzenden geologischen Formationen zur Folge.

Das Verbundvorhaben EWS-tech II zielte auf Qualitätsverbesserungen bei der Erstellung von Erdwärmesonden, die vor dem Hintergrund der vorliegenden Schadensfälle und der Erkenntnisse aus den vorhergehenden Forschungsvorhaben EWSplus und EWS-tech erforderlich sind.

Hierbei wurde auf die folgenden Forschungspunkte fokussiert:

- Untersuchung der Verfüllqualität und Materialcharakterisierung von neu entwickelten, magnetisch dotierten Verfüllbaustoffen
- Untersuchung der Einflussparameter Grundwasserfluss und Bohrlochgeometrie/Rauigkeit auf die Verfüllqualität.
- Ableitung des kausalen Zusammenhangs zwischen Fehlstellen und der Systemdichtigkeit von Erdwärmesonden unter Berücksichtigung von Grundwasserbewegungen im Bohrloch
- Ermittlung von Mindestanforderungen an magnetisch dotierte Verfüllbaustoffe und an Überwachungstechniken des Verfüllvorgangs sowie an eine Langzeitüberwachung
- Erarbeitung von Basiskennnissen zur Langzeitintegrität verfüllter EWS-Bohrungen in Gips-keuper-Quellbereichen
- Bewertung der bestehenden Vorschriften insbesondere der Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (LQS EWS) hinsichtlich der sicheren Beherrschung von problematischen Untergründen und Hinweise zu möglichen Verbesserungsvorschlägen im Rahmen einer möglichen Fortschreibung der LQS EWS.

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 Effizi-

enz von Erdwärmesonden durchgeführt und darauf basierend thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe entwickelt wurden (Ebert, 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-Bearbeitung des Verfüllmaterials (Frank, 2011), (Hermann, 2008), (Müller, 2009), (Reuß & Kuckelkorn, 2011).

Die am 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 verpresste Erdwärmesonde bestehend aus den Sondensondenrohren und dem Verfüllbaustoff deutlich höhere hydraulische Durchlässigkeit 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 bisher durchgeführten Laboruntersuchungen wurde überwiegend mit ideal hergestellten Prüfkörpern gearbeitet, die eine Länge von 2 m oder weniger aufweisen.

Demgegenüber wurden in dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg finanzierten Forschungsvorhaben EWSplus (Riegger, Hochmuth, & Werner, Abschlussbericht EWSplus, 2013) 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 erlaubt die Analyse des tatsächlichen Zustands innerhalb eines nachgestellten Bohrlochs von Erdwärmesonden. Es konnte gezeigt werden, dass die Verfüllung von Erdwärmesonden häufig nicht fehlerfrei ist und dass selbst bei idealen Bedingungen in dem Versuchsaufbau (keine Klüfte, glatte Bohrlochwand) bei zahlreichen der erstellten Erdwärmesonden unverfüllte Bereiche – sogenannte Fehlstellen – von bis zu einem Meter Länge vorliegen.

Einen Beitrag zur Beantwortung der offenen Fragestellungen – insbesondere zu den Ursachen der Fehlstellenentstehung bei der Verfüllung von Erdwärmesonden – wurde durch das Forschungsvorhaben EWS-tech erarbeitet (Riegger & Rolker, EWS- Tech, 2016). hierzu wurden die Ergebnisse von Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuchen korreliert. In den 6 m hohen Technikumsversuchen fand dabei erstmals eine Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden statt. Es konnte damit erstmals eine Herangehensweise zum Verständnis für die relevanten Vorgänge der Fehlstellenbildung geschaffen werden. Das zentrale Ergebnis des Forschungsvorhabens EWS-tech stellte eine Bewertung von Qualitätssicherungsmethoden für Verfüllmaterialien für Labor und Baustelle dar. Im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech konnte jedoch der Aspekt „Verfüllung bei Grundwasserfluss“ nicht betrachtet werden. Wie die durch Grundwasserstockwerksverbindung verursachten Erdwärmesonden-Schadensfälle in Baden-Württemberg zeigen, ist die Betrachtung dieses Aspekts jedoch von entscheidender Bedeutung. Daher wurde dieser neben anderem im vorliegenden Projekt untersucht.

Eine Dotierung der Verfüllbaustoffe kann eine Überprüfung der Verfüllqualität ausgeführter Erdwärmesonden mit Hilfe von geophysikalischen Messverfahren, die in situ durchgeführt werden, ermöglichen. Dies wird zum einen während des Einbaus („automatische Abdichtungsüberwa-

chung“) und zum anderen als Kontrollverfahren zu einem späteren Zeitpunkt genutzt. Das Verhalten der Dotierung innerhalb der Suspension ist jedoch noch nicht ausreichend bekannt und belegt. Daher muss die Aussagekraft der bisherigen Messmethoden evaluiert und mit Hilfe von verschiedenen Verfahren validiert werden.

3. EINFÜHRUNG (AP. A, AGW, EIFER, MPA)

Im Zuge des Auftretens erster Schadensfälle im Zusammenhang mit Erdwärmesonden in Baden-Württemberg setzte zunächst eine intensive Untersuchung und Aufarbeitung im Hinblick auf die Ursachen, die zu diesen Schäden führten, gefolgt von einer Sanierung der Schäden ein (z.B. LGRB 2010, 2012). Auf die eingetretenen Schäden reagierte das Land Baden-Württemberg unmittelbar im Sinne einer Qualitätssicherung mit entsprechenden Handlungsmaßnahmen, die in den sogenannten Leitlinien Qualitätssicherung (LQS EWS 2011) mündeten, um derartige Schäden für die Zukunft ausschließen zu können. Eine resultierende wichtige Neuerung war die Einführung einer verschuldensunabhängigen Versicherung mit einer Deckungssumme von mindestens 1 Mio. €, durch die etwaige durch eine Bohrung verursachte Schäden sofort angegangen werden konnten, um unmittelbar sanieren zu können und um dadurch eine Ausweitung der Schäden zu unterbinden. Parallel dazu wurden vom Land Baden-Württemberg praxisnahe Forschungsprojekte (z.B. EWS Plus, EWS-tech) initiiert, um Schadensursachen besser zu verstehen und zu vermeiden (Rieger 2013, 2017).

Als besonders kritisch im Hinblick auf ein Schadensrisiko wurde die Verbindung von Grundwasserleitern mit unterschiedlichem hydraulischem Potential (unterschiedliche Ruhewasserspiegel) durch eine Erdwärmesonde identifiziert oder wenn durch die Erdwärmesonde ein gespannter Grundwasserleiter erschlossen wurde. Dadurch können Wässer in überlagernde Sichten aufsteigen und zu Störungen der natürlichen hydrogeologischen und geologischen Bedingungen führen. Diese Beeinflussung kann sich negativ auf die Grundwasserqualität sowie die geologischen Standortbedingungen auswirken. Besonders an Standorten mit sulfatführende Schichten, insbesondere Anhydrit, können derartige hydrogeologische Verhältnisse zu Schäden führen, bei unzureichend abgedichteten Bohrungen bzw. bei der Wahl des falschen Verfüllbaustoffs (Grimm et al. 2014).

In den LQS EWS (2011) wird zwischen einem kritischen und einem unkritischen (Grundwasser) Stockwerksbau differenziert. Wenn das Druckgefälle nach unten gerichtet ist und der Wasserandrang bei über 0,5 l/s liegt, wird der Stockwerksbau als kritisch betrachtet. Ist das Druckgefälle hingegen nach oben gerichtet (aufsteigende Wässer) und liegen die „berechneten Potentialunterschiede (3-1) bei dem Wert 1 oder darunter, liegt ein kritischer Stockwerksbau vor und es sind besondere Maßnahmen erforderlich.

Die Berechnung der Potentialunterschiede erfolgt dabei nach GI (3-1) (LQS EWS 2011):

$$\text{Differenz der Anbohrtiefen der Aquifere} / \text{Differenz der Ruhewasserspiegel der Aquifere} \quad (3-1)$$

Die Frage nach der Schadensursache aufgrund von Erdwärmesonden waren im Zuge des Projektes EWS-Tech II Veranlassung, den Verfüllvorgang bei aufsteigenden Grundwässern, wie sie

beim Erbohren eines gespannten Grundwasserleiters auftreten, im Labor und im Technikumsmaßstab nachzustellen. Dazu wurde entsprechend der jeweiligen Fragestellung unterschiedliche Versuchsaufbauten entwickelt um die während des Verfüllvorgangs ablaufenden Prozesse zu visualisieren und messtechnisch zu erfassen und zu bewerten. Um die Versuche möglichst realitätsnah zu entwickeln, wurden in einem ersten Schritt die geologischen Verhältnisse sowie die hydrogeologischen Randbedingungen bei den Schadensfällen, die durch Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg verursacht wurden, analysiert. Für die Versuchsaufbauten waren Informationen über die Wasserzuflüsse aus dem Aquifer in die Bohrung, über die Ruhewasserspiegel in den erbohrten Aquiferen bzw. deren Potentialunterschiede sowie die Höhe des artesischen Ausflusses von großer Bedeutung.

Hydrogeologische Randbedingungen der Schadensfällen in Baden-Württemberg

Als gemeinsame Ursache der in Baden-Württemberg in Zusammenhang mit Erdwärmesondenbohrungen beobachteten Schäden konnte die unzureichende Verfüllung der Erdwärmesonden identifiziert werden, die vertikale Fließbewegungen entlang der Sonde ermöglichte. Zu den Schäden, die im Zuge von Erdwärmesondenbohrungen hervorgerufen werden können, gehören nach der LQS EWS (2011) zum einen Gebäudeschäden, die durch Setzungen und Hebungen des Untergrundes verursacht werden, zum anderen jedoch auch das dauerhafte Versiegen oder der dauerhafte Rückgang von Quellschüttungen. Mögliche Schäden durch eine fehlerhaft ausgebaute Erdwärmesonde können auch ein hydraulischer Kurzschluss mehrerer Grundwasserleiter sein, der zu einer Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers führen kann. Ferner kann das Grundwasser über die fehlerhafte Erdwärmesondenbohrung in sulfatführende Schichten gelangen und bei Vorkommen von Anhydrit zu Quellung und damit Hebung führen, bzw. Gips lösen und dadurch Setzungen an der Oberfläche verursachen (Abbildung 3-1). Diese Schadensszenarien sind jedoch nicht ausschließlich erdwärmesondenspezifisch, sondern können prinzipiell bei jeder Bohrung auftreten.

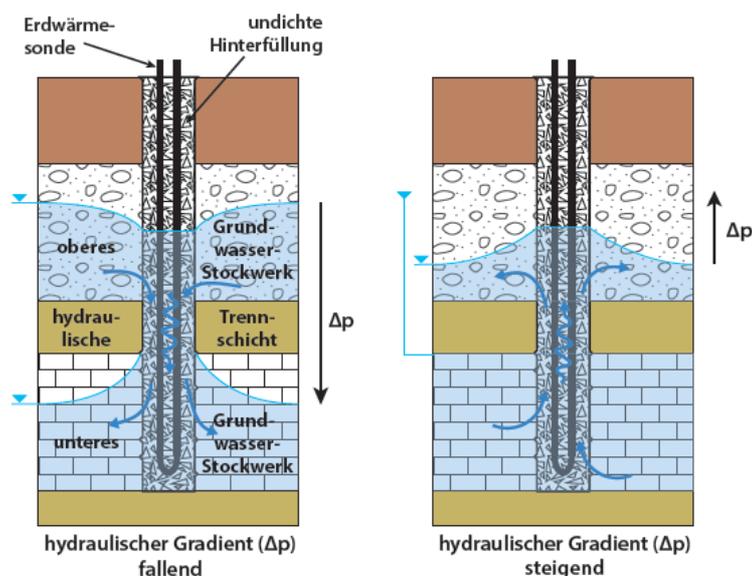


Abbildung 3-1: Durch eine unzureichende Verfüllung kann es zu verschiedenen Schäden an der Erdoberfläche aber auch im Untergrund kommen (abgeändert nach Wolff 2004, aus Stober & Bucher 2014)

Zu den tatsächlich im Zusammenhang mit Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg entstandenen Schadensfällen gehören (Grimm et al. 2014):

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

Nachstehend werden, soweit die Datenlage verfügbar ist, die hydraulischen Eckdaten, die in Zusammenhang mit den Schadensfällen stehen, kurz beschrieben und durch allgemeine Informationen von Bohrfirmen, die Arteser in der Vorbergzone des Schwarzwaldes erbohrten, ergänzt.

In der Stadt Tettngang (Bodenseekreis) wurde bei Bohrarbeiten für eine 150 m tiefe Erdwärmesonde in ca. 30 m u. GOK. ein Arteser mit einer anfänglichen Schüttung von 5 l/s angebohrt. Da der Arteser nicht beherrscht werden konnte, trat er mehrere Jahre unkontrolliert zuletzt mit einer Schüttung von 2 bis 3 l/s aus, wobei der Druck übertage ca. 1,5 bar betrug. Das in dieser Zeit ausgetretene Grundwasser floss über das Grundstück des Bauherrn ab und hat dieses und ein angrenzendes Grundstück stark vernässt.

Bei einer Bohrung in Ravensburg (Landkreis Ravensburg) wurde wie in Tettngang artesisch gespanntes Grundwasser in einer Tiefe von ca. 81 m u. GOK. angetroffen, wobei allerdings der Ausfluss an der Erdoberfläche mit bis zu 10 l/s deutlich größer war als beim Schadensfall Tettngang, so dass zusätzlich mit dem Grundwasser auch sandiges Material ausgetragen wurde. Der artesische Überdruck an der Erdoberfläche liegt bei 0,5 bar, so dass das hydraulische Potential des Aquifers bei 8,5 bar liegt.

In Staufen im Breisgau (Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald) wurden sieben Erdwärmesonden installiert, wobei eine Sonde bis in den gespannten Grundwasserleiter des Unteren Keupers (ku) und Oberen Muschelkalkes (mo) vordrang. Durch die undichte Ringraumzementation konnte das Grundwasser bis in die Anhydrit führenden, tonigen Schichten im Mittelkeuper aufsteigen. Der Anhydrit wandelte sich in Folge in Gips um, ein Vorgang, der mit einer Volumenzunahme verbunden ist, und der bei geringem Überlagerungsdruck zu Hebungen an der Oberfläche führt (LGRB 2010; 2012). Zu den Hebungen kamen im Fall Staufen Horizontalbewegungen hinzu und verursachten erhebliche Schäden an Gebäuden. Derzeit wird mit Hilfe von 3 Brunnen, die summarisch ca. 3,5 l/s fördern, der Wasserspiegel des ku/mo-Aquifers künstlich unter den quellfähigen Schichten gehalten. Die erforderliche Druckreduktion liegt bei ca. 14,5 bar.

In der Gemeinde Rudersberg (Rems-Murr-Kreis) konnten infolge fehlender und unvollständiger Verfüllung im Bohrloch Wässer wahrscheinlich aus dem Gipskeuper oder Unteren Keuper in die Anhydrit führenden Schichten des Mittelkeupers gelangen und verursachten dort analog zum Schadensfall Staufen Geländehebungen mit entsprechenden Schäden an Gebäuden (LGRB 2013). Auch der Schadensfall Böblingen wird wie bei Staufen durch aufsteigende Wässer in Anhydrit führende Schichten des Mittelkeupers mit Anhydritquellen in Folge zurückgeführt.

In Wurmlingen (Stadtteil von Rottenburg, Landkreis Tübingen) traten an der Erdoberfläche erste Setzungen auf, die zu Schäden an Straßen und Gebäuden führten. Infolge unzureichender Verfüllung konnte Grundwasser aus dem tieferen, gespannten Grundwasserleiter des Muschelkalks in den wahrscheinlich bereits verkarsteten Gipskeuper aufsteigen und den dort anstehenden Gips weiter auslaugen und bestehende Hohlräume vergrößern. Die Hohlräume führten in Folge zu Setzungen an der Oberfläche.

In der Stadt Schorndorf (Rems-Murr-Kreis), im Leonberger Stadtteil Eltingen und in der Stadt Renningen (beide Landkreis Böblingen) wurden durch unzureichende Verfüllung zwei Grundwasserleiter kurzgeschlossen, wobei der untere Grundwasserleiter jeweils niedrigere Wasserstände als der höhere Grundwasserleiter aufwies. Die gering durchlässige Trennschicht des Lettenkeupers wurde durch die Bohrungen durchteuft. In allen drei Fällen konnte dadurch Grundwasser über die Bohrung aus dem verkarsteten Gipskeuper in die Muschelkalkformation abfließen mit der Folge einer Grundwasserabsenkung im oberen Grundwasserleiter. In Renningen hat dies zum Versiegen von Brunnen im oberen Grundwasserleiter geführt. In Schorndorf und Leonberg kam es zu einer Konsolidierung des Untergrundes, die sich an der Oberfläche durch Setzungen bemerkbar machte und zu Schäden an Gebäuden führte. Im Bereich Schorndorf betrug die Potentialdifferenz der beiden Aquifere vor Auftreten der Schäden etwa 1,6 bar und in Leonberg etwa 1,0 bar.

Bohrfirmen beschreiben das gelegentliche Auftreten von Artesern in der Vorbergzone des Schwarzwaldes. Dabei liegt der freie Auslauf i.d.R. bei 1-2 l/s mit einem Überdruck, der meistens 0,5-0,6 bar beträgt.

Die Zusammenstellung der hydraulischen Randbedingungen zeigt, dass bei angebohrten Artesern der übertägige Ausfluss i.d.R. bei einigen wenigen l/s liegen kann und dass mit einer Potentialdifferenz zwischen zwei Grundwasserleitern von bis zu 2 bar gerechnet werden kann. Beim Schadensfall Staufen müsste die Abdichtung sogar einem Druck von 14,5 bar standhalten.

4. THEORIE (AGW; EIFER; MPA)

4.1. Penetration

Beim Einbringen der Suspension in ein Bohrloch sowie über einen kurzen Zeitraum danach, kann es zur Sedimentation, Filtration sowie zur Penetration der Suspension kommen. Diese drei Prozesse hängen unmittelbar voneinander ab, sind aber räumlich voneinander getrennt. Innerhalb der Erdwärmesonde kann es in Abhängigkeit der fluidmechanischen Eigenschaften der Suspension beim Auftreten von Dichteunterschieden bedingt durch die Gravitation zur Sedimentation von Partikeln mit höherer Dichte kommen und damit die Qualität der Verfüllung nachteilig beeinflussen. Im Grenzbereich Suspension/anstehendes Gestein kommt es in Abhängigkeit der Eigenschaften der Suspension sowie des Gesteins zur Filtration. Bei der Filtration können drei Arten unterschieden werden (Schlötzer 1995, Kuk 2004):

- Oberflächenfiltration: Ist der hydrostatische Druck innerhalb der Suspension höher als der Porenwasserdruck im Gestein, werden die Partikel der Suspension an der Bohrlochwand zurückgehalten und bilden dort einen Filterkuchen, während das Wasser (Filtrat) in das Gestein abfließt.
- Membranfiltration: Kann aufgrund geringer Druckunterschiede (Porenwasserdruck/hydrostatischer Druck) bzw. kleiner Porenöffnungsweite des Gesteins kein oder nur sehr wenig Filtrat in den Untergrund eindringen, bildet sich an der Bohrlochwand lediglich eine geringmächtige Membran aus komprimierten Feststoff aus.
- Tiefenfiltration: Bei der Tiefenfiltration dringen Partikel in das Gestein ein, wobei die Eindringtiefe kleiner als bei der Penetration ist. Die Partikel werden dabei durch Verstopfung der Poren bzw. chemisch/physikalische Anlagerung zurückgehalten.

Hinsichtlich der Beeinflussung des Grundwassers ist die Penetration die beeinflussende Größe. Sie beschreibt dabei das Eindringen der Suspension bzw. von Partikeln der Suspension in den Porenraum des umgebenden Gesteins aufgrund des hydrostatischen Druckunterschieds ΔP [Pa] zwischen Porenwasserdruck und der Suspension am Betrachtungspunkt (DIN 4126, 2013):

$$\Delta P = \rho_s g h_s - \rho_f g h_f \quad (4-1)$$

wobei ρ_s [g/cm³] die Suspensionsdichte, ρ_f [g/cm³] die Dichte der Porenflüssigkeit, g [m/s²] die Erdbeschleunigung, h_s [m] hydrostatische Höhe der Suspension und h_f [m] die hydrostatische Höhe der Porenflüssigkeit ist.

Die Eindringtiefe der Suspension ins Gestein ist dabei durch das Gleichgewicht zwischen treibenden Druckkräften und haltenden Scherkräften nach folgender Gleichung gegeben (Schlötzer 1995):

$$\int \Delta P dA_{pk} = \int \tau_s U_{pk} dz \quad (4-2)$$

mit ΔP [Pa] als Druckdifferenz, A_{pk} [m²] als Querschnittsfläche des einzelnen Porenkanals, τ_s [Pa] als Fließgrenze der Suspension, U_{pk} [m] als Umfang des einzelnen Porenkanals und z [m] als Eindringlänge in den einzelnen Porenkanal.

Die Eindringlänge hängt jedoch nicht nur von der Druckdifferenz, der Porenöffnungsweite des anstehenden Gesteins und der Korngröße der Partikel der Suspension ab, sondern wird ebenso von der Viskosität der Suspension und den physikochemischen Wechselwirkungen an der Oberfläche der Mineralphasen beeinflusst.

Zur Beurteilung der Penetrierbarkeit hat sich das Terzaghi-Filterkriterium N [-] bewährt (Burwell 1958):

$$N = \frac{d_{15,F}}{d_{85,S}} \quad (4-3)$$

wobei $d_{15,F}$ der Siebdurchgang des Gesteins bei 15 % und $d_{85,S}$ der Siebdurchgang der Suspension bei 85 % des Massenanteils ist.

Um auch den Einflüssen der Suspension gerecht zu werden, erfolgte eine Erweiterung des Terzaghi-Filterkriteriums durch Akbulut & Saglamer (2002):

$$N = \frac{d_{10,F}}{d_{90,S}} * k_1 \frac{W}{FC} + k_2 \frac{P}{d_{r,F}} \quad (4-4)$$

wobei $d_{10,F}$ der Siebdurchgang des Gesteins bei 10 % und $d_{90,S}$ der Siebdurchgang der Suspension bei 90 % des Massenanteils, W/F das Wasser/Feststoffverhältnis der Suspension, FC [%] Siebdurchgang des Gesteine < 0,6 mm, P [kPa] der hydrostatische Druck in der Suspension und $d_{r,F}$ [-] die relative Dichte des Gesteins (bzw. die bezogene Lagerungsdichte $I_D = (\max_e - e) / (\max_e - \min_e)$) ist und $k_1 = 0,5$ und $k_2 = 0,01$ [1/kPa] empirische Konstanten aus den durchgeführten Experimenten der Autoren sind.

Da die Grenzen der Penetrierbarkeit empirisch ermittelt wurden, liegen keine eindeutigen Werte für N vor. Zahlreiche Autoren nennen eine deutlich wahrnehmbare Penetration ab einem Terzaghi-Verhältnis von d_{15}/d_{85} $N > 25$ bzw. nach der erweiterten Gleichung von Akbulut & Saglamer (2002) bei $N > 11$, für $N \leq 5$ hingegen ist mit einer Oberflächenfiltration zu rechnen. Liegt N zwischen 5 und 25 (11) sind die Verhältnisse für eine Tiefenfiltration gegeben (Domes 2015). In Tabelle 4-1 sind die Grenzwerte zur Injizierbarkeit von Suspensionen in Lockergesteinen gegenübergestellt.

Tabelle 4-1: Grenzwerte zur Injizierbarkeit von Suspensionen in Lockergesteinen (nach Kainrath 2017)

Injizierbarkeit		gegeben	unsicher	nicht gegeben
Autor	Verhältnis			
Kutzner (1991)	d_{15}/d_{85}	> 40	-	-
Mitchell (1970)	d_{15}/d_{85}	> 24	24 – 11	< 11
Sherard & Dunningan (1984)	d_{15}/d_{85}	> 24	24 – 9	< 9
Kravetz (1958)	d_{15}/d_{85}	> 20	20 – 5	< 5
King & Busch (1961)	d_{10}/d_{90}	> 10	-	-
Donel (1990)	d_{10}/d_{90}	> 10	-	-
Bell (1982)	d_{10}/d_{100}	> 10	-	-

Die Voraussetzung für die Penetration einer Suspension in das anstehende Gestein ist in jedem Fall dann gegeben, wenn ein hinreichender Anteil an Poren zur Verfügung steht, deren Porenöffnungsweite groß genug ist, dass die Suspensionspartikel diese passieren können. Aufgrund dieser Rahmenbedingung wurde von Schulze (1992) sowie Schuler & Brauns (2000) das Konzept der Porenengstellenverteilung (PEV) zur Beurteilung der Injizierbarkeit von Suspensionen eingeführt (Kuk 2004).

Auf der Grundlage, dass ein Gestein injizierbar sein müsste, wenn das größte Suspensionspartikel $d_{100,s}$ kleiner als die kleinste Porenöffnungsweite $d_{0,p}$ des Gesteins ist, hat Schulze (1992) folgendes Injektionskriterium entwickelt:

$$N_i = \frac{d_{0,p}}{d_{100,s}} \quad (4-5)$$

wobei die Injizierbarkeit als gegeben gilt, wenn $N_i \geq 1$ ist. Hierbei kann die kleinste Porenöffnungsweite aus dem geometrischen Bezug dreier Körner der kleinsten auftretenden Kornklasse des Gesteins aus der Massenverteilungskurve d_i wie folgt abgeschätzt werden:

$$d_{0,p} = 0,155d_i \quad (4-6)$$

Da in diesem Ansatz nur die theoretisch denkbar dichtestete Lagerung der Körner vorausgesetzt wird, wird die Penetrationsfähigkeit der Suspension unterschätzt (Kuk 2004).

Bei einem Gestein mit einem Terzaghi-Verhältnis von $N > 25$ penetriert die Suspension in den Porenraum und verändert so im Penetrationsbereich die hydraulischen Bedingungen. Darüber hinaus kann die Suspension mit dem Grundwasser transportiert werden, solange der Hydratationsprozess die Viskosität noch nicht nennenswert erhöht hat. Die Eindringtiefe s [m] kann mit ausreichender Genauigkeit nach DIN 4126 (2013) wie folgt berechnet werden:

$$s = \frac{\Delta P d_{10}}{2\tau_s} \quad (4-7)$$

mit ΔP [Pa] als Druckdifferenz zwischen Suspension und Formationsdruck, d_{10} [m] als Siebdurchgang des Gesteins bei 10 % des Massenanteils und τ_s [Pa] als Fließgrenze der Suspension.

4.2. Rheologie

Die Rheologie der Suspension der Verfüllmaterialien ist eine grundlegende Einflussgröße auf das EWS-System. Um der Komplexität dieses Parameters Rechnung zu tragen wird im Nachfolgenden auf einige Grundlagen der Rheologie, die wichtigsten rheologischen Phänomene und die wichtigsten zu ihrer Beobachtung benutzten Messverfahren eingegangen. Die Rheologie (griechisch: rheos = der Fluss) ist die Lehre von der Deformation und des Fließens der Stoffe unter der Einwirkung äußerer Kräfte.

4.2.1. Grundbegriffe der Rheologie

Ein einfaches Modell zur Veranschaulichung rheologischer Größen ist das in Abbildung 4-1 dargestellte Zwei-Platten-Modell. Zwischen zwei parallelen Platten im Abstand befindet sich eine viskose Substanz. Um eine der beiden Platten gegen die andere mit der Geschwindigkeit v parallel zu verschieben muss eine Kraft F aufgewendet werden. Im Idealfall haftet die Substanz an beiden Platten und es stellt sich eine laminare Schichtenströmung ein. Stellt sich eine turbulente Strömung ein, können keine rheologischen Größen erfasst werden.

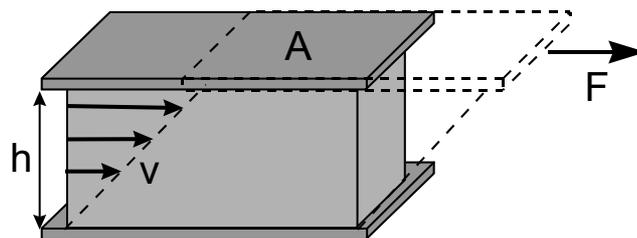


Abbildung 4-1: Das Zwei-Platten-Modell zur Veranschaulichung rheologischer Größen zeigt eine schematische Darstellung der Scherung einer viskosen Substanz mit den auftretenden physikalischen Größen

Die Schubspannung ist die flächenbezogene Kraft, die auf den Stoff einwirkt und die Verformung hervorruft:

$$\text{Schubspannung:} \quad \tau = \frac{F}{A} \text{ [Pa]} \quad \begin{array}{l} F: \text{Kraft in [N]} \\ A: \text{Fläche in [m}^2\text{]} \end{array} \quad (4-8)$$

Die Scherrate oder das Schergefälle ist die differentielle Änderung der Strömungsgeschwindigkeit mit dem Abstand von einer Platte. Für den Fall eines ideal anhaftenden Stoffs und eines linearen Schergefälles ist die Scherrate konstant:

$$\text{Scherrate:} \quad \dot{\gamma} = \frac{v}{h} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad \begin{array}{l} v: \text{Geschwindigkeit in [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \\ h: \text{Abstand in [m]} \end{array} \quad (4-9)$$

Die Viskosität gibt die Abhängigkeit der Schubspannung von der Scherrate an. Da für die wenigsten Stoffe ein linearer Zusammenhang besteht ist die Viskosität nicht konstant, sondern ebenfalls von der Scherrate abhängig.

dynamische Viskosität: $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ τ : Schubspannung in [Pa] (4-10)
 $\dot{\gamma}$: Scherrate in [s⁻¹]

4.2.2. Belastungsabhängiges Fließverhalten

Newton'sches Fließverhalten

Die Viskosität einer idealviskosen (Newton'schen) Substanz ist unabhängig von der Belastung, d. h. die Schergeschwindigkeit steigt linear mit der vorgegebenen Schubspannung, siehe Abbildung 4-2. Newton'sches Fließverhalten tritt auf, wenn keine oder nur sehr geringen Wechselwirkungen zwischen den Molekülen bzw. Partikeln eines Stoffs auftreten.

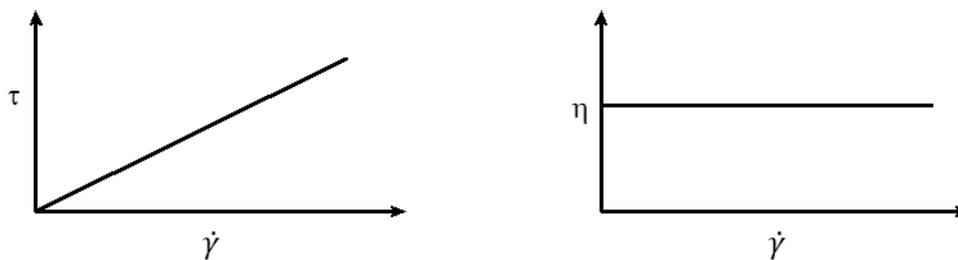


Abbildung 4-2: Fließkurve (links) und Viskositätskurve (rechts) einer newton'schen Flüssigkeit

Pseudoplastisches Fließverhalten

Bei pseudoplastischen Substanzen ist die Viskosität abhängig von der Belastungshöhe, dabei nimmt die Viskosität mit zunehmender Belastungshöhe ab (Abbildung 4-3). Die Viskosität einer pseudoplastischen Substanz ist nicht konstant, sondern abhängig von der Scherrate.

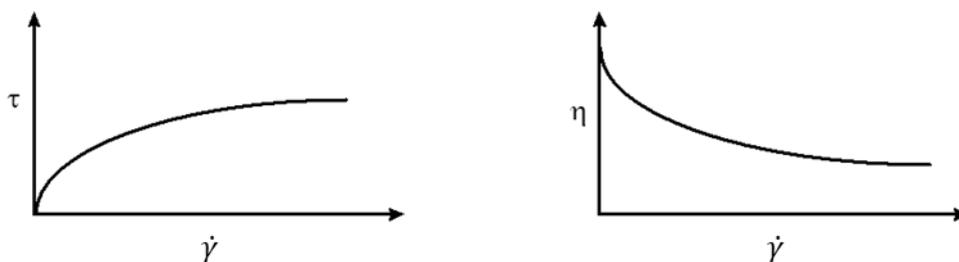


Abbildung 4-3: Fließ- und Viskositätskurven einer pseudoplastischen Substanz

Erklären kann man das pseudoplastische Verhalten einfach am Beispiel einer Polymerschmelze. Im Ruhezustand nehmen die Makromoleküle einen energetisch günstigen Zustand ein, sie liegen meist ineinander verschlungen vor. Beim Scheren der Probe trennen sich die Makromoleküle und liegen einzeln vor, dadurch können sie leichter in Fließrichtung bewegt werden und die Viskosität sinkt. Man spricht daher auch oft von strukturviskosem Verhalten. Weitere Ursachen für pseudoplastisches Verhalten können sein: Orientierung von nadelförmigen Partikeln in Fließrichtung und Auflösung von Agglomeraten.

Pseudoplastisches Verhalten ist ein belastungsabhängiges Phänomen und darf nicht mit Thixotropie gleichgesetzt werden, da es sich dort um eine Änderung der Viskosität mit der Belastungsdauer, bei konstanter Belastung handelt.

Plastisches Fließverhalten - Substanzen mit Fließgrenze

Substanzen mit Fließgrenze beginnen erst zu fließen, wenn die von außen angelegten Kräfte größer sind als die internen Strukturkräfte. Unterhalb der Fließgrenze verhält sich der Stoff elastisch, d. h. es treten nur kleine reversible Verformungen auf. Zur Beschreibung der Fließgrenze gibt es verschiedene Modelle:

Nach Bingham verhalten sich die Stoffe nach Überschreiten der Fließgrenze wie idealviskose Flüssigkeiten, d. h. die Schergeschwindigkeit steigt linear mit der Schubspannung an. Solche Stoffe bezeichnet man als Bingham-Medien (Abbildung 4-4).

Nach Casson steigt die Schergeschwindigkeit mit zunehmender Schubspannung langsamer an, d. h. die sogenannten Casson'schen Stoffe zeigen oberhalb der Fließgrenze pseudoplastisches Fließverhalten. Für Baustoffe wird häufig das Modell nach Bingham benutzt.

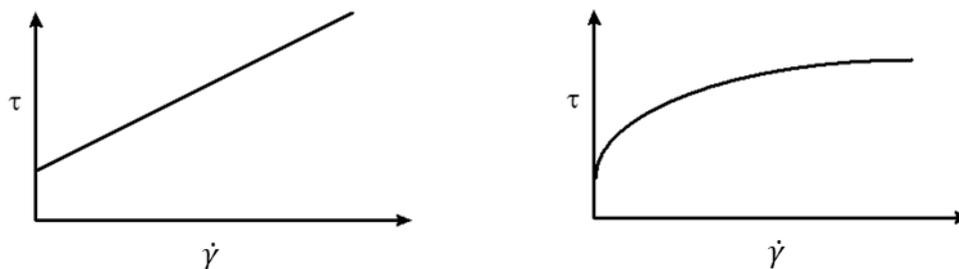


Abbildung 4-4: Fließkurven eines Bingham'schen Stoffes (links) und eines Casson'schen Stoffes (rechts)

4.2.3. Zeitabhängiges Fließverhalten

Neben der Belastungshöhe hat auf das Fließverhalten von Stoffen oft auch die Dauer der Belastung einen Einfluss. Die am häufigsten beobachteten Phänomene sind dabei die Abnahme der Viskosität während der Belastungsphase und ein Strukturaufbau während der Ruhephase.

Thixotropie

Thixotropes Verhalten bedeutet den Abbau von Strukturen mit zunehmender Belastungsdauer (B) und bewirkt eine Abnahme der Viskosität bei konstanter Belastungshöhe. Während der Entlastungsphase (E) bauen sich die ursprünglichen Strukturen mehr oder weniger schnell wieder auf. Thixotropes Verhalten ist somit ein reversibler Vorgang (Abbildung 4-5).

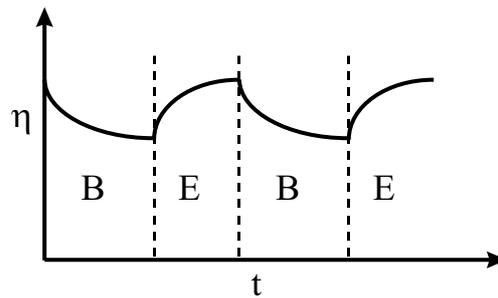


Abbildung 4-5: Änderung der Viskosität einer thixotropen Substanz mit der Zeit beim Wechsel zwischen Belastungsphase (B) und Entlastungsphase (E)

Die Thixotropie lässt sich nur bei konstanter Belastung erfassen, da sie laut Definition die Abhängigkeit des Fließverhaltens von der Belastungsdauer bei konstanter Belastung beschreibt. Beispiele für thixotrope Substanzen sind Paraffinöl, Ketchup und viele Baustoffe.

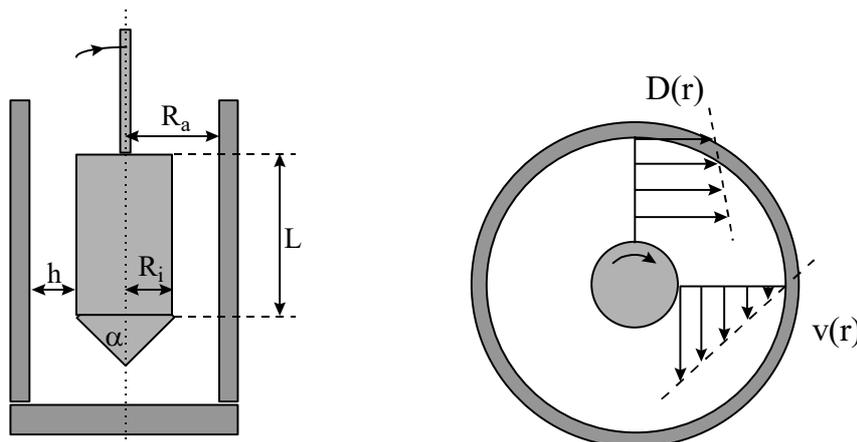
4.2.4. Messverfahren/-technik

In der Praxis verwendet man bei rheologischen Messungen rotierende Systeme wie Kegel, Platten oder Zylinder (Abbildung 4-6), statt wie im Zwei-Platten-Modell, zwei Platten linear zu verschieben. Dies ist technisch wesentlich leichter zu realisieren.

Da die runden Zylinderwandflächen als infinitesimal kleine, ebene Flächen betrachtet werden können, ist das vorgestellte Zwei-Platten-Modell auch auf diese Messgeometrie anwendbar. Die Fläche A der bewegten Platte im Zwei-Platten-Modell entspricht hier der rotierenden Zylinderfläche:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$$

$$\text{mit } R_i \leq r \leq R_a$$



- R_i Radius des Messzylinders in [m]
- R_a Innenradius des Messbechers in [m]
- L Länge des Zylinders in [m]
- h Breite des Messspalts in [m]
- α Öffnungswinkel des Kegels auf der Unterseite des Zylinders in [°]
- $D(r)$ Scherrate im Messspalt in [s^{-1}]
- $v(r)$ Umfangsgeschwindigkeit in [$m \cdot s^{-1}$]
- r Abstand einer Schicht von der Drehachse in [m]

Abbildung 4-6: Messgeometrie des koaxialen Zylindermesssystems (links) und Verteilung von Umfangs- und Schergeschwindigkeit im Messspalt (rechts, vergrößert dargestellt)

Die bewegende Kraft F im Zwei-Platten-Modell wird durch das Antriebsmoment M hervorgerufen:

$$F = \frac{M}{r} \quad \text{mit } R_i \leq r \leq R_a \quad (4-11)$$

Für die Schubspannung τ folgt daraus:

$$\tau(r) = \frac{F}{A} = \frac{M}{2\pi \cdot L \cdot r^2} \quad (4-12)$$

Im coaxialen Zylindersmesssystem wird eine lineare Schergeschwindigkeitsverteilung $D(r)$ angenommen. Um dies zu realisieren darf die Größe des Messspalts im Verhältnis zum Becherinnenradius R_i einen bestimmten Wert nicht überschreiten.

In der Praxis bedeutet dies:

$$\frac{R_a}{R_i} = 1,1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{h}{R_a} = 0,0909 \quad (\text{nach DIN 53019}) \quad (4-13)$$

Der Plattenabstand im Zwei-Platten-Modell entspricht hier der Breite h des Messspalts zwischen den Zylindern. Die Geschwindigkeit der bewegten Platte entspricht im rotierenden System der Umfangsgeschwindigkeit $v(r)$.

$$v(r) = \omega \cdot r \quad \text{mit } \omega: \text{ Winkelgeschwindigkeit in Rad} \quad (4-14)$$

Damit gilt im Messspalt für die Schergeschwindigkeit die folgende Beziehung:

$$D(r) = \frac{v}{h} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{2 \cdot R_i^2 \cdot R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \cdot \omega \quad (4-15)$$

Für die Viskosität η ergibt sich damit die folgende Beziehung, in der die Messsystemkonstante G_z nur von der Geometrie des Messsystems (R_a , R_i , L) abhängig ist.

$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{R_a^2 - R_i^2}{4\pi \cdot L \cdot R_a^2 \cdot R_i^2} \cdot \frac{M}{\omega} = G_z \cdot \frac{M}{\omega} \quad (4-16)$$

In der Praxis ist weiterhin noch ein Widerstandsbeiwert für die kegelförmige Spitze des Messzylinders zu berücksichtigen, auf den hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Oszillation

Im Oszillationsversuch bewegt man eine der beiden Platten nicht kontinuierlich in eine Richtung sondern deformiert sie mit einer definierten Frequenz und Amplitude (Abbildung 4-7). Mit Hilfe des Oszillationsversuchs lassen sich mehr Informationen über viskoelastische Stoffe erhalten als

im Rotationsversuch. Zudem ist diese Methode weitgehend zerstörungsfrei, da bestehende Strukturen nicht durch die Scherkräfte aufgebrochen werden. Man rüttelt nur leicht an den bestehenden Strukturen statt sie, wie im Rotationsversuch zu zerbrechen.

Bei einer schwingenden Beanspruchung durch eine Kraft F (bzw. einer Schubspannung τ) erfährt der untersuchte Stoff die Deformation γ . Dabei darf in der Praxis der linear-viskoelastische Bereich nicht verlassen werden, d. h. die Deformation muss so klein bleiben, dass keine Zerstörung von Strukturen auftritt. Der Oszillationsversuch ist daher sehr gut geeignet um den Strukturaufbau einer thixotropen Substanz während der Entlastungsphase zu beobachten.

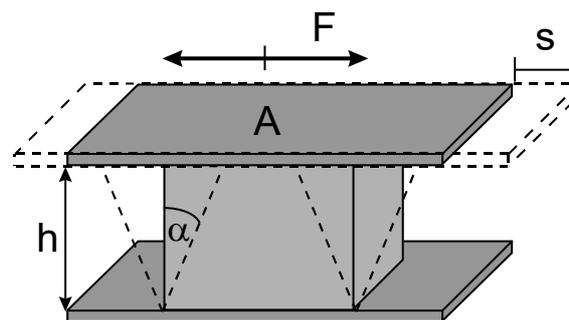


Abbildung 4-7: Veranschaulichung des Schwingungsversuchs mit dem modifizierten Zwei-Platten-Modell. Die oszillierende Kraft F bewegt die obere Platte hin und her und erzeugt eine ebenfalls oszillierende Verschiebung s der Platte

Die Deformation ist ein Maß für die Auslenkung der Substanz aus der Ruhelage, ähnlich wie bei Pendeln. Die Deformation ist eine dimensionslose Größe.

$$\text{Deformation: } \gamma = \tan \alpha = \frac{s}{h} \quad [] \quad \begin{array}{l} \alpha: \text{Deformationswinkel in } [-] \\ s: \text{Verschiebung in [m]} \\ h: \text{Abstand in [m]} \end{array} \quad (4-17)$$

Den Maximalwert der Schubspannung während der Oszillation bezeichnet die Schubspannungsamplitude: τ_0 .

Den Maximalwert der Deformation während der Oszillation bezeichnet die Deformationsamplitude: γ_0 .

Die Schwingungskurve der Deformation ist nur bei idealelastischen Substanzen (nach Hooke) in Phase mit der Schwingungskurve der vorgegebenen Kraft (bzw. Schubspannung), für alle anderen Stoffe ergibt sich eine Verzögerung der resultierenden Deformation gegenüber der sie auslösenden schwingenden Beanspruchung. Dieser Gangunterschied zwischen Schubspannungskurve und Deformationskurve wird als Phasenverschiebungswinkel δ bezeichnet (Abbildung 4-8).

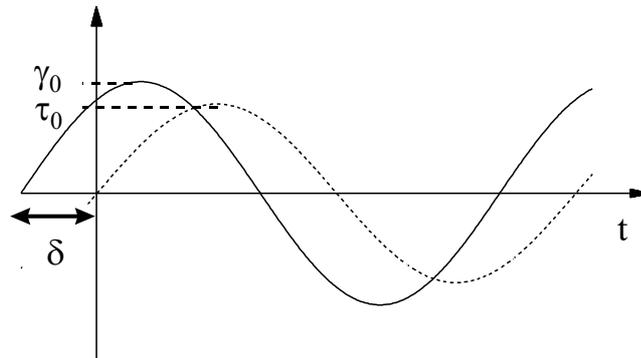


Abbildung 4-8: Ein beispielhafter Verlauf von Schubspannungs- und Deformationskurve

Der Speichermodul ist ein Maß für die reversibel von der Substanz gespeicherte und rückgewinnbare Deformationsenergie. Er charakterisiert somit die elastischen Eigenschaften einer Substanz.

$$\text{Speichermodul: } G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad [\text{Pa}] \quad \begin{array}{l} \tau_0: \text{ Schubspannungsamplitude in [Pa]} \\ \gamma_0: \text{ Deformationsamplitude in [-]} \\ \delta: \text{ Phasenverschiebungswinkel in [-]} \end{array} \quad (4-18)$$

Der Verlustmodul stellt ein Maß für die irreversibel von der Substanz an die Umgebung abgegebene und damit verlorene Energie dar. Er charakterisiert somit die viskosen Eigenschaften der Probe.

$$\text{Verlustmodul: } G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad [\text{Pa}] \quad \begin{array}{l} \tau_0: \text{ Schubspannungsamplitude in [Pa]} \\ \gamma_0: \text{ Deformationsamplitude in [-]} \\ \delta: \text{ Phasenverschiebungswinkel in [-]} \end{array} \quad (4-19)$$

Der Verlustfaktor gibt das Verhältnis zwischen dem viskosen und elastischen Anteil der Probe an.

$$\text{Verlustfaktor: } \tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad [] \quad \begin{array}{l} \delta: \text{ Phasenverschiebungswinkel in [-]} \\ G'': \text{ Verlustmodul [Pa]} \\ G': \text{ Speichermodul in [Pa]} \end{array} \quad (4-20)$$

Für einen ideal elastischen Körper gilt dabei:

$$G'' = 0 \text{ Pa} \Rightarrow \tan \delta = 0 \quad (4-21)$$

Für einen ideal viskosen Körper gilt:

$$G' = 0 \text{ Pa} \Rightarrow \tan \delta \rightarrow \infty \quad (4-22)$$

4.3. Magnetismus (AP. C)

4.3.1. Einführung

Der Magnetismus bzw. das magnetische Feld äußert sich ähnlich wie ein Gravitationsfeld oder ein elektrisches Feld in der Kraftwirkung. Besonders auffällig ist diese an Eisenteilen in der Nähe von Naturmagneten oder stromdurchflossenen Leitern. Neben solchen direkt zu beobachtenden äußeren Kräften kann das magnetische Feld auch Kräfte im inneren elektrischer Leiter bewirken. Diese nicht direkt als mechanische Kräfte messbaren Wirkungen verursachen Ladungstrennungen, die als elektrische Spannungen in Erscheinung treten. Üblicherweise werden sie als Induktionsvorgang beschrieben, d.h. das magnetische Feld kann elektrische Spannungen induzieren. Man unterscheidet also zwei Wirkungen des magnetischen Feldes, die Kraftwirkungen und die Induktionswirkungen (Moeller et al. 2008).

Alle hier beschriebenen Wirkungen können gleichermaßen in der Umgebung elektrischer Ströme als auch in der von Naturmagneten beobachtet werden. Man nimmt nach dem heutigen Kenntnisstand die Bewegung elektrischer Ladungen als die primäre Ursache magnetischer Erscheinungen an. In Naturmagneten handelt es sich um die Eigenbewegung der Ladungsträger im atomaren Verband, bei fließenden Strömen um die makroskopisch messbare Bewegung freier Ladungsträger (z.B. freie Elektronen im metallischen Leiter) (Moeller et al. 2008).

4.3.2. Magnetische Dipole

Es ist hilfreich, sich magnetische Kräfte mithilfe von magnetischen Feldern zu veranschaulichen. Imaginäre Feldlinien geben die Richtung der Kraftwirkung an Punkten in der Umgebung der Quelle des Feldes an (Callister & Rethwisch 2013). Die als Kraftlinien dargestellten Magnetfelder, die durch eine Spule und durch einen Stabmagneten erzeugt werden, sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

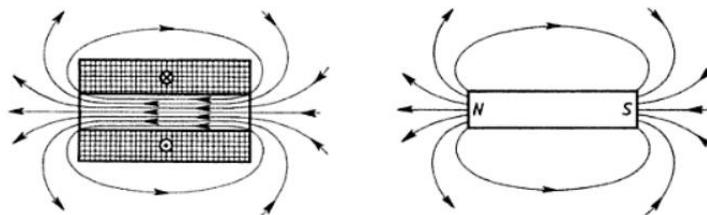


Abbildung 4-9: Feldlinien einer langen zylindrischen Spule mit eng aneinander liegenden Windungen (links) und eines geometrisch vergleichbaren Naturmagneten (rechts) (nach Moeller et al. 2008)

In magnetischen Werkstoffen existieren magnetische Dipole, die sich in mancher Hinsicht ähnlich wie elektrische Dipole verhalten. Magnetische Dipole kann man sich in Analogie zu positiven und negativen Ladungen als kleine Stabmagneten mit Nord- und Südpol vorstellen, wobei das magnetische Moment (nähere Erläuterung im nächsten Kap. 4.3.3) durch Pfeile dargestellt wird (Abbildung 4-10). In einem Magnetfeld führt die Wechselwirkung zwischen Feld und Dipol zu einem Drehmoment, das einen frei beweglichen Dipol in Feldrichtung ausrichtet. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Orientierung einer Kompassnadel in Richtung des Erdmagnetfelds (Callister & Rethwisch 2013)

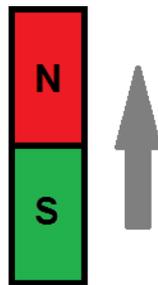


Abbildung 4-10: Durch einen Pfeil gekennzeichnetes magnetisches Moment (erstellt nach Callister & Rethwisch 2013)

4.3.3. Magnetisches Moment

Die makroskopisch beobachtbaren magnetischen Eigenschaften in Werkstoffen sind Ausdruck der magnetischen Momente, die auf einzelne Elektronen zurückführbar sind. Jedes Elektron eines Atoms erzeugt aus zwei Gründen magnetische Momente. Erstens ist dies seine Bahnbewegung: Durch die ständige Bewegung um den Kern kann das geladene Elektron als kleine Stromschleife betrachtet werden, die ein sehr kleines Magnetfeld erzeugt und der ein magnetisches Moment in Richtung der Rotationsachse zugeordnet werden kann. Diese Überlegung ist in Abbildung 4-11 (a) veranschaulicht.

Zweitens kann ein Elektron als ausgedehnter geladener Körper betrachtet werden, der um eine Achse rotiert (also einen Eigendrehimpuls oder Spin besitzt) und dadurch ein zusätzliches magnetisches Moment erzeugt, das die Richtung der Spinachse inne hat (Abbildung 4-11 (b)).

Für das mit dem Elektronenspin verknüpfte magnetische Moment sind nur zwei Richtungen zulässig: Parallel (Spin aufwärts) oder antiparallel (Spin abwärts) zur Rotationsachse. So kann man sich jedes Elektron eines Atoms als kleinen Magneten mit permanentem magnetischen Bahn- und Spinmoment vorstellen (Callister & Rethwisch 2013).

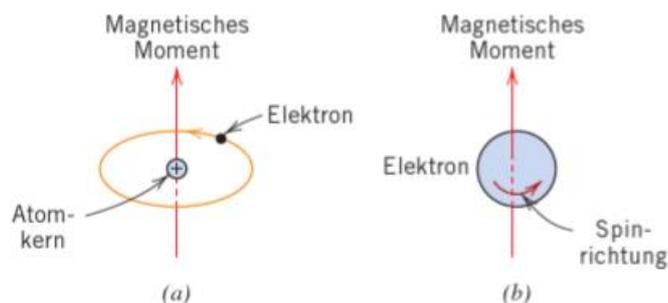


Abbildung 4-11: Veranschaulichung der magnetischen Momente, hervorgerufen (a) durch die Bahnbewegung eines Elektrons um einen Atomkern und (b) durch ein rotierendes Elektron (aus Callister & Rethwisch 2013)

In jedem einzelnen Atom heben sich die Bahndrehimpulse und die entsprechenden magnetischen Momente der Elektronenpaare auf. Gleiches gilt für die Spinmomente. Zum Beispiel gleicht das Moment eines Elektrons mit parallelem Spin dasjenige eines Elektrons mit antiparallelem

Spin aus. Das effektive magnetische Moment eines Atoms ist folglich die Summe der magnetischen Momente seiner Elektronen unter Berücksichtigung sowohl der Bahn- als auch der Spinanteile, sowie gegenseitige Kompensationseffekte. Für Atome mit vollständig gefüllten Elektronenschalen und –unterschalen ist das resultierende magnetische Moment null, d.h. Bahn- und Spinmomente heben sich vollständig auf. Daher können aus solchen Atomen aufgebaute Stoffe nicht dauerhaft magnetisiert werden. Zu dieser Kategorie von Stoffen gehören Edelgase (He, Ne, Ar usw.) sowie einige Stoffe mit ionischer Bindung (Callister & Rethwisch 2013).

4.3.4. Magnetische Feldvektoren

Bevor im folgenden Kap. 4.3.5 die drei Hauptformen des Magnetismus näher erläutert werden, müssen zuerst einige Größen zu deren Beschreibung definiert werden.

Magnetisches Verhalten kann durch verschiedene Feldvektoren beschrieben werden. Ein von außen einwirkendes magnetisches Feld wird mit H bezeichnet. Im Inneren einer Zylinderspule mit N dicht benachbarten Windungen und einer Gesamtlänge l , die von einem Strom der Stärke I durchflossen wird (Abbildung 4-12) entsteht ein Magnetfeld der Stärke (Callister & Rethwisch 2013):

$$H = \frac{NI}{l} \quad (4-23)$$

Das Diagramm zeigt zwei Spulenansichten. Links (a) ist eine Spule im Vakuum dargestellt, bestehend aus N Windungen über einer Länge l , durch die ein Strom I fließt. Die magnetische Flussdichte ist als $B_0 = \mu_0 H$ bezeichnet. Rechts (b) ist eine Spule mit einem Kern aus einem Material mit Permeabilität μ dargestellt, ebenfalls mit N Windungen und Strom I . Die magnetische Flussdichte ist hier $B = \mu H$. In beiden Fällen ist das Magnetfeld H durch den Strom I erzeugt.

Abbildung 4-12: (a) Zylinderförmige Spule im Vakuum und (b) Zylinderförmige Spule mit Werkstoff (modifiziert nach Guy 1976)

Die Magnetfelder, die durch eine Spule und durch einen Stabmagneten (siehe Abbildung 4-9) erzeugt werden, werden als H -Felder bezeichnet. Die Einheit von H ist Ampere pro Meter ($A \cdot m^{-1}$). Die magnetische Flussdichte B (gelegentlich noch als magnetische Induktion bezeichnet) ist die Flächendichte des magnetischen Flusses, der durch ein Flächenelement eines Stoffes tritt, das einem äußeren Feld H ausgesetzt wird. Die SI-Einheit von B ist das Tesla (T), oder auch Weber pro Quadratmeter ($Wb \cdot m^{-2}$). B und H sind Feldvektoren, gekennzeichnet durch jeweils einen skalaren Betrag und eine Richtung im Raum (Callister & Rethwisch 2013).

Magnetische Feldstärke und Flussdichte sind über die Beziehung

$$B = \mu H \quad (4-24)$$

miteinander verknüpft. Die Größe μ wird als Permeabilität bezeichnet. Die Permeabilität ist eine Eigenschaft des Werkstoffs, der dem H-Feld ausgesetzt ist und in dem B gemessen wird, wie in Abbildung 4-12 (b) veranschaulicht. Die Dimensionen der Permeabilität sind Weber pro Ampere-Meter ($\text{Wb A}^{-1} \text{m}^{-1}$) oder Henry pro Meter (H m^{-1}) (Callister & Rethwisch 2013).

Im Vakuum gilt:

$$B_0 = \mu_0 H \quad (4-25)$$

Wobei die Permeabilität des Vakuums μ_0 als universelle Konstante den Wert $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ besitzt. Die Größe B_0 ist die magnetische Flussdichte im Vakuum (siehe auch Abbildung 4-12 (a)) (Callister & Rethwisch 2013).

Zur Beschreibung der magnetischen Eigenschaften von Festkörpern können verschiedene Größen verwendet werden. Eine dieser Größen ist das Verhältnis der Permeabilität in einem Werkstoff zur Permeabilität im Vakuum (Callister & Rethwisch 2013):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4-26)$$

Die dimensionslose Größe μ_r wird als relative Permeabilität (oder Permeabilitätszahl) bezeichnet. Permeabilität und relative Permeabilität sind ein Maß dafür, in welchem Grad ein Werkstoff magnetisierbar ist, mit anderen Worten: dafür, wie leicht durch ein äußeres Magnetfeld H im Werkstoff selbst ein B-Feld induziert werden kann (Callister & Rethwisch 2013).

Eine andere Feldgröße, die Magnetisierung M eines Festkörpers, ist wie folgt definiert (Callister & Rethwisch 2013):

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (4-27)$$

In einem Feld H versuchen die im Werkstoff vorliegenden magnetischen Momente, sich in Feldrichtung anzuordnen wobei sie mit ihren eigenen Feldern das äußere Feld verstärken. Der Ausdruck $\mu_0 M$ in (4-27) ist ein Maß für diesen Beitrag (Callister & Rethwisch 2013).

Der Wert der Magnetisierung ist proportional zum äußeren Feld (Callister & Rethwisch 2013):

$$M = \chi_m H \quad (4-28)$$

Der dimensionslose Proportionalitätsfaktor χ_m wird als magnetische Suszeptibilität bezeichnet. Magnetische Suszeptibilität und relative Permeabilität stehen in folgender Beziehung zueinander (Callister & Rethwisch 2013):

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (4-29)$$

4.3.5. Dia-, Para- und Ferromagnetismus

Der **Diamagnetismus** ist eine sehr schwache Form des Magnetismus, die nur in einem äußeren Magnetfeld auftritt und nicht von dauerhaftem Bestand ist. Er wird dadurch hervorgerufen, dass das äußere Feld die Bahnbewegung der Elektronen beeinflusst. Das dadurch induzierte magnetische Moment ist extrem klein und entgegengesetzt zum äußeren Feld gerichtet. Daher ist die relative Permeabilität μ_r kleiner als eins (jedoch nur geringfügig) und die magnetische Suszeptibilität ist negativ. Das bedeutet, dass die magnetische Flussdichte B in einem diamagnetischen Festkörper geringer ist als im Vakuum. Die Suszeptibilität χ_m liegt für diamagnetische Festkörper in der Größenordnung -10^5 . Werden diamagnetische Werkstoffe in das Feld eines starken Elektromagneten gebracht, wirkt auf sie eine Kraft in Richtung abnehmender Feldstärke; der Körper wird aus dem Feld heraus in Richtung schwacher Feldstärke gedrängt (Callister & Rethwisch 2013).

Abbildung 4-13 (a) zeigt schematisch die Konfiguration atomarer magnetischer Dipole in einem diamagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld. Es ist zu beachten, dass die Pfeile in der Abbildung atomare magnetische Dipolmomente darstellen, während sie in der vorangegangenen Diskussion die Momente einzelner Elektronen bezeichnet haben (Callister & Rethwisch 2013).

Diamagnetismus tritt in allen Stoffen auf. Er ist aber so schwach, dass er nur beobachtet werden kann, wenn keine anderen Formen des Magnetismus vorliegen. Der Diamagnetismus hat keinerlei praktische Bedeutung (Callister & Rethwisch 2013).

Die Atome einer Reihe von festen Stoffen besitzen permanente Dipolmomente, da sich die aus Bahnbewegung und Spin der einzelnen Elektronen resultierenden magnetischen Momente nicht vollständig kompensieren. Ohne ein äußeres Magnetfeld sind die Richtungen der atomaren magnetischen Momente zufällig verteilt, sodass in einer makroskopischen Probe keine Magnetisierung beobachtbar ist. Diese atomaren Dipole können jedoch ihre Richtung ändern: **Paramagnetismus** entsteht, wenn sie sich unter dem Einfluss eines äußeren Feldes H in eine Vorzugrichtung orientieren, wie es in Abbildung 4-13 (b) dargestellt ist. Auf die einzelnen magnetischen Dipole wirkt allein das äußere Feld. Zwischen benachbarten Dipolen selbst besteht keine Wechselwirkung. Da sich die Dipole in Richtung des äußeren Feldes drehen, verstärken sie es und die relative Permeabilität μ_r wird größer als 1. Dementsprechend nimmt die magnetische Suszeptibilität relativ kleine, aber im Gegensatz zum Diamagnetismus positive Werte an. Suszeptibilitäten paramagnetischer Werkstoffe liegen im Bereich von etwa 10^{-5} bis 10^{-2} (Callister & Rethwisch 2013). Sowohl diamagnetische als auch paramagnetische Stoffe werden als unmagnetisch angesehen, da eine Magnetisierung nur in einem äußeren Feld H auftritt. Außerdem unterscheidet sich die magnetische Flussdichte in ihrem Inneren in beiden Fällen kaum vom Wert im Vakuum (Callister & Rethwisch 2013).

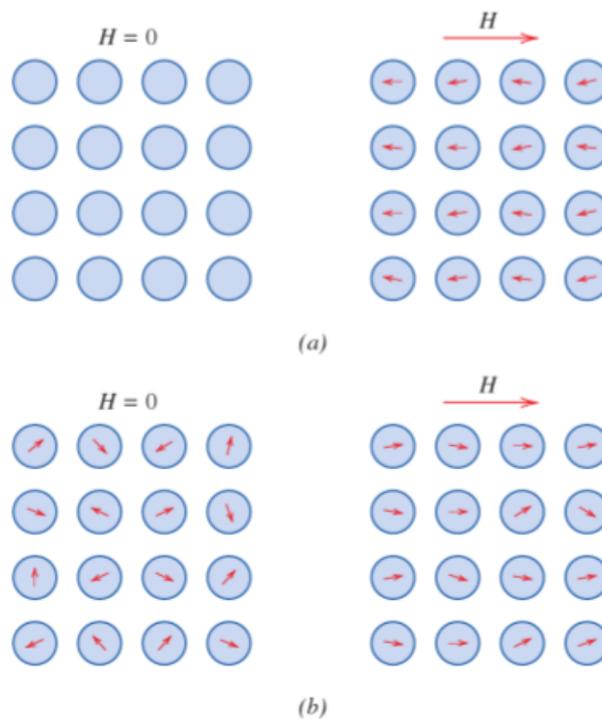


Abbildung 4-13: (a) Anordnung atomarer Dipole in einem diamagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld. Ohne äußerem Feld existieren keine Dipole. Durch ein äußeres Feld werden Dipole induziert, die sich antiparallel zur Feldrichtung orientieren. (b) Anordnung atomarer Dipole in einem paramagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld (aus Callister & Rethwisch 2013)

Einige metallische Werkstoffe weisen auch ohne äußeres Feld ein dauerhaftes magnetisches Moment auf und haben eine sehr große und permanente Magnetisierung. Diese als **Ferromagnetismus** bezeichnete Verhalten tritt bei den Übergangsmetallen Eisen, Kobalt, Nickel sowie bei einigen Seltenerdelementen wie z.B. Gadolinium (Gd) auf. Bei ferromagnetischen Werkstoffen werden Werte der magnetischen Suszeptibilität von bis zu 10^6 erreicht. Folglich gilt $H \ll M$ und (4-27) wird in guter Näherung zu (Callister & Rethwisch 2013):

$$B \cong \mu_0 M \quad (4-30)$$

Die dauerhaften magnetischen Momente in ferromagnetischen Stoffen haben ihre Hauptursache aufgrund der spezifischen Struktur der Elektronenhülle in nichtkompensierten Elektronenspins. Im Vergleich dazu ist das mit der Bahnbewegung verknüpfte magnetische Moment niedrig. Zusätzlich führt in ferromagnetischen Werkstoffen die Wechselwirkung (Kopplung) der Spinmomente benachbarter Atome dazu, dass sich diese – selbst ohne äußeres Feld – parallel zueinander ausrichten. Dieses Verhalten ist in Abbildung 4-14 schematisch dargestellt. Der Ursprung dieser Kopplungskräfte ist noch nicht vollständig verstanden, aber es wird angenommen, dass sie ihre Ursache in der Elektronenstruktur der Metalle haben. Die parallele Ausrichtung der Spins erstreckt sich über vergleichsweise große Bereiche eines Kristalls, die als Domänen bezeichnet werden (Callister & Rethwisch 2013).

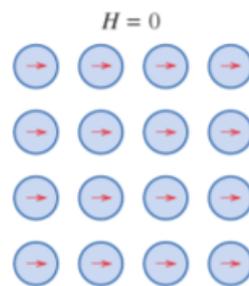


Abbildung 4-14: Schematische Darstellung der wechselseitigen Ausrichtung atomarer Dipole in einem ferromagnetischen Werkstoff, die auch in Abwesenheit eines äußeren Magnetfelds zu beobachten ist (aus Callister & Rethwisch 2013)

Die maximal mögliche Magnetisierung oder Sättigungsmagnetisierung M_s eines ferromagnetischen Werkstoffs entspricht einem Zustand, in dem alle magnetischen Dipole parallel zueinander und zum äußeren Feld ausgerichtet sind. In diesem Zustand erreicht die magnetische Flussdichte ihren Sättigungswert B_s (Callister & Rethwisch 2013).

4.3.6. Ferri- und Antiferromagnetismus

Neben dem technisch bedeutsamen Ferromagnetismus existieren noch zwei weitere (Sub-)Arten von Magnetismus, die sich durch die Existenz permanenter atomarer magnetischer Momente und durch die spontane Selbstausrichtung derselben auszeichnen: Ferri- und Antiferromagnetismus. Abbildung 4-15 zeigt bereits sehr deutlich den Unterschied zum Ferromagnetismus. Während bei diesem die spontane Selbstausrichtung der magnetischen Momente in ein und derselben Region stets parallel erfolgt, so bildet sie sich beim Antiferro- sowie beim Ferrimagnetismus antiparallel aus. Während der Antiferromagnetismus - aufgrund der gleichen Größe der entgegengesetzten magnetischen Momente - Suszeptibilitäten in der Größenordnung von Paramagneten aufweist, verhält sich der Ferrimagnet wie ein „schwacher“ ferromagnetischer Werkstoff. Magnetit sowie die meisten natürlich vorkommenden magnetischen Materialien sind dem Ferrimagnetismus zuzuordnen (Uni Wien 2018, Dearing 1994).



Abbildung 4-15: Ausrichtung der magnetischen Momente bei Ferro-, Antiferro- und Ferrimagnetismus (aus Uni Wien 2018)

4.3.7. Einfluss der Partikelgröße

Partikel aus ferro- bzw. ferrimagnetischen Material, die aufgrund ihrer Größe nur eine oder wenige magnetische Domänen umfassen, zeigen ein magnetisches Verhalten, das sich von den makroskopischen Materialproben stark unterscheidet. Partikel, die aufgrund ihrer Größe eine Vielzahl magnetischer Domänen beinhalten, ergeben weitgehend konstante magnetische Messwerte. Unterschreitet die Partikelgröße ca. 100 μm , nimmt die Anzahl der magnetischen Domänen innerhalb der Domänen zunehmend ab. Dies ergibt einen Rückgang der individuellen Partikelsuszeptibilität (Abbildung 4-16).

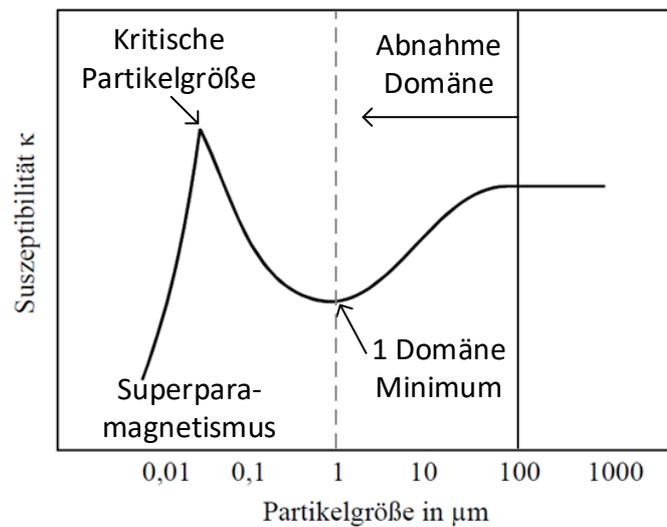


Abbildung 4-16: Suszeptibilität von Magnetit in Abhängigkeit zur Partikelgröße (nach Franzreb 2003 und Svoboda 1987).

Wird die Partikelgröße erreicht, unterhalb der Partikel nur noch eine magnetische Domäne umfasst, ergibt sich für die Partikelsuszeptibilität ein Minimum. Im Falle des Magnetits erfolgt der Übergang zu einem Eindomänenpartikel bei einem Partikeldurchmesser von $\sim 1 \mu\text{m}$ (Franzreb 2003). Mit kleinerer Partikelgröße verhält sich Magnetit wie ein paramagnetischer Stoff, nur mit größeren Absolutbeträgen der Magnetisierung (Superparamagnetismus). Die kritische Partikelgröße für den Superparamagnetismus für Magnetit liegt bei ungefähr $0,05 \mu\text{m}$ (Maximum Peak in Abbildung 4-16, Svoboda 1987). Mit noch kleineren Durchmessern ergeben sich dann noch geringere Suszeptibilitäten (Annäherung an Null).

Weitere Einflussfaktoren ergeben sich z. B. auch aus der Partikelform, etc. (Franzreb 2003, Svoboda 1987).

4.4. Einfluss zementaggressive Wässer auf Verfüllbaustoffe für EWS (AP, D)

Verfüllbaustoffe für EWS stehen im Untergrund in unmittelbarem Kontakt zum Grundwasser. Dabei kommt es in Abhängigkeit der geologischen und hydrogeologischen Bedingungen sowie dem Wasserchemismus zu Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Verfüllung. Hierbei kann die Verfüllung soweit beeinträchtigt werden, dass sie ihre Aufgaben nach VDI 4640 nicht mehr gewährleisten kann.

4.4.1. 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 4-2; König 2010). Die Kurzschreibweise der Klinkerphasen zeigt Tabelle 4-3.

Tabelle 4-2: 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 4-3: 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	

4.4.2. Zementhydratation

Die beim Herstellungsprozess des Zements entstandenen Klinkerphasen (Tabelle 4-4) 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

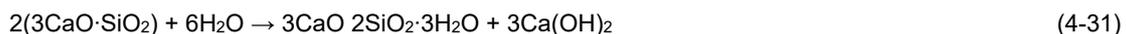
Die verschiedenen Klinkerphasen unterscheiden sich sowohl in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit als auch in ihrem Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Zementsteins (Verein Deutscher Zementwerke, 2002). Die ablaufenden Prozesse sind relativ komplex, da die Klinkerphasen unabhängig voneinander reagieren 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 4-4. Die im Detail stattfindenden Reaktionen werden im Folgenden beschrieben.

Tabelle 4-4: 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·CS·H ₁₂
		Ettringit (Trisulfat)	C ₃ A·3CS·H ₃₂
		Calciumaluminathydrat	C ₄ AH ₁₃
C ₄ AF Calciumaluminatferrit	4 CaO·(Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	Tetracalciumaluminatferrit-hydrat	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 4-5).

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

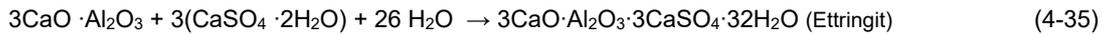


Die aus den silikatischen Klinkerphasen **C₃S** und **C₂S** während der Hydratation gebildeten Calciumsilikathydratphasen bestimmen die Endfestigkeit eines Zements (vgl. Abbildung 4-17a/c).

Tabelle 4-5: 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, Erstarrungsbeginn
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 C_3A 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 C_3A , wobei Aluminium teilweise durch Eisen ersetzt ist. Die Reaktion verläuft zwar langsamer als im Vergleich zu C_3A , muss dennoch mit einem Sulfatträger verzögert werden. In Zementen mit hohem Sulfatwiderstand ist entweder kein oder nur wenig C_3A vorhanden, dafür ist der C_4AF -Anteil höher (Stark & Wicht 2013). Die langsamere Hydratation des C_4AF wird durch eine Auslaugung des Aluminiums aus den C_4AF -Körnern erklärt. Das in Lösung gelangte Aluminium reagiert mit Sulfat und $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu Ettringit. Aufgrund der langsamen Aluminiumfreisetzung und der schnellen SO_3 -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 4-17 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ überschritten ($\sim 1700 \text{ mg/l}$), beginnt die Kristallisation von Portlandit (CH) und der Calciumsilikathydrate (CSH). Während die primär gebildeten CSH-Kristalle (röntgenamorph) auf der C_3S -Oberfläche kristallisieren, fällt Portlandit in Form tafelförmiger Kristalle aus.

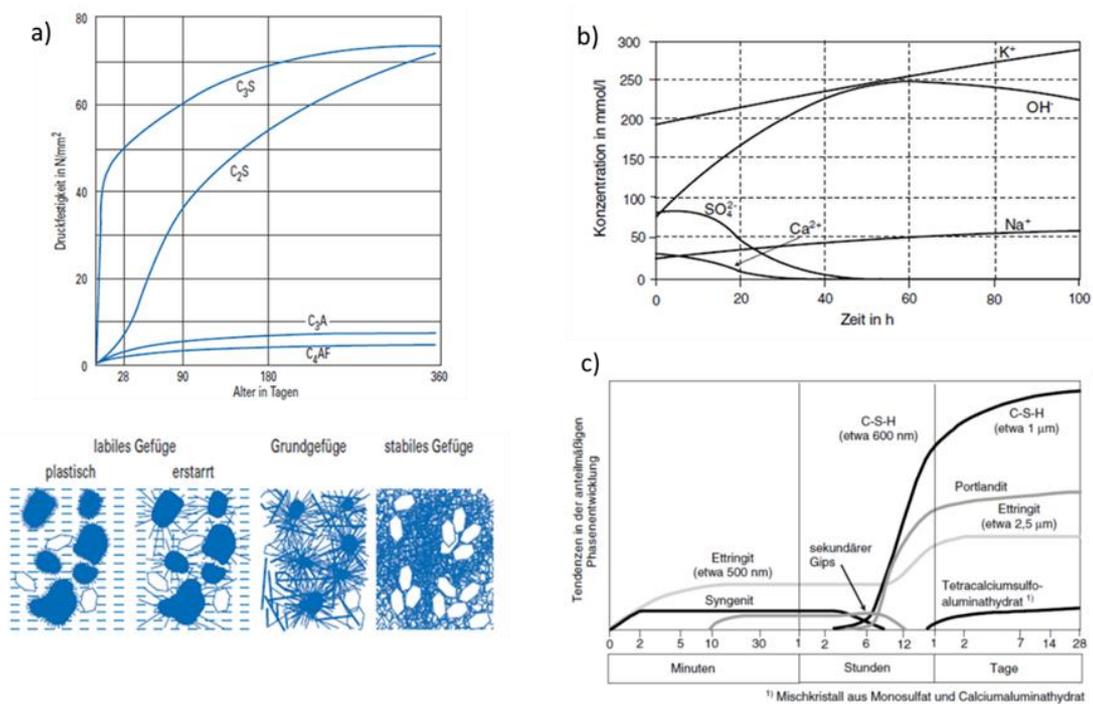


Abbildung 4-17: a) Druckfestigkeiten der reinen Klinkerphasen und Gefügeentwicklung in Abhängigkeit der Hydratationsdauer (Verein Deutscher Zementwerke, 2002), b) Zeitlicher Verlauf der Ionenkonzentration während der Hydratation (Stark & Wicht 2013), c) Schema der Portland-Zementhydratation (Stark & Wicht 2013)

4.4.3. 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 Verfüllmassen (Zemente) von Erdwärmesonden betrachtet und näher beschrieben.

Beim Sulfatreiben wird zwischen Gips- und Ettringitreiben 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 4-18 und Tabelle 4-6.

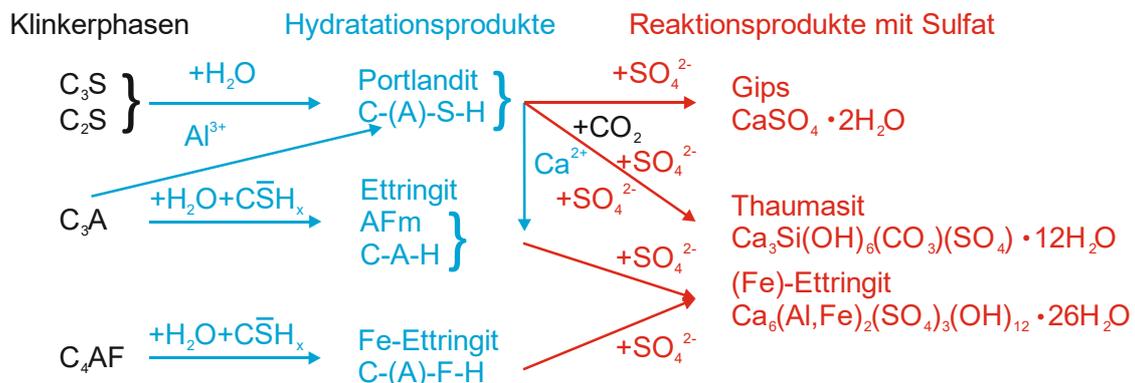


Abbildung 4-18: Hydratation von Portlandzement und mögliche chemische Reaktionen bei einem äußeren Sulfatangriff (aus Müllauer 2013)

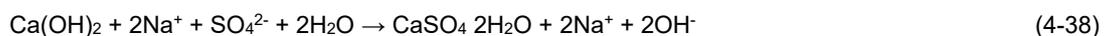
Tabelle 4-6: Übersicht von Ursache, Voraussetzungen und Mechanismen beim äußeren Sulfatangriff (nach Stark & Wicht 2013 und Müllauer 2013)

Merkmale	Treibender Sulfatangriff	Thaumasitbildung
Schädigung	Dehnungs- und Rissbildung durch Sulfatreiben	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 Abbinderegler Gips	

4.4.3.1. 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 (Mg(OH)_2) zurückzuführen sein:

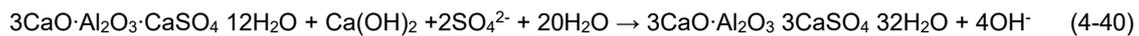


Durch die Bildung von Brucit auf der Zementoberfläche kann die Sulfatdiffusion verlangsamt sein (Verein Deutscher Zementwerke 2002).

4.4.3.2. Ettringitreiben

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 Abbindeeregler 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 g/mol, $\rho = 3,04 \text{ g/cm}^3$) zu Ettringit (1254,458 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 4-19). 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).

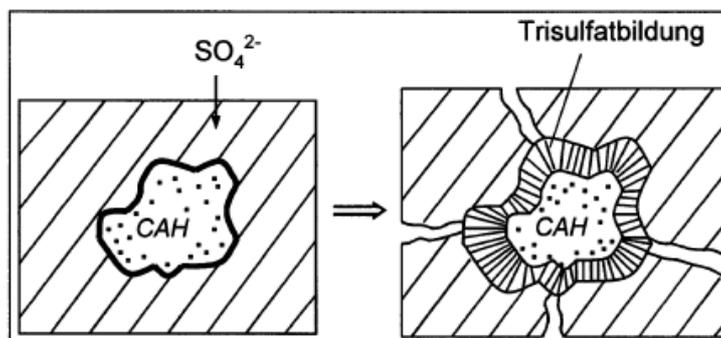


Abbildung 4-19: Schematische Darstellung des Sulfattreibens durch Bildung von Ettringit (Trisulfat) aus einer Calciumaluminathydratphase (CAH) (aus Benedix 2011)

4.4.3.3. Bildung von Thaumasit

Thaumasit ist strukturell mit Ettringit verwandt. Gegenüber Ettringit ist im Thaumasit das Aluminium durch Silizium ersetzt und Carbonat teilweise auf den Plätzen des Sulfates substituiert. Thaumasit 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 Thaumasit 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.

4.4.3.4. 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 Portlandits werden die CSH-Phasen umgesetzt und es treten Festigkeitsverluste auf.

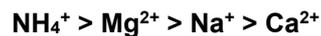
Beim Angriff von **ammoniumsulfathaltigen** Lösungen (Löslichkeit: 754 g/l) entstehen die gleichen Reaktionsprodukte wie bei magnesiumsulfathaltigen Lösungen. Bei Verringerung der Basizität

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 4-7.

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 4-7: 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)	CaSO ₄ ·2H ₂ O
	3CaO·2SiO ₂ ·nH ₂ O	Mg(OH) ₂
	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
NaSO ₄	Ca(OH) ₂	CaSO ₄ ·2H ₂ O
	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
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

4.4.4. 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 Verfüllmaterials 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 Verfüllmaterialien, 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 CaCO_3 . Dieses wird anschließend mit weiterer Kohlensäure zu gelöstem Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ umgesetzt, wodurch Kalk aus dem Verfüllmaterial herausgelöst wird (Stark & Wicht 2013). Die hierbei ablaufenden Reaktionen lauten:



Die Kalkverbindungen des Verfüllmaterials werden jedoch nicht durch das gesamte im Wasser enthaltene CO_2 angegriffen und aufgelöst. Diejenigen Kohlendioxidanteile, die mit den Calciumverbindungen 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 CO_2 angereichert sind, vor (Grübl et al. 2001).

Bei einem kalklösendem Säureangriff werden die Hydratphasen an der Zementoberfläche zersetzt, wobei hier v.a. die Calciumhydratphasen (z.B. Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Calciumsilikahydrat 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 Verfüllbaustoffe bei dem Säureangriff zersetzt.

Die sauren Wässer greifen die Oberflächen der Verfüllung 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.

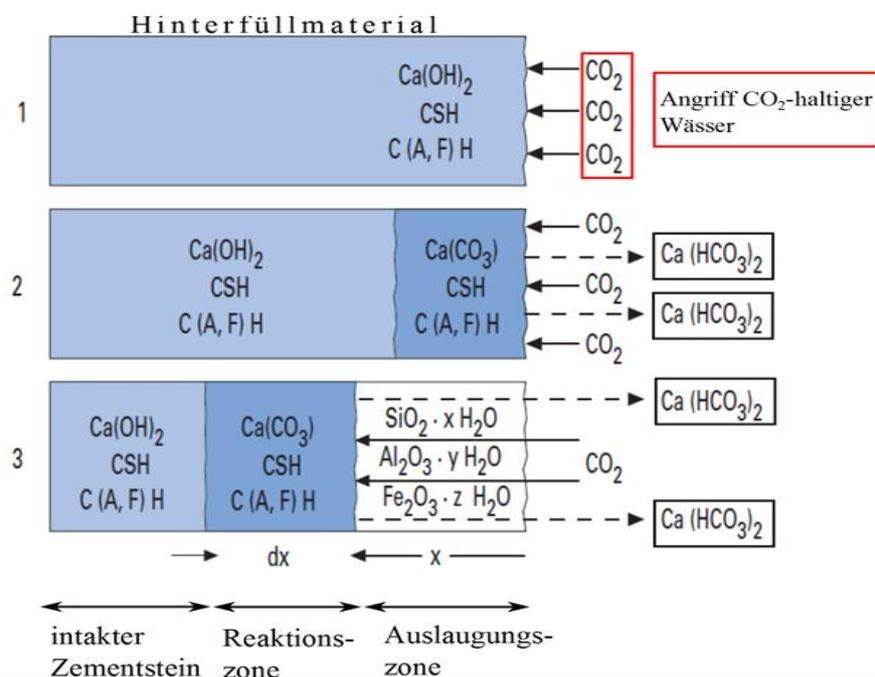


Abbildung 4-20: Wirkung kalkangreifender Kohlensäure auf Zementstein (Modell für drei Zeitstufen in Folge, (aus Verein Deutscher Zementwerke 2002)

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.

5. MATERIAL UND METHODEN (AGW; EIFER; MPA)

In diesem Kapitel werden nur Methoden beschrieben, die nicht Bestandteil des Vorgängerprojekts EWS-Tech I waren (Riegger et al. 2017), bzw. keine Standardversuche nach DIN sowie State of the Art sind.

5.1. Untersuchte Verfüllmaterialien

Um die Ergebnisse des Projekts EWS-Tech I zu untermauern und gesichertere neue Daten zu erhalten, wurden im Rahmen dieses Projektes die Verfüllbaustoffe 07 und 13+ sowie die jeweils mit Magnetit dotierten Verfüllbaustoffe 07d und 13+d verwendet. Darüber hinaus wurden die im AP. A entwickelten Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4 untersucht (Kapitel 4.1). Im automatischen Verfüllversuchsstand wurde zusätzlich der Baustoff 15d untersucht. Im Gegensatz zum EWS-Tech I Projekt, wurden die Verfüllbaustoffe nicht über die gesamte Projektlaufzeit verwendet, sondern immer auf Bedarf neu bestellt. Dadurch konnte zwar das Problem mit der Baustoffalterung unterbunden werden, stattdessen hat sich jedoch der Einfluss unterschiedlicher Chargen in den Versuchsergebnissen niedergeschlagen.

5.2. Verwendete Wässer

Im Rahmen des Projekts wurde zum einen der Angriff von sulfathaltigen Wässern als auch der Säureangriff auf zementhaltige Verfüllbaustoffe 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. Die Festlegung der verwendeten Wässer ist im Abschlussbericht des EWS-Tech I Projektes detailliert aufgeführt. Zur Untersuchung des Säureangriffs wurde das Mineralwasser Ensinger Sport (Medium) verwendet (Tabelle 5-1, Typ S4), da es neben CO₂ über einen Sulfatgehalt in der Größenordnung der übrigen verwendeten Wässern verfügt.

Tabelle 5-1: Sulfathaltige Wassertypen für die Durchströmungs- und Auslagerungsversuche

Ionen	Typ S2 (Na/K/Mg/Ca) [g/l]	Typ S3 (Mg/Ca) [g/l]	Typ S4 [g/l]
SO ₄ ²⁻	1,500	1,500	1,463
CO ₃ ²⁻	0,038	0,000	0,000
HCO ₃ ⁻	0,263	0,000	0,403
Cl ⁻	0,050	0,050	0,029
Na ⁺	0,115	0,000	0,029
K ⁺	0,049	0,000	0,007
Mg ²⁺	0,190	0,380	0,124
Ca ²⁺	0,327	0,028	0,528

Zum Anmischen der Verfüllbaustoffe für die Labor- und Technikumsversuche, sowie bei der Durchführung aller Batch- und Umströmungsversuche wurde als Referenzwasser Karlsruher Leitungswasser verwendet. In Tabelle 5-2 sind die physikochemischen Parameter des Leitungswas-

sers 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 5-2: Physikochemische Parameter des Karlsruher Leitungswassers (Stadtwerke Karlsruhe 2019)

Parameter	Einheit	Messwert
pH-Wert	-	7,23
Redoxpotential	mV	217
Leitfähigkeit	µS/cm	662
Natrium	mg/l	11,4
Kalium	mg/l	1,7
Magnesium	mg/l	9,8
Calcium	mg/l	111
Aluminium	mg/l	<0,02
Ammonium	mg/l	<0,01
Gesamthärte	dH	17,7
Sulfat	mg/l	47,5
Chlorid	mg/l	23,5
Hydrogencarbonat	mg/l	327
Carbonathärte	dH	15,0
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	0,67
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	5,40

5.3. Erdwärmerohr

Zum Simulieren von EWS wurden PE100RC Erdwärmerohre (32 x 3,0 mm) der Schweco GmbH verwendet.

5.4. Probenformen

Als Formen zum ausgießen zylindrischer Verfüllbaustoffproben wurden zugeschnittene KG Rohre von DN 40 bis DN 160 der Gebr. Ostendorf Kunststoffe GmbH verwendet.

5.5. Holzkugeln

Zum Simulieren von blasenförmigen Fehlstellen wurden Holzkugel unterschiedlicher Durchmesser (10-40 mm) der Rayher Hobby GmbH verwendet.

5.6. Abstandshalter

Für experimentelle Untersuchungen wurden die Abstandshalter 4xDA32 x 2,9 mm von der HDG Umwelttechnik GmbH bezogen.

5.7. Hilfsverrohrung

Zum Simulieren einer verrohrten Bohrung wurde ein Bohrohr 168 x 7,1 mm mit 1080 mm Länge von der Fa. Nordmeyer Smag Drilling Technologies verwendet, sowie ein einfacher Gusseisenzylinder.

5.8. Anmischen der Baustoffe

Die verwendeten Verfüllbaustoffe wurden gemäß der im EWS-Tech I Projekt festgelegten Prozedur angemischt (Riegger et al. 2017). Da sich jedoch im EWS-Tech I Projekt gezeigt hat, dass die Rührgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften des Verfüllbaustoffs hat und die Mischenergie des Laborrührwerks bei 650 U/min deutlich geringer ist als die, der im Technikumsversuch verwendeten Gertec-Mischanlage, wurden die Rührgeschwindigkeit standardmäßig auf 2000 U/min festgesetzt. Um die Ergebnisse aus dem EWS-Tech I Projekt mit den hier erzielten Ergebnissen vergleichen zu können, wurden die Versuche zusätzlich mit 650 U/min durchgeführt.

5.9. 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 Probenahme 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.

5.10. Analytik

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte und im vorliegenden Bericht nicht näher methodisch erläutert Standarduntersuchungen sind in Tabelle 5-3 aufgeführt. Eine genaue Beschreibung der analytischen Untersuchungsmethoden ist in Riegger et al. 2016 bzw. den entsprechenden Richtlinien aufgeführt. Die speziellen Untersuchungsmethoden werden in den folgenden Kapiteln erklärt.

Tabelle 5-3: Durchgeführte Standarduntersuchungen

Versuchsparameter	Methode	Verwendetes Gerät
Temperatur	Laborthermometer (0,1K), Pt-100-Fühler	Almemo 2890-9, Ahlborn
Wasser		
Na ⁺ , K ⁺	AAS, Emissionsmodus	AA-7000, Shimadzu
Mg ²⁺ ; Ca ²⁺	AAS, Absorptionsmodus	AA-7000, Shimadzu
Al ³⁺	Photometer, Aluminium-Schnelltest Spektroquant, Merck; Wellenlänge 540 nm	Nanocolor 500D, Machery-Nagel
Cl ⁻	Photometer, Chlorid-Schnelltest Spektroquant, Merck; Wellenlänge 470 nm	Nanocolor 500D, Machery-Nagel
CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻	Titration, Alkalinitäts-Test, Merck	
SO ₄ ²⁻	EPA Methode 9038, turbidimetrisch; Wellenlänge 435 nm	Nanocolor 500D, Machery-Nagel
pH	DIN EN ISO 10523	WTW, pH197-S

Versuchsparameter	Methode	Verwendetes Gerät
Eh	DIN 38404-6	WTW pH197
γ	DIN EN 27888	WTW, LF197
Suspension		
Fließgrenze	DIN 4127	Kugelharfe
Viskosität	DIN 4127	Marsh-Trichter
Suspensionsstabilität	LQS EWS	Wasserabsetzmaß
Suspensionsdichte	LQS EWS	Dichtewaage Mud Balance Model 140 Fann, Aräometer, COMDRILL
Feststoff		
Optisch	Foto	Foto
Mineralogie	Röntgendiffraktometrie (XRD)	D8 Advance, Bruker; Software Diffrac Plus Evaluation
Karbonatgehalt	DIN 18129	Scheibler
pH-Wert (Feststoff)	DIN 19682-13	WTW, pH197-S
Porenverteilung	DIN 66133	Autopore IV, Micromeritics
Biegezug-/Druckfestigkeit	DIN 1015-11; DIN EN 196-1	Prüfgerät TC4, Toni Technik
NPR	-	Nadelpenetrometer
Längenveränderung	-	Messschieber
Gewichtsveränderung	-	Satorius
Wärmeleitfähigkeit	-	Isomet 2104, Applied Precision
Korndichte	ISO 1183-3	Helium-Pyknometer AccuPyc 1330, Micromeritics
Korngrößenverteilung	ISO 13320	Lasergranulometer, CILAS 1064
Wasseranspruch	DIN EN 196-3	
Wasseranspruch (Punkte)	DAfStB SVB	
Erstarrungsbeginn	DIN EN 196-3	
Erstarrungsende	DIN EN 196-3	
Spezifische Oberfläche (Blaine)	DIN 196-6	manuelles Blaine-Gerät
Spezifische Oberfläche (BET)		ASAP 2010Micromeritics
SiO ₂		Nasschemisch
Al ₂ O ₃		Nasschemisch

CaO + MgO		Nasschemisch
Na ₂ O + K ₂ O		MP-AES
Glühverlust (1000°C)		

5.11. Wärmeentwicklung von Verfüllbaustoffen

Der Hydratationsprozess von Verfüllbaustoffen ist, je nach verwendetem Zement und dessen mengenmäßigen Anteils, mit einer Wärmeentwicklung verbunden. Diese Wärmeentwicklung kann während des Verfüllvorgangs und des Hydratationsprozesses gemessen werden. Im Rahmen des EWS-Tech II Projektes sollte geklärt werden, ob die Wärmeentwicklung Aussagen über die Verfüllqualität einer EWS zulassen und wie lange die Temperaturerhöhung unter Standardbedingungen anhält, da dies für den Startzeitpunkt von TRT's eine entscheidende Rolle spielt. Für den Versuch wurde zuerst die Hydratationswärme der Verfüllbaustoffe 07d, 13+d, M3 und M4 mit einem adiabatischen Kalorimeter (TAM Air von TA Instruments) als Referenz gemessen (DIN EN 12390-15). In einem zweiten Schritt wurden die Temperaturentwicklung der Verfüllbaustoffe in einem Kunststoffzylinder (KG Überschiebmuffe DN 110) mit einem Durchmesser von 110 mm und einer Höhe von 125 mm unter Raumtemperatur sowie bei ca. 9°C in einem Thermostatschrank (Aqua Lytic) gemessen (Abbildung 5-1). Hierzu wurde ein Pt 100-Widerstandsmessfühler in die Mitte der KG Überschiebmuffe platziert und diese mit dem frisch angemischten Verfüllbaustoff befüllt. Zusätzlich wurde während des Versuchszeitraums die Umgebungstemperatur aufgezeichnet, um Tagesschwankungen in den Messwerten berücksichtigen zu können. Die Temperaturmessung erfolgte mit kalibrierten Pt 100-Widerstandsmessfühlern und dem Datenlogger Almemo 2890-9 (Ahlborn). Da diese Laborversuche kleinmaßstäblich sind und bewusst nicht isoliert wurden, wirkten sich die Umgebungsbedingungen stark auf die Temperaturentwicklung aus. Um die Temperaturentwicklung einer EWS nachzustellen, wurde mit einem Glasfaserkabel, das im Schenkel einer 30 m langen Doppel-U-Sonde installiert war, die Temperatur während des Verfüllvorgangs auf dem Testfeld des KIT gemessen.



Abbildung 5-1: Versuchsaufbau zur Messung der Wärmeentwicklung von Verfüllbaustoffen

5.12. Einfluss des Grundwassers auf die Verfüllung (AP. B)

Um den Einfluss des Grundwassers auf die Verfüllsuspension während und nach dem Verfüllvorgang zu bewerten, wurden verschiedene Versuchsaufbauten im Labor- und Technikumsmaßstab entwickelt. Durch die innerhalb der Projektlaufzeit gewonnenen Erkenntnisse wurde deutlich, dass reine Aquariumversuche nur bedingt die Bedingungen einer realen EWS darstellen können. Daher war eine Anpassung des Versuchsprogramms notwendig, um den Baustoffeigenschaften bei den verwendeten, unterschiedlichen geologischen Schichten sowie der jeweiligen versuchsbedingten Randbedingungen, gerecht zu werden. In Tabelle 5-4 sind die durchgeführten Versuche aufgelistet.

Tabelle 5-4: Untersuchungsprogramm zur Beurteilung des Einflusses des Grundwassers und der Geologie

Versuch	Geologie	Verfüllmaterial	GW	Druck	Wassergesättigt
Aquarium, klein					
Vorversuch	Nat. Sa	07+/2000	ja	nein	ja
Versuch 1	Nat. Sa	07+/2000	ja	nein	ja
Versuch 2	Nat. Sa	02+/2000	ja	nein	ja
Versuch 3	Nat. Sa	13+/2000	ja	nein	ja
Versuch 4	Nat. Sa/Gr	13+/2000	ja	nein	ja
Aquarium, groß					
Versuch 1	3 Schichten Split/Sa/Gr	13+dot	ja	nein	ja
Penetrationsversuche					
Versuch 1	MSa	13+dot	-	nein	ja
Versuch 2	MSa	13+dot	-	ja	ja
Versuch 3	MSa	07dot	-	nein	ja
Versuch 4	MSa	07dot	-	nein	ja
Versuch 5	GSa	07dot	-	nein	ja
Versuch 6	GSa	13+dot	-	nein	ja
Versuch 7	MSa	07dot	-	ja	ja
Versuch 8	GSa	07dot	-	ja	ja
Versuch 9	GSa	13+dot	-	ja	ja
Versuch 10	Split	13+dot	-	nein	ja
Technikum					
Versuch 1	Gr	07dot	-	nein	ja
Versuch 2	Split	07dot	-	nein	ja
Versuch 3	Gr	13+dot	-	nein	ja
Versuch 4	Split	13+dot	-	nein	ja

5.12.1. Aquariumsversuche

Im Rahmen des Projektes wurden Aquariumsversuche in unterschiedlichem Maßstab durchgeführt.

Kleinmaßstäbliche Aquariumsversuche

Die kleinmaßstäblichen Aquariumsversuche wurden in einem Plexiglasbehälter mit den Maßen L x T x H 480 mm (456 mm) x 300 mm x 400 mm (320 mm) durchgeführt. Um während des Versuchs einen kontrollierten Grundwasserfluss zu gewährleisten, wurden auf den beiden Stirnseiten ein Wasserreservoir vorgesehen (Abbildung 5-2, links), dessen Wasserpegel über ein Plexiglaszylindersystem eingestellt werden konnte (Abbildung 5-2, Mitte). Für das Wasserreservoir wurde ein Edelstahldrahtgewebe im Abstand von 12 mm zu jeder Stirnseite installiert. Der Abstand wurde dabei durch jeweils 5 Gewindestangen mit einem \varnothing von 12 mm vorgegeben. Um eine mögliche Suffosion innerhalb der geologischen Einheiten zu verhindern wurde auf das Edelstahldrahtgewebe ein Geotextil (Naue, Secutex R 201®) befestigt. In der Mitte des Aquariums wurde vor dem Einbau der geologischen Einheit ein Blech (150 x 100 mm) montiert, in das bei Versuchsbeginn der Verfüllbaustoff eingefüllt und im Anschluss an den Verfüllvorgang wieder gezogen wurde (Abbildung 5-2, rechts). Die geologischen Einheiten wurden Lagenweise eingebracht und mit einem Stahlkamm verdichtet. Durch die Stahlnadeln, die ca. 10 mm länger als die Mächtigkeit der jeweils eingebrachte Sand-/Kieslage waren, wurden lagenweise Struktureffekte verhindert (Abbildung 5-2, rechts). Als Geologie wurde ein natürlicher Sand bzw. Sand/Kies eingebaut, der aus der Bohrung des Testfelds am KIT entstammt (Tabelle 5-4). Der hydraulische Gradient wurde in allen Versuchen auf 3 ‰ eingestellt. Nach dem Aushärten des Verfüllbaustoffes wurde der Sand ausgebaut und auf das Eindringen von Verfüllbaustoff hin untersucht.

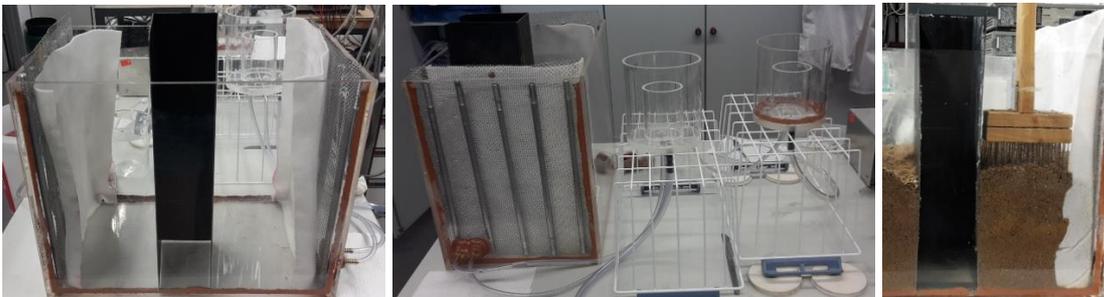


Abbildung 5-2: Versuchsaufbau der kleinmaßstäblichen Aquariumsversuche

Großmaßstäbliche Aquariumsversuche

Abbildung 5-2 zeigt den Versuchsaufbau der großmaßstäblichen Aquariumsversuche. Der Versuchsaufbau entspricht dabei, bis auf die Größe, dem der kleinmaßstäblichen Versuche inklusive der Steuerung des Grundwasserflusses über die zwei unabhängig voneinander betriebenen Plexiglaszylindersystemen über die ein hydraulisches Gefälle von 2 ‰ eingestellt wurde (Abbildung 5-3, rechts). Aufgrund der Erkenntnisse aus den kleinen Aquariumsversuchen, wurden in diesem Versuch drei Schichten mit unterschiedlichen Porenöffnungsweiten eingebaut. Hierbei wurden

von unten nach oben 25 cm Split (Feinkies, Flair Stone; 2 – 5 mm), 11 cm Mittelsand (Dorselit von Dorfner Anzaplan) und 58 cm Mittelkies (Flair Stone; 8 – 16 mm) verwendet. An der Stelle der EWS wurde ein Metallrohr mit einem \varnothing von 12 cm vorgesehen, das nach dem Verfüllvorgang mittels eines Krans vorsichtig gezogen wurde. Nach Versuchsende wurde der Versuch ausgebaut und daraufhin beurteilt, in wie weit Verfüllmaterial in die geologischen Schichten eingedrungen ist und die EWS durch den Grundwassereinfluss beeinträchtigt wurde. Der Verfüllbaustoff wurde mit der GerTec-Mischanlage (IS-38E) angemischt und mit einer Verpressgeschwindigkeit von 40 l/min in die Verrohrung verpresst.

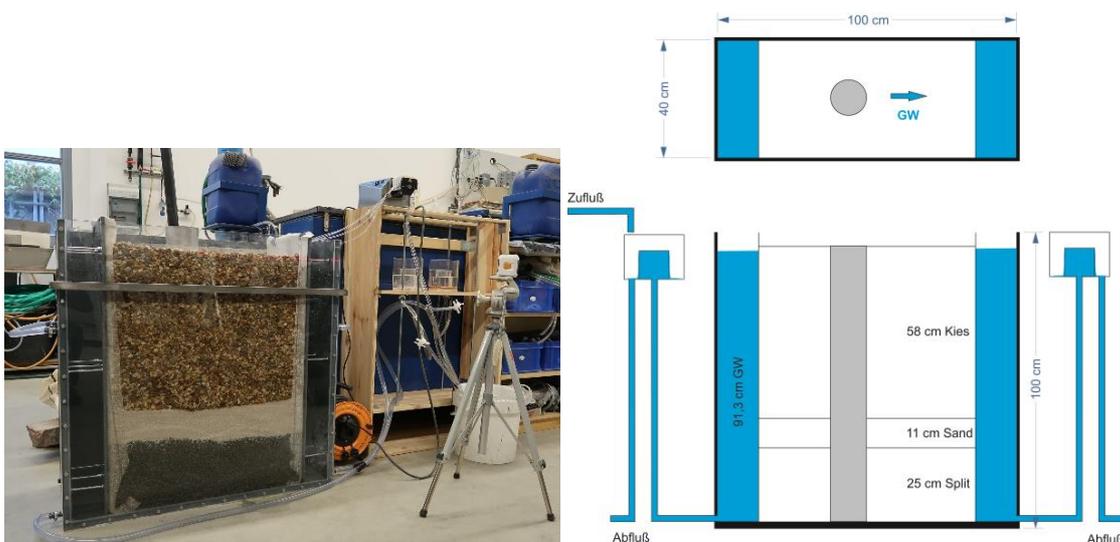


Abbildung 5-3: Versuchsaufbau der großmaßstäblichen Aquariumsversuche

5.12.2. Penetrationsversuche im Labormaßstab

Beim Verfüllvorgang kommt es neben strömungsmechanischen Vorgängen innerhalb der Suspension zur Filtration und Penetration im Grenzbereich Verfüllung/Gestein. Während die Filtration für die Prozesse innerhalb der EWS ausschlaggebend ist, ist die Penetration für die geologischen Einheiten von Belang. Die Kombination aller ablaufenden Prozesse ist dabei letztendlich maßgebend, inwieweit die EWS in das umgebende Gestein integriert ist und damit auch wie effektiv und nachhaltig das System EWS überhaupt ist. Auch im Hinblick auf den Grundwasserfluss ist die Penetration des Verfüllbaustoffs wichtig, da durch die Grundwasserströmung Partikel der Verfüllung im Aquifer transportiert werden können und sich dies auf die Grundwasserqualität auswirken kann. Darüber hinaus kann durch den Partikeltransport die Anbindung der EWS ans anstehende Gebirge verschlechtert werden.

Um die Penetration der Verfüllbaustoffe untersuchen zu können, wurde ein Laborversuch entwickelt. Hierzu wurde ein Edelstahlrohr ($\varnothing = 150$ mm, $h = 202$ mm) mit einer Boden- und Deckplatte versehen, die mit zwei O-Ringen abgedichtet wurden und über 4 Gewindestangen miteinander verschraubt wurden (Abbildung 5-4). Auf halber Höhe des Edelstahlrohrs war ein Auslauf, der mit einem Kugelhahn sowie einem Geotextil (Naue, Secutex R 201®), das als Suffosionsschutz diente, versehen war. Auf der Deckplatte befand sich ein Druckluftanschluss mit integriertem Sicherheitsventil (6 bar), ein Anschluss für ein digitales Manometer (Keller, LEO2) sowie ein über

einen Kugelhahn absperrender Einfülltrichter zur Eingabe des Verfüllbaustoffs. In der Bodenplatte befand sich ein zentraler Auslauf über dem eine Filterplatte aus VitraPOR® (Robu, Porositätsklasse 0), sowie eine Drainagematte (Naue SECUDRAIN®) als Suffosionsschutz angeordnet war. Der untere Auslauf war mit einem Schlauch verbunden, dessen Ende auf derselben Höhe war wie der des mittleren Auslaufs. Das Wasser, das im Versuchsverlauf aus der Verfüllung und der geologischen Einheit (bedingt durch die Penetration) verdrängt wurde, floss über den unteren Auslauf in einen Messbecher und wurde mittels einer Waage quantitativ über die Zeit erfasst. Für die Versuche wurde das Edelstahlrohr mit den zu untersuchenden Sanden bis zur Oberkante des mittleren Abflusses befüllt und mit Wasser gesättigt. Nach der Wassersättigung wurde der Kugelhahn am mittleren Ablauf geschlossen. Anschließend wurde die Suspension in die Messzelle überführt, der Kugelhahn am Eingabetrichter verschlossen und je nach Versuchsdurchführung mit Druckluft beaufschlagt. Bei den Versuchen wurde der Druck, die verdrängte Wassermenge, sowie die Eindringtiefe der Verfüllung in die geologische Einheit gemessen. Darüber hinaus wurden die wichtigsten Suspensionsparameter bestimmt. Die durchgeführten Versuche sind in Tabelle 5-4 aufgelistet.

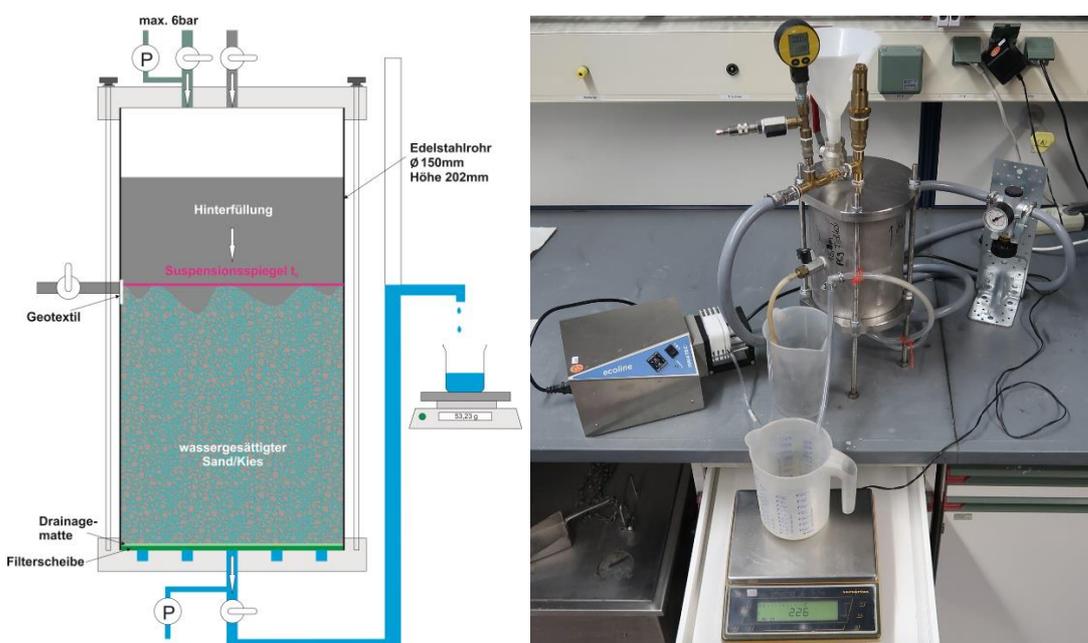


Abbildung 5-4: Versuchsaufbau der Penetrationsversuche im Labormaßstab

5.12.3. Penetrationsversuche im Technikumsmaßstab

Die Laborversuche haben gezeigt, dass je nach verwendeter geologischer Einheit der Versuchsaufbau modifiziert werden musste, da bei der Verwendung des Splits bereits beim Befüllen des Versuchs die Verfüllung am unteren Auslaufs herausfloss. Daher wurde ein upscaling des Versuchsaufbaus vorgenommen. Hierzu wurde ein 300 cm langes Polycarbonatrohr mit einem \varnothing von

150 mm verwendet (Abbildung 5-5). Der übrige Versuchsaufbau und das Untersuchungsprogramm entsprach dem der Laborversuche, es konnte jedoch kein zusätzlicher Druck auf die Verfüllsäule aufgebracht werden.

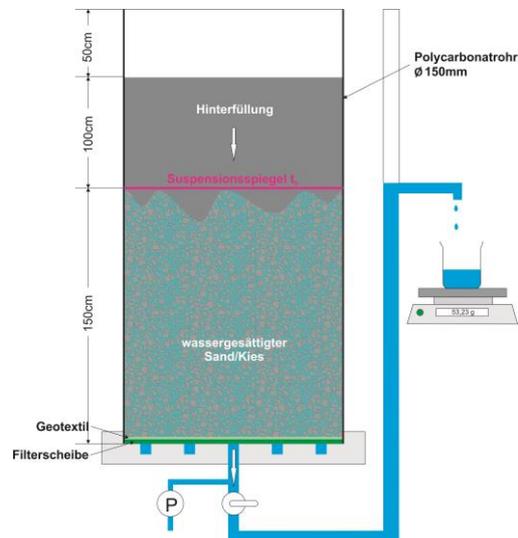


Abbildung 5-5: Versuchsaufbau der Penetrationsversuche im Technikumsmaßstab

5.13. Magnetische Suszeptibilitätsmessmethoden (AP. C)

5.13.1. Bartington Messsystem für magnetische Suszeptibilitätsmessungen

Das Messsystem zur magnetischen Suszeptibilitätsmessung der britischen Fa. Bartington Instruments Ltd. besteht aus einem Basis-Messgerät, dem MS3 (Abbildung 5-6), das via USB an einen Computer angeschlossen werden kann. Unterschiedliche Suszeptibilitätssensoren können je nach Anwendung an das MS3 angeschlossen werden. Es können Böden, Gesteine, Pulver und Flüssigkeiten sowohl im Labor als auch im Feld auf ihre magnetische Suszeptibilität hin untersucht werden (Dearing 1994).



Abbildung 5-6: Bartington MS3

Das Prinzip ist bei allen Sensoren gleich – es wird ein schwaches magnetisches Feld mit dem Sensor erzeugt, das sich beim Heranführen einer magnetisierbaren Probe entsprechend verändert. Diese Änderung wird vom Sensor erfasst und in magnetische Suszeptibilitätswerte konvertiert (Bartington o.D.).

Die Programmierung der Sensoren, sowie das Auslesen der Daten erfolgt über die Software „Bartsoft“.

Für diese Arbeit von Wichtigkeit sind die Sensoren MS2C, MS2B, MS2K und MS2H

Je nach Sensor bzw. Sensorkonfiguration können Volumen (K)- und/oder Massenspezifische (χ) Suszeptibilitäten bestimmt werden.

Die Beziehung zwischen K [-] und χ [m^3kg^{-1}] ist (Dearing 1994):

$$X = \frac{K}{\rho} \quad (5-1)$$

mit ρ Dichte der Probe [g/cm^3]

5.13.1.1. Bartington MS2C Sensor mit „ASC Manual Core Analysis Track“ (AP. C)

Der ASC Manual Core Analysis Track der US-Firma ASC Scientific wird für die Durchführung von Volumensuszeptibilitäts (K) - Messungen in Kombination mit den Bartington MS2C Sensoren an zylindrischen Proben verwendet (Abbildung 5-7). Die MS2C-Ringsensoren sind in verschiedenen Durchmessern von 30-162 mm erhältlich. Es kann jede Art von Probe untersucht werden, sofern sie nicht mit Metall ummantelt ist. Ein einzelner Ringsensor kann mittig auf dem Track montiert werden und die Kernproben werden zum Messen manuell durch den Sensor verschoben bei gleichzeitiger Bedienung der Bartington Software.



Abbildung 5-7: links Aufbau des Core Analysis Track (3,75 m lang), rechts Messung von Zylinderproben (30 cm Länge, $\varnothing 110$ mm) im Core Analysis Track mit Bartington MS2C Kernsensor ($\varnothing 120$ mm)

5.13.1.2. Methoden zur Messung mit dem Bartington Anlegesensor MS2K (AP. C)

Zur Messung mit dem Anlegesensor sind verschiedene Methoden denkbar. In dieser Arbeit wurden bei Bedarf die Enden zylindrischer Probenkerne mit dem Anlegesensor vermessen. Hierzu wurde für die $\varnothing 110$ mm Proben ein Aufsatz mit einer Messschablone gefertigt, mit dem man 9 Messpunkte auf der Kernoberfläche vermessen kann (Abbildung 5-8). Eine entsprechende Messschablone wurde auch für $\varnothing 150$ mm Proben mit insgesamt 17 Messpunkten erstellt. Der MS2K-Sensor misst ebenfalls K. Die Eindringtiefe des Sensors beträgt ca. 1 cm laut Hersteller Bartington.

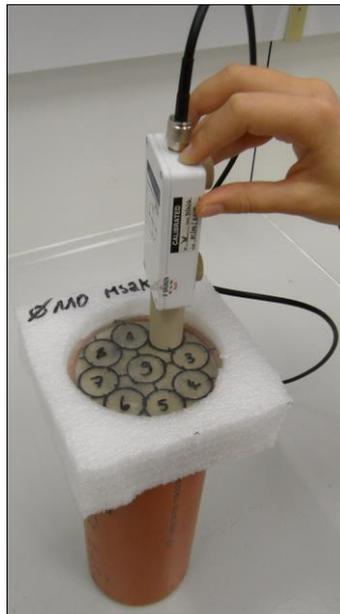


Abbildung 5-8: Messung von K mit dem MS2K Anlegesensor auf einer $\varnothing 110$ mm Messschablone, aufgesetzt auf einen Probenkern

5.13.1.3. MS2H Bohrlochsensor (AP. C)

Der MS2H-Bohrlochsensor (Abbildung 5-9) ist für K-Messungen in Bohrlöchern von $\varnothing 22$ kalibriert, und wird bisher in Tiefen von 2-3 Meter verwendet (Anwendungsgebiete: Archäologie, Deponie- und Erdbebenuntersuchungen). Der Hersteller gibt eine vertikale Auflösung von 12,5 mm an (Dearing 1994). Generell ist dieser Sensor nicht für die Anwendung in EWS konzipiert, wird jedoch in dieser Arbeit dennoch zum Vergleich mit dem CemTrakker im Labormaßstab verwendet. Aspekte wie Dichtigkeit, Druckstabilität, Befahrbarkeit in einem EWS-Rohr unter Realbedingungen etc. sind nicht geklärt. Außerdem ist dieser Sensor auch nicht in der Lage eine automatische, kontinuierliche Messung durchzuführen, wie sie für EWS Untersuchungen notwendig ist (siehe CemTrakker). Jede einzelne Punkt-Messung muss vom Bearbeiter über einen Laptop mit „Enter“ bestätigt werden.



Abbildung 5-9: MS2H-Bohrlochsensor (Abstand zwischen 2 Strichen = 1 cm)

Da im EWS Anwendungsfall Rohre von $\varnothing 32$ -40 mm befahren werden, kann aufgrund der Kalibrierung auf $\varnothing 22$ mm nicht die tatsächliche Suszeptibilität gemessen werden. Es gibt jedoch die Möglichkeit mittels Multiplikation der Messwerte mit Skalenfaktoren die gemessene Suszeptibilität entsprechend dem Bohrlochdurchmesser zu korrigieren. Für die Befahrung in einem $\varnothing 32$ mm Sondenrohr, wie er in dieser Arbeit ausschließlich verwendet wird, beträgt dieser Skalenfaktor 3,166 (Dearing 1994).

5.13.1.4. MS2B (AP. C)

Der MS2B-Sensor (Abbildung 5-10) wird für die Messung von K und Massensuszeptibilitäten (χ) an Pulver- und Fluid-Proben in kleinen Pöten (10 ml Volumen) verwendet.

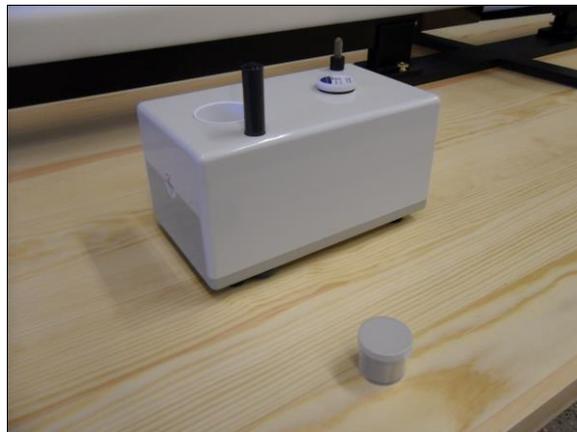


Abbildung 5-10: MS2B mit 10 ml Probenpot im Vordergrund

5.13.2. CemTrakker (AP. C)

Der CemTrakker (Abbildung 5-11) ist ein Messgerät zur Detektion ferromagnetischer und elektrisch leitfähiger Materialien. Es kann zwischen elektrisch und magnetisch leitfähigen Stoffen unterscheiden. Damit ist es ideal für den Einsatz in der Materialprüfung und bei der Qualitätskontrolle bei Bohrlochverfüllungen z.B. von EWS einsetzbar. Verwendungsmöglichkeiten sind laut

Hersteller die automatische Verpressüberwachung während des Verpressvorgangs mit Protokoll. Außerdem auch die zeitlich unabhängigen Kontrollmessungen bei denen die EWS mit der Messsonde mit einer gleichbleibenden mäßigen Geschwindigkeit befahren wird (Santherr o.D.).



Abbildung 5-11: CemTrakker Messkoffer mit Display und Kabeltrommel mit Messsonde (Santherr o.D.)

5.14. Probenherstellung für MS2C, MS2K, MS2H und CemTrakker (AP. C)

Für die Untersuchungen mit unterschiedlichen Sensor wurden in erster Linie zylindrische Verfüllbaustoffproben hergestellt. Als Probenformen dienen einfache PVC-Rohre die am Boden mit Gummi-Endkappen verschlossen werden (siehe Abbildung 5-12, 1). In dieser Arbeit werden vorwiegend Rohre mit Maßen 110 mm (Rohrdurchmesser) x 3,2 mm (Wandstärke) und unterschiedlicher Länge (30-50 cm) verwendet, untergeordnet für spezielle Untersuchungen aber auch weitere Rohrmaße: 40 x 1,8 mm, 50 x 1,8 mm, 75 x 1,9 mm, 125 x 3,2 mm und 160 x 4,0 mm. Neben Proben, die ausschließlich aus Verfüllbaustoff bestehen, können auch solche mit Erdwärmerohren hergestellt werden um einen Einsatz des CemTrakker und MS2H-Borlochensors zu ermöglichen (siehe Abbildung 5-12, 2). Auch können Fehlstellen in Kugelform und unterschiedlichem Durchmesser direkt am EWS-Rohr oder am Rand der Probenform (Bohrlochrand) simuliert werden (siehe Abbildung 5-12, A & B).

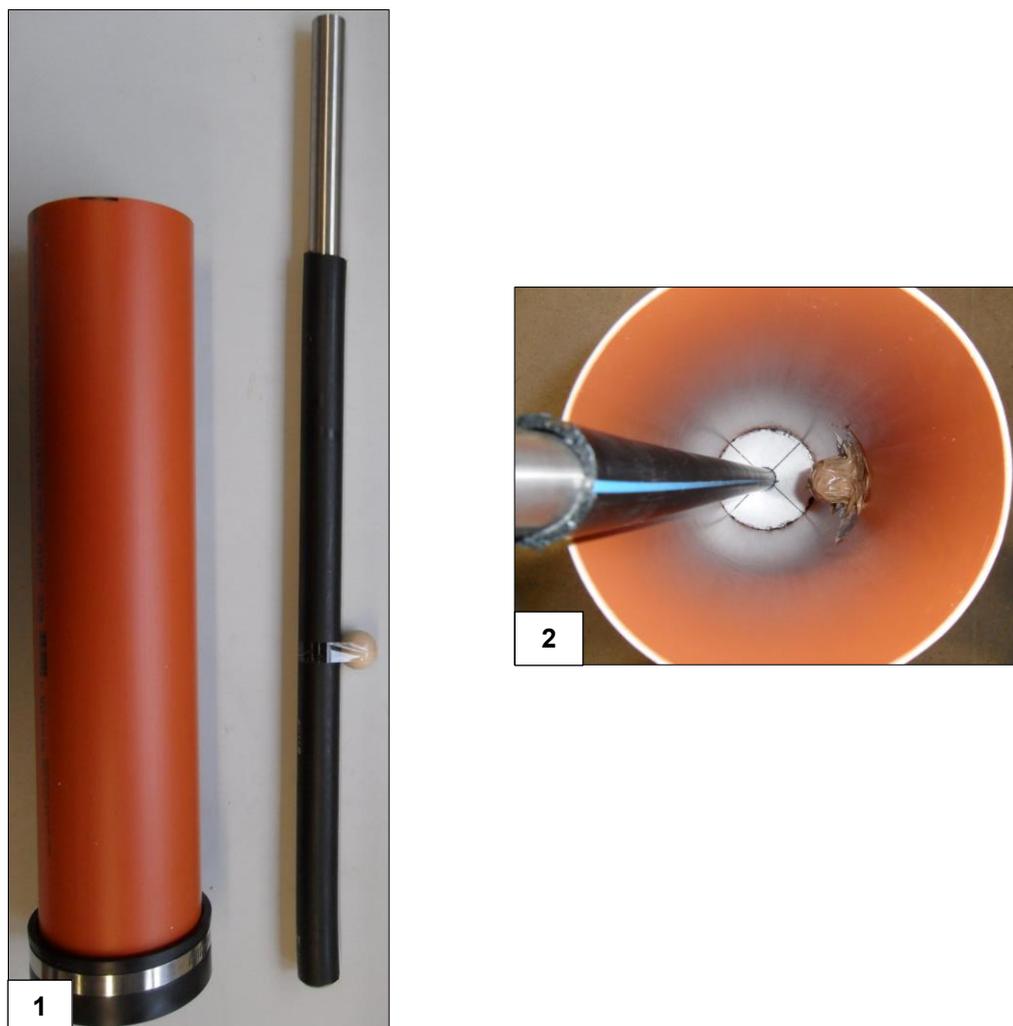


Abbildung 5-12: Probenherstellung; 1: 110x3,2 mm Rohr (50 cm Länge) und begradigtes EWS-Rohr mit Fehlstelle (Holzkugel); 2: 160x4,0 mm Rohr mit Fehlstelle am Rand

Die Suszeptibilitätsmessungen an den Proben wurden bereits wenige Tagen nach Verfestigung der Verfüllbaustoffe durchgeführt. Der signalgebende Magnetit im Verfüllbaustoff ist nur ein Zusatzstoff der nicht in den Hydratationsprozess eingebunden ist, so dass Messungen bereits vor den 28 Tagen Standardaushärtung möglich sind.

5.15. Labor-Messstand zur Untersuchung von Kernproben mit dem CemTrakker und MS2H Bohrlochsensor (AP. C)

Für die Messungen mit dem CemTrakker sowie der MS2H Bohrlochsonde wurde eigens ein Messstand aufgebaut (Abbildung 5-13), der kontrollierte und reproduzierbare Untersuchungen gewährleisten soll. Der Aufbau besteht aus einem einfachen ca. 125 cm hohen Gestell, das mit einer Zentimeterskala versehen ist. In das Gestell können nun, wie in Abbildung 5-13 gezeigt, Kernproben unterschiedlicher Länge und Durchmesser aufgestellt werden. Die Proben mit Son-

denrohren wurden so hergestellt, dass immer ca. 5 cm Sondenrohr über die eigentliche Probenoberkante ragen. Von oben durch eine Bohrung im Dach des Gestells wird ein durchsichtiges $\varnothing 40$ mm Kunststoffrohr geführt, das auf das überstehende Sondenrohr aufgesetzt wird. Hinter diesem Aufbau kann nun das CemTrakker-System, oder ein Laptop mit Anschluss an das MS3 und die MS2H Sonde aufgestellt werden. Die Sensoren können von oben in das Kunststoffrohr eingeführt, in festgelegten cm-Schritten in die Probe abgelassen und das Signal so aufgezeichnet werden. Auch der Einbau eines Eisenzylinders zum Simulieren einer Hilfsverrohrung ist möglich (Abbildung 5-13, B).

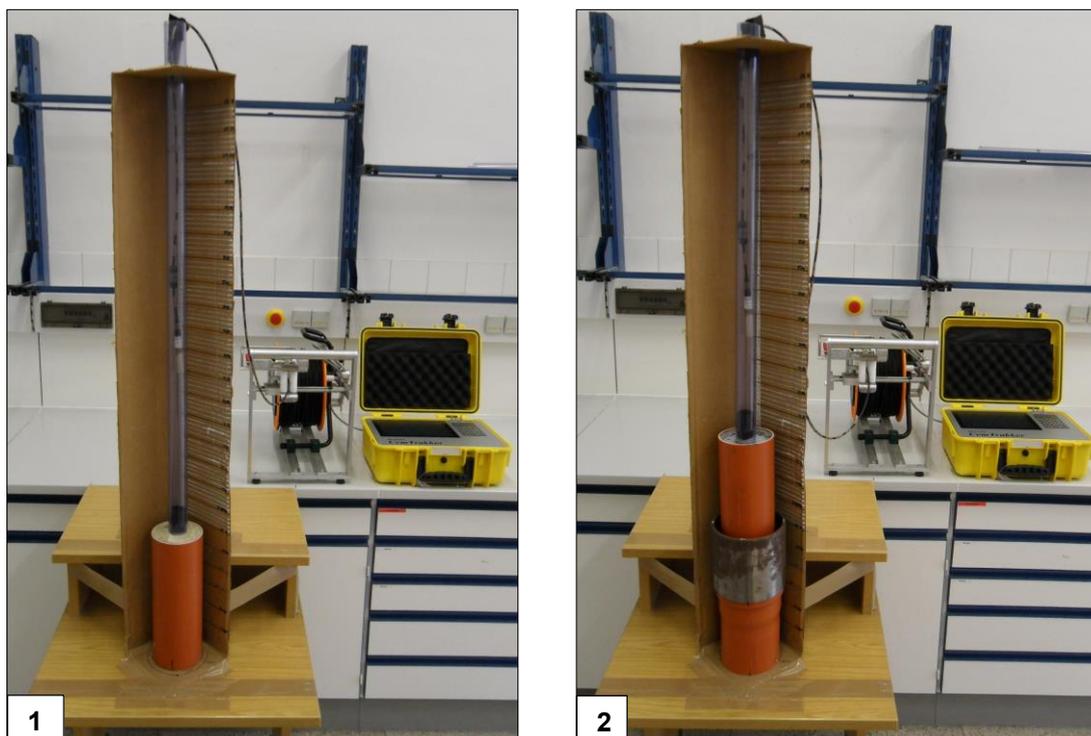


Abbildung 5-13: Messstand zur Messung mit CemTrakker und MS2H Bohrlochsonde (hier CemTrakker) ohne (1) und mit Hilfsrohr (2)

5.16. Automatischer Verfüllstandskontrollversuch (AP. C)

Der Versuchsaufbau wurde im Hinblick zur Überprüfung der Abdichtungskontrolle mit Hilfe der magnetischen Suszeptibilität entwickelt. Hierbei gab es drei Randbedingungen, die das Design des Versuchstandes einschränkten:

- Die verwendeten Materialien sowie die Messumgebung durften die magnetischen Suszeptibilitätsmessung nicht beeinflussen
- \varnothing der Versuchssäule konnte aufgrund des verwendeten Bartington MS2C-Sensors max. 150 mm betragen
- Versuchshöhe 6 bis 7 m

Aufgrund dieser Vorgaben wurden Wandhalterungen (Anhang; Abbildung 10-6) sowie ein spezieller Sondenfuß (Anhang; Abbildung 10-1 bis Abbildung 10-3) aus PVC entwickelt. Die Herausforderung am Sondenfuß bestand darin, die bedingt durch die Suspensionssäule im Abschluss Versuchssäule/Sondenfuß auftretenden Kräfte durch Reibung mittels einer Abfangschelle (Anhang; Abbildung 10-4) aufzunehmen.

In Abbildung 5-14 ist der schematische Aufbau des automatischen Verfüllstandskontrollversuchs inklusive des Monitoringsystems dargestellt. Zum eigentlichen Aufbau wurde ein 6 m langes Polycarbonatrohr (\varnothing 140/150) in den Sondenfuß eingebaut und mittels der Abfangschelle fixiert. Auf das obere Ende des Polycarbonatrohrs wurde mittels einer Spannmuffe ein KG-2000 Einfachabzweig (DN160; 87Grad) installiert, an den mittels einer DN A-125 Storz-Kupplung ein Ablaufschlauch montiert wurde, über den die überschüssige Suspension während des Verfüllvorgangs in einen Container abgeleitet wurde. In das Polycarbonatrohr wurden jeweils eine Doppel-U-Erdwärmesonde (PE100, d 32 x 2,9 mm) bzw. in einem Versuch ein Koaxialsondenrohr (\varnothing = 62 mm) sowie ein Verpressschlauch (PE100, d 32 x 2,9 mm) eingebaut. Der Verpressschlauch wurde über einen Mörtelschlauch (Mörtelkupplung DN 25) an die GerTec-Mischanlage (IS-38E) angeschlossen. Mit der GerTec-Mischanlage wurde der Verfüllbaustoff gemäß den Versuchsbedingungen (Tabelle 6-42) zu einer Suspension angemischt und in den Versuchsstand gepresst. Zur Erfassung der Suspensionsparameter Druck, Durchfluss, Temperatur und Viskosität während des Verfüllvorgangs wurde ein Druckmesser (Boie LPK 131 0-6 bar) sowie ein Coriolis-Durchflussmesser (Endress & Hauser; Promass 83I) zwischengeschaltet (Abbildung 5-14). Zusätzlich wurde der Druck innerhalb der Suspensionssäule mittels eines Druckmessers (Boie LPK 131 0-2 bar) gemessen, der im Sondenfuß installiert war.

Zur magnetischen Suszeptibilitätsmessung kamen die zwei Messmethoden Bartington MS2C (Kapitel 5.13.1.1) sowie der CemTrakker (Kapitel 5.13.2) zum Einsatz. Da sich die beiden Messmethoden aufgrund des Messprinzips gegenseitig beeinflussen, wurde der eigentliche Verfüllvorgang nur mit der Bartingtonsonde MS2C über den gesamten Querschnitt des Polycarbonatrohrs (Verpresssäule) gemessen. Vor dem Verfüllvorgang wurde mit beiden Messmethoden zeitlich versetzt eine Nullmessung durchgeführt. Während des Verfüllvorgangs erfolgte die Messung mit der Bartingtonsonde MS2C. Im Anschluss an den Verfüllvorgang wurde je nach Signalentwicklung mehrfach mit der Bartingtonsonde MS2C die gesamte Verpresssäule gemessen, sowie mit dem CemTrakker alle 4 Schenkel der Doppel-U-Sonde.

Die Bartington MS2C Messmethode ist bereits im Kapitel 5.13.1.1 beschrieben. Hinsichtlich des automatischen Verfüllstandskontrollversuchs musste der Messaufbau modifiziert werden. Ursprünglich war geplant, die Bartingtonsonde über einen Druck- bzw. magnetischen Suszeptibilitäts gesteuerten Schrittmotor auf Höhe des Suspensionsspiegels zu halten. Dies war jedoch aufgrund von Druckschwankungen während der Versuche (Luft in den Anschlussleitungen, Durchmischungsbereich, usw.), sowie aufgrund der Entwicklung der magnetischen Suszeptibilität im Mischungsbereich Suspension/Wasser (hier auch Schwankungen in den einzelnen Chargen), nicht möglich. Daher wurde die Bartingtonsonde auf eine PVC-Platte fixiert und über ein Seilzugsystem händisch auf Höhe des ansteigenden Suspensionsspiegels gehalten. Zur zeitlichen Positionsbestimmung wurde das Seilzugsystem über einen Inkremental Drehgeber (Baumer, EIL 850P) geführt.

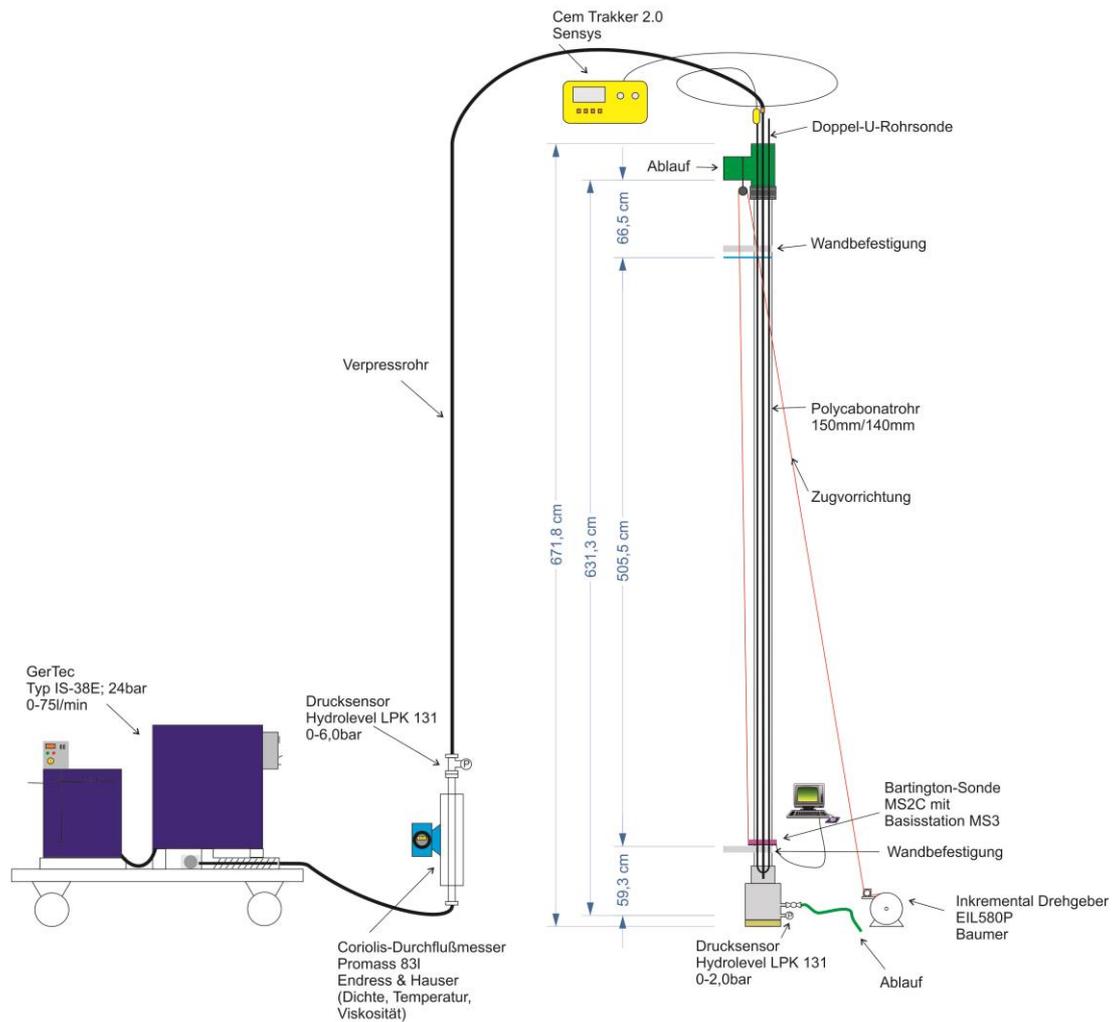


Abbildung 5-14: Schematischer Aufbau des automatischen Verfüllstandskontrollversuchs.

5.17. Batchversuche (AP. D)

In Anlehnung an das Projekt EWS-Tech I wurden auch im Rahmen dieses Projekts Batchversuche durchgeführt. Diese dienen im Rahmen des EWS-Tech II Projekts zur Ermittlung der Sulfatbeständigkeit und der Beständigkeit gegenüber CO₂-haltigen Wässern von Magnetit dotierten Verfüllbaustoffen (07d und 13+d) und selbst entwickelten Mischungen (M3 und M4). Da für einen möglichen chemischen Angriff 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 mit diesem Verfahren beschleunigt werden. Batchversuche sind Kleinmaßstabsversuche, die zur Simulation eines *worst case scenario* dienen. Die Versuche wurden in Anlehnung an DIN EN 12457-4 durchgeführt.

Gewonnene Erfahrungen aus dem EWS-Tech-I Projekt führten zu Versuchsanpassungen für Versuche mit dotierten Materialien im vorliegenden EWS-Tech-II Projekt. Unterschiede in der Versuchsdurchführung sind in Tabelle 5-5 zusammenfassend gegenübergestellt.

Tabelle 5-5: Unterschiede in der Versuchsdurchführung der Batchversuche: EWS-Tech I und EWS-Tech II

	EWS-Tech I	EWS-Tech II
Rührgeschwindigkeit (Anmischen) [U/min]	650	650, 2000
Temperatur [°C]	Raumtemperatur (20 °C)	Raumtemperatur, 8°C
Intervalle Probenahme [d]	1, 2, 5, 10, 14, 28, 56	56
Probenmaterial	Nicht dotiert	dotiert
Prüfwässer	S1, S2, S3, LW Karlsruhe	S2, S3, S4, LW Karlsruhe
Analytik	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Zusätzlich Al ³⁺ , Carbonat und Hydrogencarbonat
XRD	Proben wurden bei 60 °C getrocknet	Proben wurden bei Raumtemperatur getrocknet

Zur Herstellung des Probenmaterials wurden die jeweiligen Baustoffe entsprechend des im Projekt EWS-Tech I beschriebenen Verfahrens angemischt. Dabei wurde jeder Verfüllbaustoff mit zwei unterschiedlichen Drehzahlen des Rührwerks von 650 U/min und 2000 U/min hergestellt. Die Proben wurden unter Leitungswasser-Atmosphäre für 28 d ausgehärtet, getrocknet, mit dem Backenbrecher zerkleinert und für 5 min in der Achatmühle gemahlen.

Das auf diese Weise vorbereitete Probenmaterial wurde mit der entsprechenden Reaktionsflüssigkeit (Zusammensetzung siehe Kapitel 5.2) versetzt und in einem Überkopf-Schüttler (Fa. Heidolph) für den Zeitraum von 56 d bei maximaler Geschwindigkeit geschüttelt. Blindproben mit der entsprechenden Reaktionsflüssigkeit wurden mitgeschüttelt und wie die eigentlichen Proben behandelt und analysiert. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur (20 °C) und bei 8°C durchgeführt. Eine Übersicht über die Versuchsbedingungen und Untersuchungsmethoden gibt Tabelle 5-6.

Jeweils zu Versuchsbeginn und –ende wurden die elektrochemischen Parameter wie pH-Wert, Redoxpotential (Eh) und elektrische Leitfähigkeit 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 5-6). Eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungsmethoden befindet sich in Kapitel 5.10). Die wässrigen Proben wurden erst unmittelbar vor der Analyse angesäuert, da es durch die Aufbewahrung angesäuerter Proben von Material 13+d zu Ausfällung von elementarem Schwefel kommen kann (Vgl. Abschlussbericht Projekt EWS-Tech I). Der abfiltrierte Feststoff wurde für rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen bei Raumtemperatur getrocknet und unter Stickstoffatmosphäre bis zur Analyse aufbewahrt.

Tabelle 5-6: Batchversuche: Versuchsparameter und Untersuchungsmethoden

VERSUCHSPARAMETER	
Feststoff-Einwaage [g]	40
Flüssigkeitsmenge [ml]	400
Art der Reaktionslösung	Wasser Typ S2, S3, S4 (Ensinger Sport Medium Mineralwasser), LW (Leitungswasser Karlsruhe)
Reaktionszeit [d]	56
Temperatur [°C]	Raumtemperatur; 8 °C
Rührgeschwindigkeit (Anmischen) [U/min]	650, 2000
ANALYTIK	
<u>Reaktionslösung</u>	
pH, Redoxpotential, el. Leitfähigkeit	
HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	Alkalinitätstest
Al ³⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Photometrie
Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)
<u>Feststoff</u>	Röntgendiffraktometrie (XRD)

5.18. Umströmungsversuche (AP. D)

Neben den Batchversuchen wurden zur Untersuchung der Sulfat- und Säurebeständigkeit die Verfüllbaustoffe zusätzlich in Umströmungsversuch ausgelagert. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung befindet sich im Abschlussbericht des EWS-Tech I Projekts (Riegger et al. 2017). Die Versuche wurden dabei bis auf wenige Parameter weitgehend unter den gleichen Bedingungen durchgeführt. Verändert wurden folgende Parameter:

- Mischgeschwindigkeit statt nur 650 U/min wurden Versuche bei 650 U/min sowie bei 2000 U/min durchgeführt
- verwendete Wässer S2, S3, S4 sowie LW
- Versuchsprismen wurden kontinuierlich umströmt
- Versuche wurden unter Raumtemperatur sowie unter ca. 8°C durchgeführt

Die in den Ergebnissen verwendeten Kürzel sind in Abbildung 5-15 erklärt. Die Versuchsparameter der Umströmungsversuche sowie die durchgeführten Untersuchungsmethoden sind in Tabelle 5-7 aufgelistet.

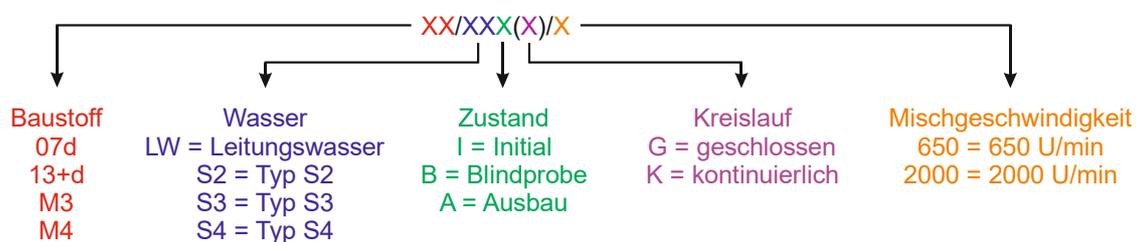


Abbildung 5-15. Nomenklatur der verwendeten Kürzel

Tabelle 5-7: Versuchsparameter und Untersuchungsmethoden der durchgeführten Umströmungsversuche

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Versuchsparameter				
Verfüllmaterial	07d, 13+d	07d, 13+d	M3, M4	M3, M3
Temperatur	21°C	8°C	21°C	8°C
Wässer	S2, S3, S4, LW	S2, S3, S4, LW	S2, S3, S4, LW	S2, S3, S4, LW
Untersuchungsmethoden				
Wasser				
Chemismus	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Al ³⁺ , Cl ⁻ , CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Al ³⁺ , Cl ⁻ , CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Al ³⁺ , Cl ⁻ , CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Al ³⁺ , Cl ⁻ , CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻
Physikochemisch	pH, Eh, γ	pH, Eh, γ	pH, Eh, γ	pH, Eh, γ
Feststoff				
Optisch	Foto	Foto	Foto	Foto
Mineralogie	XRD	XRD	XRD	XRD
Karbonatgehalt	DIN 18129	DIN 18129	DIN 18129	DIN 18129
pH-Wert (Feststoff)	DIN 19682-13	DIN 19682-13	DIN 19682-13	DIN 19682-13
Porenverteilung	DIN 66133	DIN 66133	DIN 66133	DIN 66133
Biegezug-/Druckfestigkeit	DIN 196-1	DIN 196-1	DIN 196-1	DIN 196-1
Nadelpenetrometer	ja	ja	ja	Ja
Längenveränderung	ja	ja	ja	Ja
Gewichtsveränderung	ja	ja	ja	Ja

6. ERGEBNISSE (AGW; EIFER; MPA)

6.1. Entwicklung der Referenzverfüllbaustoffe (AP A)

Um Untersuchungen zu Wechselwirkung der rheologischen Suspensionseigenschaften mit dem Bohrloch unter definierten Bedingungen durchführen zu können sollte im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes neben marktverfügbaren Verfüllbaustoffen auch vier eigens entwickelte Referenzverfüllbaustoffe mit definiert eingestellten rheologischen Eigenschaften dem Untersuchungsprogramm unterzogen werden.

Auf Grundlage der Erfahrung des Vorgängerprojekts EWS-Tech wurden bekannte und neue Rohstoffe ausgewählt die zur Formulierung der Referenzverfüllbaustoffe dienen sollten. Die Charakterisierung der einzusetzenden Ausgangsstoffe diente dabei als Ausgangsbasis zum Entwurf der Referenzverfüllbaustoffrezeptur

Diese eigens entwickelte Referenzverfüllbaustoffe (Mischung M1, M2, M3 und M4) sollten die relevantesten Eigenschaften, die das Verfüllverhalten und die Bildung von Fehlstellen beeinflussen, wie Fließgrenze, Thixotropie und Entmischungsneigung berücksichtigen.

Für die zu entwickelnden Referenzverfüllbaustoffe sollten magnetisch anregbare Stoffe beschafft und auf ihre magnetische Suszeptibilität hin untersucht werden, mit dem Ziel diese als Dotiermaterial in den zu entwickelnden Verfüllbaustoffen einzusetzen. In einem ersten Schritt wurden neun Magnetite unterschiedlicher Korngröße von unterschiedlichen Herstellern geordert. Ziel war es, mindestens drei der Magnetite, die einen möglichst großen Korngrößenbereich abdecken sollten, für die Verfüllbaustoffentwicklung auszuwählen.

Im nächsten Schritt sollten die Dotiermaterialien chemisch und physikalisch charakterisiert und insbesondere ihre magnetische Suszeptibilität bestimmt werden. Im Anschluss daran sollte eine erste Versuchsserie durchgeführt werden, bei der die zuvor genannten Dotiermaterialien einer standardisierten Zementmischung in unterschiedlichen Dosierungen hinzugegeben werden, um anschließend die magnetische Suszeptibilität dieser Zementproben zu bestimmen. In einer weiteren Versuchsserie sollten anschließend die Korngrößenverteilung („KGV“) der magnetischen Dotiermaterialien verändert werden und die Auswirkungen auf die magnetischen Suszeptibilität bei Einsatz in den Zementmischungen bestimmt werden (Kapitel 4.5.2.1).

In Anlehnung an die auf dem Markt verfügbaren dotierten Verfüllbaustoffe, sollen die zu entwickelnden Verfüllbaustoffe mit den marktüblichen Magnetiten dotiert werden. Für eine zweckmäßige Auswahl des Magnetits sind daher Voruntersuchungen mit Bezug auf chemische und physikalische Parameter unabdingbar.

Hierzu wurden neun unterschiedliche Magnetitproben von verschiedenen Lieferanten angefordert. Die Probenauswahl wurde unter Berücksichtigung der Hinweise von Seiten der Magnetithersteller und -lieferanten bezüglich der geplanten Einsatzgebiete getätigt. Eine Übersicht der bestellten Magnetite kann Tabelle 6-1 entnommen werden.

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der ausgewählte Magnetitproben für die Voruntersuchungen der magnetischen Suszeptibilität

Bezeichnung	Lieferant
Mg1	Lieferant 1
Mg2	Lieferant 2
Mg3	Lieferant 3
Mg4	Lieferant 3
Mg5	Lieferant 3
Mg6	Lieferant 3
Mg7	Lieferant 4
Mg8	Lieferant 4
Mg9	Lieferant 4.

6.1.1. Charakterisierung der Dotiermaterialien

An allen neun Rohmagnetite-Proben (Mg1 bis Mg9) wurden, um eine Bewertung der Bestandteile der unterschiedlichen Magnetite zu ermöglichen, deren Mineralphasen bestimmt. Die ermittelten physikalischen Parameter umfassen im Einzelnen magnetische Suszeptibilität, Granulometrie, Werkstoffdichte sowie Wasseranspruch.

Die Mineralphasen der Rohmagnetite wurden mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) analysiert. In Abbildung 6-1 ist der Einbau einer Probe in das Röntgendiffraktometer D8 der Firma Bruker dokumentiert. Die magnetische Suszeptibilität der reinen Magnetite wurde mittels Bartington MS2B Sensor ermittelt. Die Werkstoffdichten wurden mit Hilfe eines Helium-Pyknometers nach DIN EN ISO 1183:2000-05 bestimmt. Die Granulometrie wurde sowohl nach ISO 13320:2009-10 mittels Lasergranulometer bestimmt, als auch mit Hilfe des am Institut für Thermische Verfahrenstechnik (TVT) des KIT befindlichen Cam-Sizers vermessen. Der Wasseranspruch der unterschiedlichen Magnetite wurde mit dem Verfahren nach Punkte gemäß DfStb-Richtlinie „selbstverdichtender Beton“ bestimmt. Die hierbei ermittelte Wassermenge beschreibt die auf den Feststoff bezogene Wassermenge, bei der der Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension erreicht wird. Diese spielt eine wesentliche Rolle bei der Optimierung und Entwicklung selbstverdichtender Betone.



Abbildung 6-1: Röntgendiffraktometer (XRD) des IMB/MPA beim Einbau einer Probe vor einer Messung

Außer den Proben Mg1 und Mg2 wiesen die Proben keinen erkennbaren Anteil von Nebenbestandteilen auf. Die Nebenbestandteile in den Produkten Mg1 und Mg2 deuten auf anwesendes Nebengestein hin. Dies lässt sich auch mit der Abnahme der Dichte dieser beiden Proben bestätigen. Die Proben Mg3 bis Mg9 besitzen einen höheren Anteil des Minerals Fe_3O_4 und eine Dichte, die der Reindichte von Magnetit $5,2 \text{ g/cm}^3$ für experimentelle Bestimmungen sehr ähnlich ist (Grotzinger et al. 2017). Bei einer möglichen Korrosion des Magnetits und einer damit verbundenen Freisetzung von dessen umweltrelevanten Nebenbestandteilen, sollte eine potentielle Umweltbelastung überprüft werden.

Ein für die Auswahl relevantes Kriterium war die magnetische Suszeptibilität. Hierzu wurden die neun reinen Magnetite nach einer Trocknung bei 105°C mit dem MS2B Sensor vermessen (von jedem Magnetit eine A & B Probe), um ein Ranking nach der Signalstärke aufstellen zu können. Tabelle 6-2 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen.

A & B Probe passen jeweils gut zusammen. Rot unterlegt (Probe Nr.3 A und 7 B) ist der Magnetit mit dem stärksten Signal. Magnetit 3 und 7 haben ein fast identisches Signal und sind die Magnetite mit den größten mittleren Korndurchmessern. Ausgehend von diesen Maximalwerten (=100%) wurde der prozentuelle Anteil der Signalstärken der anderen Magnetite berechnet, um so ein Ranking zu erhalten. Die Magnetite 5, 6, 8 und 9 liegen dabei nahe beieinander mit Anteilen zwischen 80-90 %. Darunter folgt Magnetit 4 mit ca. 62% und Magnetit 1 und 2 mit ca. 51 und 50 %. Für spätere Dotierungs-Untersuchungen wurden, basierend auf diesen Ergebnissen, Magnetit 4 (fein-), 8 (mittel-) und 7 (grobkörnig) ausgewählt, um einen möglichst weiten Korngrößenbereich abzudecken, und gleichzeitig ein möglichst starkes Signal zu erreichen.

Tabelle 6-2: Volumenssuszeptibilität (K) von 9 Magnetiten unterschiedlicher mittlerer Korndurchmesser (d50); Maximalwert (Max.) ist rot hervorgehoben.

Probe Nr.	d50 [µm]	K [-]	% von Max.	Probe Nr.	d50 [µm]	K [-]	% von Max.
1 A	54,2	1,19E+00	49,56	1 B	54,2	1,26E+00	52,41
2 A	44,6	1,20E+00	49,89	2 B	44,6	1,21E+00	50,37
3 A	11146,9	2,40E+00	100	3 B	11146,9	2,38E+00	99,15
4 A	20,6	1,49E+00	62,04	4 B	20,6	1,47E+00	61,38
5 A	112,2	2,08E+00	86,58	5 B	112,2	2,07E+00	86,22
6 A	98,2	1,92E+00	80,06	6 B	98,2	2,02E+00	84,20
7 A	1162,8	2,38E+00	99,21	7 B	1162,8	2,40E+00	100
8 A	106,6	2,08E+00	86,73	8 B	106,6	2,10E+00	87,34
9 A	118,8	2,16E+00	89,94	9 B	118,8	2,09E+00	87,13

Der Zusammenhang zwischen der Magnetitkorngöße und der magnetischen Suszeptibilität, wie in Abbildung 4-16 gezeigt, kann in diesen Untersuchungen z.T. bestätigt werden (Abbildung 6-2). Unterhalb ca. 100 µm (d50) nimmt die Suszeptibilität deutlich ab, oberhalb 100 µm (d50) ist zwar keine Konstanz erreicht wie bei Franzreb (2003) und Svoboda (1987), der zu beobachtende Anstieg ist aber vergleichsweise gering. Zu bedenken ist auch, dass in diesem Fall der d50 angegeben ist, so dass auch andere Korngrößen vertreten sind, die das Ergebnis gegenüber der Literatur verfälschen können. Unterhalb 100 µm (d50) ist die Korrelation zwischen 20 und 60 µm nicht ganz eindeutig. Eventuell spielen Magnetitverunreinigungen an dieser Stelle eine Rolle.

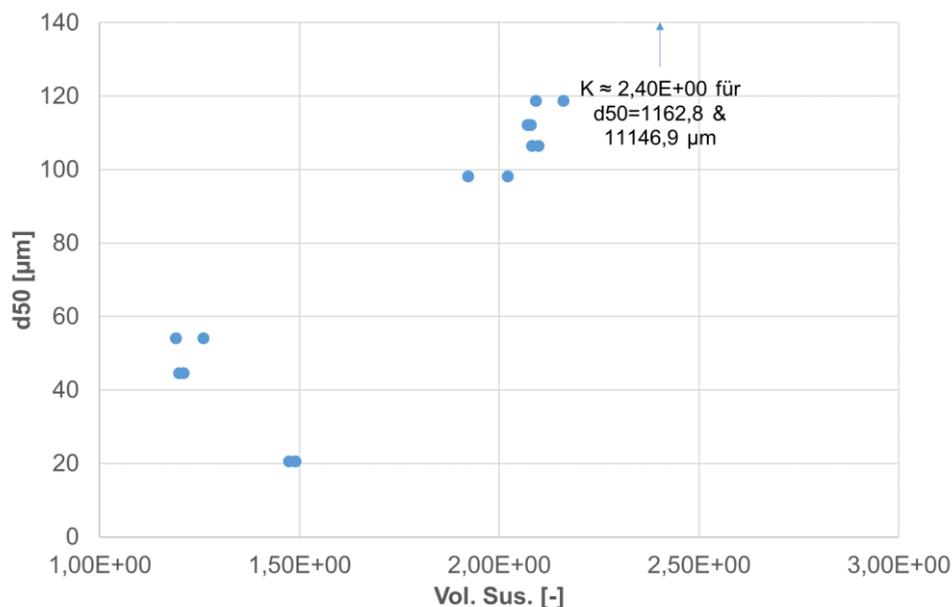


Abbildung 6-2: Zusammenhang zwischen Korngröße und magnetischer Volumenssuszeptibilität K (Roter Kreis markiert einen Ausreißer).

Die Ergebnisse der Dichtebestimmung sowie des Wasseranspruchs nach Punkte sind in Tabelle 6-3 dargestellt. Ebenfalls aufgeführt sind die granulometrischen Parameter d_{10} , d_{50} und d_{90} , die die Siebweite beschreiben bei der 10, 50 bzw. 90 M.-% der Probe das Sieb passieren.

Tabelle 6-3: Dichte, Wasseranspruch nach Punkte sowie Granulometrie der Magnetitproben Mg1 bis Mg9.

		Mg1	Mg2	Mg3	Mg4	Mg5	Mg6	Mg7	Mg8	Mg9
Dichte	[g/cm ³]	4,6745	4,8175	5,1072	5,1319	5,121	5,1285	5,1074	5,129	5,1211
Wasseranspruch (Punkte)	[Vol.-%]	35,33	33,69	26,34	42,06	32,67	36,56	26,68	35,51	32,31
Granulometrie	d_{10} [µm]	14,1	10,6	460,9	7,4	19,3	32,6	380,4	32,9	21,6
	d_{50} [µm]	54,2	44,6	1146,9	20,6	112,2	98,2	1162,8	106,6	118,8
	d_{90} [µm]	158,9	124	2340,4	40,8	307,1	202,5	2718,6	258,3	310,8

In Abbildung 6-3 sind die Ergebnisse der Partikelgrößenanalyse sowie der magnetischen Suszeptibilität der reinen Magnetite dargestellt.

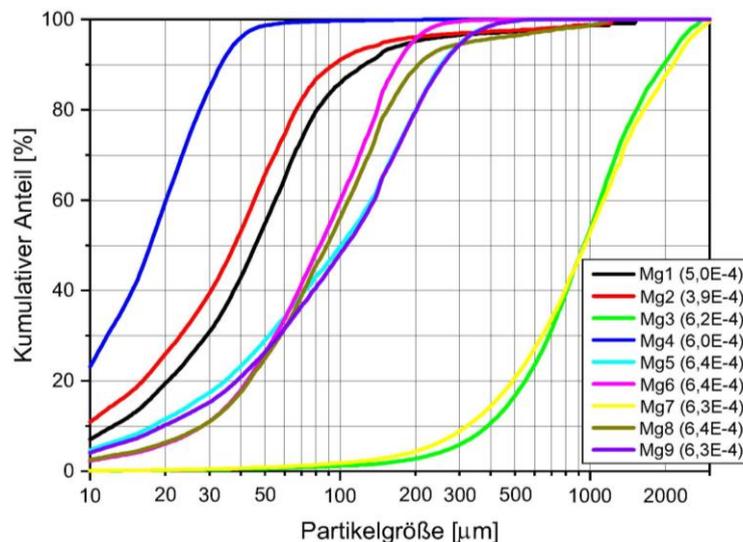


Abbildung 6-3: Partikelgrößenanalyse der Magnetite mittels Cam-Sizer. Die In Klammern angegebenen Werte in der Legende stellen die magnetische Suszeptibilität der reinen Magnetite dar. Diese wurde mit Hilfe eines Bartington MS2B Sensors gemessen.

Wie in Abbildung 6-3 zu erkennen ist, sind die Korngrößenverteilungen der Magnetite unterschiedlich. Hierbei sind sowohl sehr feine Magnetite (Mg4) als auch gröbere Magnetite vorhanden (Mg3 und Mg7). Auch die magnetische Suszeptibilität variiert zwischen $3,9 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{kg}$ und $6,4 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{kg}$. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass die gemessene magnetische Suszeptibilität nicht eindeutig mit der Magnetitkorngröße korreliert. Diese wird in Abbildung 6-4 dargestellt, wo die magnetische Suszeptibilität neben der Partikelgröße bei 50 M-% des Durchgangs d_{50} darge-

stellt ist. Die Abweichungen von dem in der Praxis beobachteten Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Suszeptibilität - Magnetite mittlerer Korngröße wiesen die in der Praxis die höchste Suszeptibilität auf - ist wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Lagerstätten und chemischen Zusammensetzungen der Magnetite zurückzuführen.

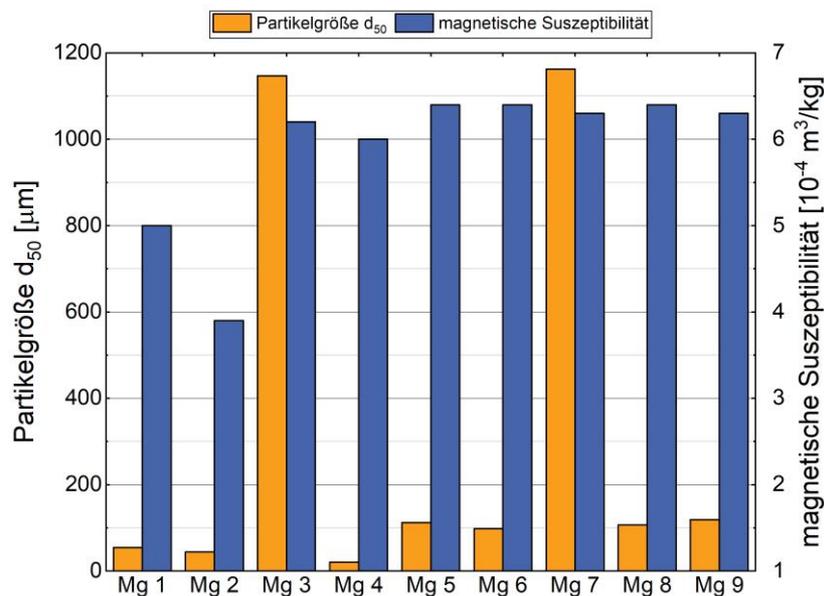


Abbildung 6-4: Ergebnisse der Bestimmung der Partikelgröße d_{50} und der magnetischen Suszeptibilität der jeweiligen Magnetite Mg1 bis Mg9

Die Magnetite mit einer hohen magnetischen Suszeptibilität konnten aufgrund der Partikelgrößenverteilung jeweils einem Bereich mit feinen (Mg4), mittleren (Mg5, Mg6, Mg8 und Mg9) oder groben (Mg3 und Mg7) Partikelgrößen zugeordnet werden.

Für eine detailliertere Untersuchung wurden die Magnetite Mg3, Mg4 und Mg8 ausgewählt, da diese hohe magnetische Suszeptibilitäten besitzen und die drei Partikelgrößenbereiche repräsentieren. Diese ausgewählten Magnetitproben stammen aus demselben Abbauegebiet, sodass der Chemismus des Ausgangsgesteins keinen Einfluss auf weitere Untersuchungen besitzt.

6.1.2. Auswahl des Zementes

Zur sicheren Verfüllung des Ringraums einer EWS ist neben einer lückenlosen Verfüllung des Ringraums, eine schnelle Erhärtung und Verfestigung des Verfüllbaustoffs erforderlich. Dieser Vorgang wird maßgeblich vom verwendeten Zement beeinflusst. Dieser ist im System für die Entwicklung der Festigkeit sowie das Ansteifen einer Mischung verantwortlich.

Darüber hinaus sind für Erdwärmesonden Zemente mit einem hohen Sulfatwiderstand zu verwenden, um Schäden durch von Sulfat hervorgerufenen Treiberscheinungen zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund wurden insgesamt drei Zemente (Zement 1, Zement2, Zement 3) von drei

Herstellern unter Berücksichtigung der geplanten Einsatzgebiete geordnet. Die ausgewählten Zemente wurden anschließend hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften eingehend charakterisiert. Die im Labor bestimmten, charakteristischen Eigenschaften der Zemente können Tabelle 4-4 entnommen werden.

Tabelle 4-4: Physikalische Eigenschaften der ausgewählten Zemente

Physikalische Eigenschaften	Prüfnorm	Einheit	Zement 1 Class G	Zement 2 CEM I 42,5 N SR3	Zement 3 CEM I 32,5 N SR3
Dichte	EN ISO 1183	[g/cm ³]	3,182	3,204	3,204
Mahlfeinheit (Blaine)	DIN EN 196-6	[cm ² /g]	3257	3684	3585
Wasseranspruch	DIN EN 196-3	[M.-%]	24,4	25,2	24,8
Wasseranspruch (Punkte)	DAfStB SVB	[Vol.-%]	37,1	-	-
Erstarrungsbeginn	DIN EN 196-3	[min]	239	250	335
Erstarrungsende	DIN EN 196-3	[min]	285	330	400
Druckfestigkeit, 1d	DIN EN 196-1	[MPa]	-	14,0	7,2
Druckfestigkeit, 2d	DIN EN 196-1	[MPa]	17,4	-	-
Druckfestigkeit, 7d	DIN EN 196-1	[MPa]	28,8	31,9	27,3
Granulometrie, d ₁₀	ISO 13320	[µm]	1,40	0,87	1,09
Granulometrie, d ₅₀	ISO 13320	[µm]	15,63	8,86	13,70
Granulometrie, d ₉₀	ISO 13320	[µm]	43,72	34,90	45,09

Es ist zu erkennen, dass die drei ausgewählten Zemente sich hinsichtlich ihrer Dichte und ihres Wasseranspruchs kaum unterscheiden. Allerdings haben die drei Zemente signifikant unterschiedliche Erstarrungszeitpunkte und Frühfestigkeiten. Vor dem Hintergrund der Verwendung als Verfüllbaustoff für Erdwärmesonden ist ein früher Beginn der Erhärtung erwünscht. Dieser ist insbesondere bei Zement 1 und Zement 2 zu erkennen. Zement 3 weist hingegen eine geringe Frühfestigkeit auf. Außerdem ist der Erstarrungszeitraum bei Zement 1 kürzer als bei Zement 2. Aus diesen Gründen, sowie den bereits vorliegenden Erfahrungen mit Zement 1, wurde diesem Zement der Vorzug gegeben.

Der ausgewählte Zement 1 ist ein Bohrlochzement „Class G“, der den Anforderungen nach API Spec 10A bzw. DIN EN ISO 10426-1 [8; 9] genügt und somit ebenfalls einen hohen Sulfatwiderstand (HSR) aufweist.

6.1.3. Versuche zur Auswahl und Dosierung des Dotiermaterials

Die zuvor ausgewählten Magnetite Mg3, Mg4 und Mg8 (Kapite 4.1.1) sollten in verschiedenen Dosierungen mit dem für die Referenzverfüllbaustoffe ausgewählten Zement homogenisiert und mit Wasser zu einer Zement-Magnetit-Suspension angemischt werden.

Die Magnetite Mg3 (grob), Mg4 (fein) und Mg8 (mittel) wurden in verschiedenen Dosierungen mit dem Zement 1 „Class G“ und Wasser zu einer Zement-Magnetit-Suspension angemischt. Hierbei wurde ein w/z-Wert von 0,4 für alle Versuche gewählt. Vor dem Hintergrund der vorangegangenen Literatursichtung sowie einer wirtschaftlichen Betrachtung der Magnetitdosierung wurden Versuche mit 1,0; 2,5 und 5,0 Vol.-% Magnetit in der Feststoffphase durchgeführt. Diese liegen

im Rahmen üblicher Magnetitdosierungen (Triller et al. 2016). Insgesamt wurden daher neun unterschiedliche Mischungen hergestellt. Zudem wurde jede Mischung mindestens zweifach hergestellt, um einen möglichen Einfluss durch die Probenherstellung auszuschließen, woraus insgesamt mehr als 18 Versuche resultierten. Inklusive der Vorversuche und Mehrfachbestimmungen wurden insgesamt 24 Versuche durchgeführt. In Tabelle 4-5 ist beispielhaft der Mischungsentwurf für die Mischung 23 mit Mg3 (grob) in einer Dosierung von 1,0 Vol.-% dargestellt.

Tabelle 4-5: Zusammensetzung der Mischung 23 mit Mg3 (grob) in einer Dosierung von 1,0 Vol.-% zur Herstellung von 2,5 l Suspension.

Ausgangsstoff	Dichte [g/cm ³]	Einwaage [g]
Zement 1 Class G HSR	3,18	3484,8
Magnetit Mg3	5,11	56,5
Wasser	1,00	1393,8

Alle Mischungen und Prüfkörper wurden im Labor hergestellt. Hierbei erfolgte zunächst eine Trockenmischung der Ausgangsstoffe für 5 Minuten in einem Mörtelmischer nach DIN EN 196-1 [7], vergleiche Abbildung 6-5.



Abbildung 6-5: Mörtelmischer nach DIN EN 196-1 [7] bei der Durchmischung des Magnetits und Zementes

Parallel wurde ein Gefäß mit 5 l Nennvolumen mit der entsprechenden Einwaage an Wasser gefüllt. Nach Ende der Trockenmischung wurde das zusammengemischte Pulver in das Gefäß hineingeben und unter ständigem Rühren mittels eines Stativ-Mischers bei 650 U/min für 5 min gemischt.

Die zuvor hergestellte Suspension wurde anschließend in zylindrische PVC-Schalungen mit 20 cm Länge eingefüllt und luftdicht verschlossen. Die hergestellten Proben wurden dann unmittelbar in einen Probenwender eingebaut und nach vorangeschrittener Erhärtung der Suspension wieder ausgebaut. Durch die Verwendung des Probenwenders sollte der in Vorversuchen beobachteten Entmischungsneigung mancher reiner Zement-Magnetit Suspensionen entgegengewirkt werden und eine Verbesserung der Ergebnisse der Messungen der magnetischen Suszeptibilität ermöglicht werden. Die Analyse der magnetischen Suszeptibilität erfolgte mittels Bartington MS2C Core Logging Sensor (s. weitere Untersuchungen Kapitel 4.5.2.2).

In Abbildung 6-6 sind die gemessenen magnetischen Suszeptibilitäten der unterschiedlichen Mischungen über die gewählte Dotiermenge aufgetragen.

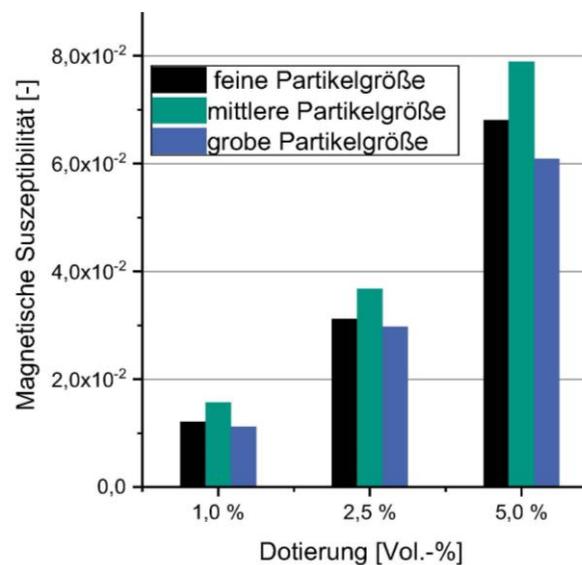


Abbildung 6-6: Analyse der magnetischen Suszeptibilität bei zylindrischen, dotierten Zementsteinproben mittels Bartington MS2C CoreLogger

Die Ergebnisse zeigen eine durchgehend höhere magnetische Suszeptibilität der erhärteten Zement-Magnetit Proben bei mittlerer Partikelgröße der Magnetite gegenüber der feinen oder größeren Partikelgröße. Zudem ist die Partikelgrößenverteilung der mittleren Korngröße die des verwendeten Zements sehr ähnlich, sodass vermutlich einer Sedimentation des Magnetits in der Zement-Magnetit-Suspension entgegengewirkt werden kann.

Aufgrund der durch diese Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse, konnte ein für die Referenzverfüllbaustoffe geeigneter Magnetit mittlerer Korngröße (Mg8) gefunden werden, welches für die Entwicklung des Referenzverfüllbaustoffs im Weiteren verwendet wird.

6.1.4. Auswahl des Quarzfällers

Bei den eingesetzten Quarzsanden bzw. -mehlen handelt es sich um reine Quarze mit einem SiO_2 -Gehalt von $\geq 97,5$ M.-%, die chemischen und physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 4-6 angegeben.

Tabelle 4-6: Chemische und physikalische Eigenschaften der eingesetzten Quarzfüller

Physikalische Eigenschaften	Einheit	Quarzfüller 1	Quarzfüller 2
Physikalische Eigenschaften			
Spezifische Dichte	[g/cm ³]	2,65	2,65
Spezifische Oberfläche (Blaine)	[cm ² /g]	1000	18000
Spezifische Oberfläche (BET)	[m ² /g]	0,3	6,0
Chemische Zusammensetzung			
SiO ₂	[M.-%]	99	97,5
Al ₂ O ₃	[M.-%]	0,3	2,0
CaO + MgO	[M.-%]	0,1	0,1
Na ₂ O + K ₂ O	[M.-%]	0,2	0,1
Glühverlust (1000°C)	[M.-%]	0,25	0,25
Feuchtigkeit	[M.-%]	0,1	0,1

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfolgte mit dem Lasergranulometer. Abbildung 4-7 zeigt die Sieblinien der beiden Quarzfüller im Vergleich zum ausgewählten Zement und zum ausgewählten Magnetit.

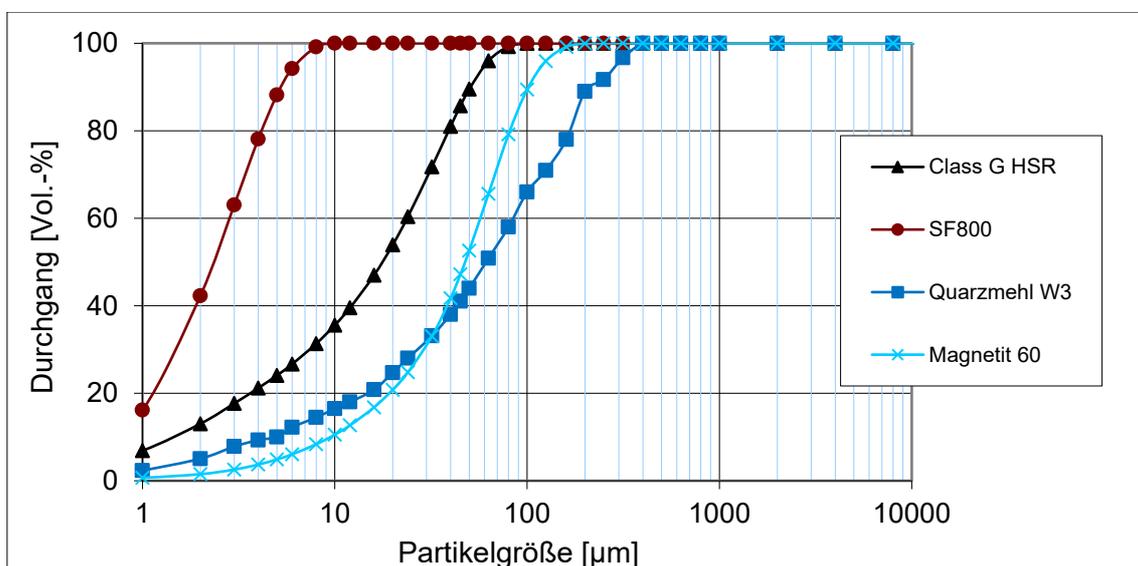


Abbildung 4-7: Das Diagramm zeigt die Sieblinien der ausgewählten Quarzfüller im Vergleich zum ausgewählten Zement und zum in AP 2 ausgewählten Magnetit.

6.1.5. Eingesetzte Zusatzmittel

Bei den Zusatzmitteln wurde auf bewährte Zusatzmittel aus vorherigen Projekten zurückgegriffen. Zur Auswahl standen zwei pulverförmige Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern:

- Melflux AP 101 F
- Melflux 4930 F

Außerdem standen zwei pulverförmige Stabilisierer auf Basis modifizierter Kartoffelstärken zur Verfügung:

- Starvis 3003 F
- Starvis 3050 F

Zum Vergleich der Zusatzmittel wurden rheologische Untersuchungen von Suspensionen mit dem gleichen Feststoffphasengehalt bei einem Wasser/Zement-Wert von 2,16 bzw. einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 0,30 und den verschiedenen Zusatzmitteln durchgeführt.

Der Vergleich der Fließgrenzen (Abbildung 6-7) zeigte nur geringe Unterschiede zwischen beiden Fließmitteln, beide Fließmittel erreichten ähnlich niedrige Fließgrenzen. Beim Vergleich der Absatzmaße (Abbildung 6-8) zeigte sich dagegen, dass das Fließmittel Melflux 4930 F, bei vergleichbaren Fließgrenzen, geringere Absatzmaße aufwies.

Es wurde daher für weitere Versuche das Fließmittel Melflux 4930 F ausgewählt.

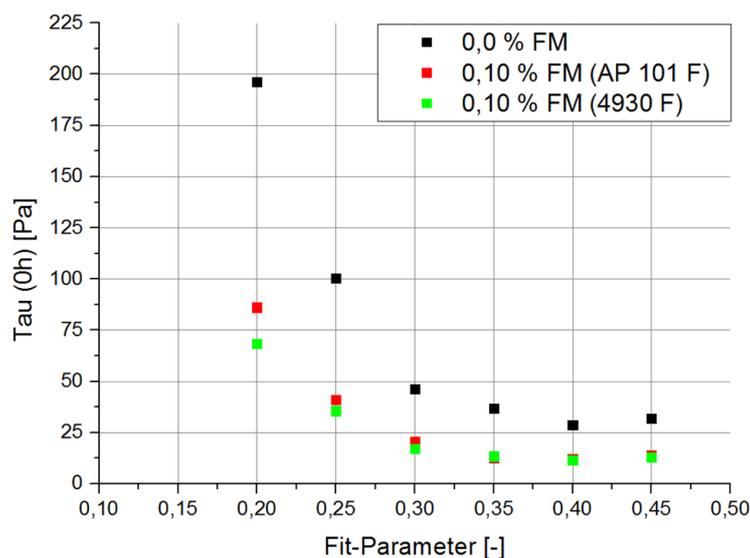


Abbildung 6-7: Fließgrenzen (Tau (0h)) der Suspensionen mit den zwei Fließmitteln Melflux AP 100 F und Melflux 4930 F

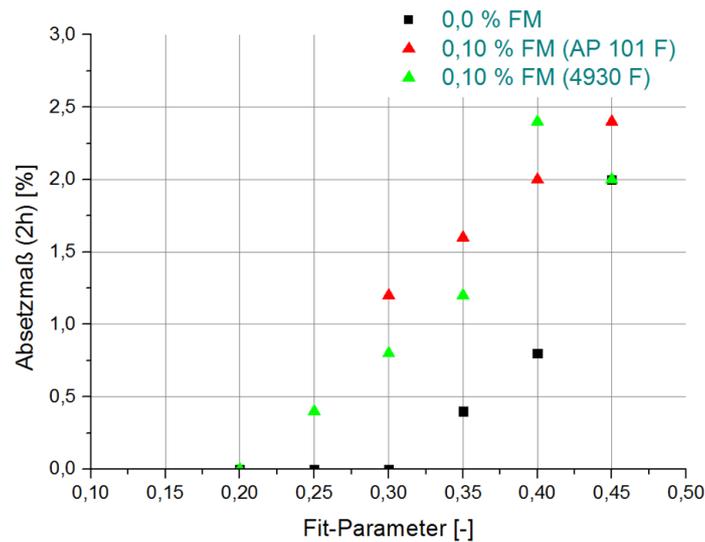


Abbildung 6-8: Vergleich der Absetzmaße der Suspensionen mit den zwei Fließmitteln Melflux AP 100 F und Melflux 4930 F

Beim Vergleich des Einflusses der beiden Stabilisierer auf die Fließgrenze (Abbildung 6-9) zeigte sich kein eindeutiger Unterschied zwischen den beiden Produkten. Beim Vergleich des Einflusses der Dosierung der Stabilisierer auf das Absetzmaß (Abbildung 6-10) zeigte sich jedoch, dass Starvis 3050 F ein geringeres Absetzmaß erreichte als Starvis 3003 F, für weitere Versuche wurde daher Starvis 3050 F ausgewählt.

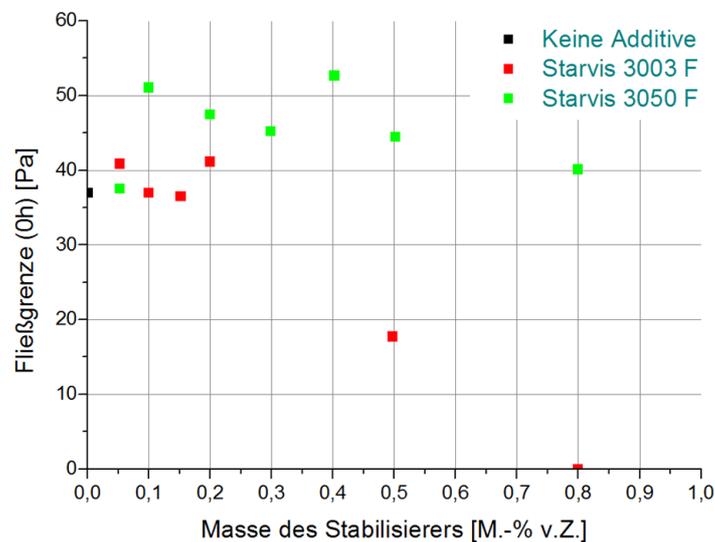


Abbildung 6-9: Fließgrenzen der Suspensionen mit verschiedenen Dosierungen der beiden Stabilisierer Starvis 3003 F und Starvis 3050 F

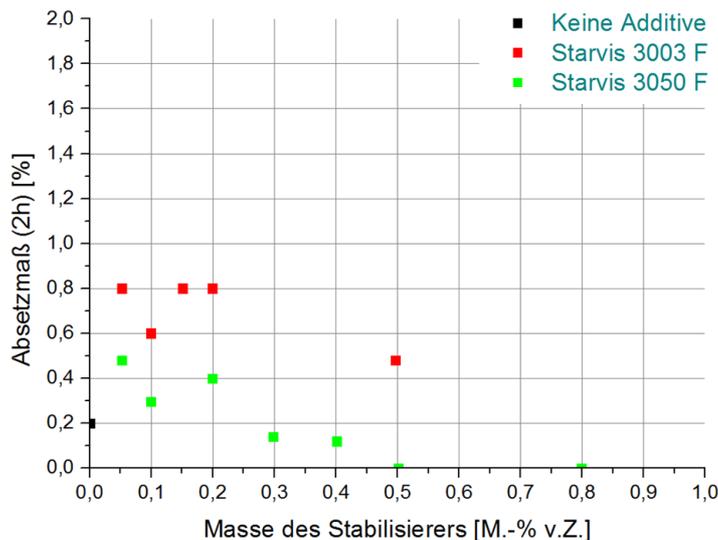


Abbildung 6-10: Absetzmaße der Suspension mit verschiedenen Dosierungen der beiden Stabilisierer Starvis 3003 F und Starvis 3050 F

6.1.6. Angestrebte Eigenschaften der Referenzverfüllbaustoffe

Auf Basis einer im Vorfeld durchgeführten Literaturrecherche wurden die wichtigsten Eigenschaften identifiziert, die das Verfüllverhalten und die Bildung von Fehlstellen beeinflussen. Hierbei handelt es sich um die Fließgrenze, die Thixotropie und die Entmischungsneigung des Verfüllbaustoffs. Um diese Eigenschaften in sinnvoller Kombination abzubilden wurden vier nachfolgenden Mischungskategorien definiert:

- Mischungskategorie 1 (Referenzverfüllbaustoff M1) - Verfüllbaustoff mit hoher Fließgrenze:

Die Fließgrenzen der am Markt zur Verfügung stehenden Produkte variieren in hohem Maße. Es ist zu erwarten, dass durch eine hohe Fließgrenze die Fehlstellenbildung begünstigt wird. Durch Versuche an dieser Kategorie werden die Auswirkungen einer hohen Fließgrenze quantifiziert.
- Mischungskategorie 2 (Referenzverfüllbaustoff M2) - Verfüllsuspension mit hoher Thixotropie:

Die Thixotropie beschreibt die zeitliche Veränderung der rheologischen Eigenschaften und somit auch die zeitliche Änderung der Fließgrenze. Es ist zu erwarten, dass die Höhe der Thixotropie den Einfluss der Verfülldauer auf die Fehlstellenbildung wiedergibt. Gemeinsam mit den Versuchen mit Kategorie 1 kann der Einfluss der Verfülldauer auf die Fehlstellenbildung erfasst werden.
- Mischungskategorie 3 (Referenzverfüllbaustoff M3) - Verfüllsuspension mit niedriger Fließgrenze und unzureichender Entmischungsresistenz:

Auf der Grundlage der Erfahrungen aus der Tiefbohrtechnik ist davon auszugehen, dass die Fehlstellenbildung besonders stark durch eine unzureichende Entmischungsresistenz der Zementsuspension beeinflusst wird. Durch diese Untersuchung wird der Kenntnisstand um den Parameter Entmischungsresistenz erweitert.

- Mischungskategorie 4 (Referenzverfüllbaustoff M4) - Verfüllsuspension mit niedriger Fließgrenze, hoher Entmischungsresistenz und geringer Thixotropie:
Auf Basis strömungstechnischer Überlegungen sollten Zemente mit einer niedrigen Fließgrenze gepaart mit einer hohen Entmischungsresistenz und geringen Thixotropie eine geringe Fehlstellenbildung auch bei längerer Verfülldauer gewährleisten. Diese Arbeitshypothese wird mit den vorliegenden Kategorien überprüft.

Einen Überblick über die angestrebten rheologischen Eigenschaften der vier Referenzverfüllbaustoffe (M1, M2, M3 und M4) gibt Tabelle 4-6.

Tabelle 4-6: Überblick über die angestrebten rheologischen Eigenschaften der Suspensionen

Mischung	Rheologie
M1	Hohe Fließgrenze
M2	Hohe Thixotropie
M3	Niedrige Fließgrenze Niedrige Entmischungsresistenz
M4	Niedrige Fließgrenze Hohe Entmischungsresistenz Geringe Thixotropie

6.1.7. Ansätze zur Mischungsvarianz

Die Entwicklung der Verfüllbaustoffe zu den oben genannten Kategorien erfolgte auf der Grundlage der Ergebnisse der detaillierten Materialuntersuchungen, die im Rahmen des laufenden Projekts durchgeführt wurden. Bei allen Mischungen handelte es sich um Zusammensetzungen, die mit Magnetit dotiert waren um eine Überprüfung der Verfüllung mit Hilfe des Magnetresonanzverfahren (Suszeptibilität) zu ermöglichen. Die Auswahl der Art, der Körnung und der Menge des zu verwendenden Magnetits wurde in AP A2 getroffen. Um eine möglichst einfache Modifikation der Rheologie der Verfüllbaustoffe zu ermöglichen wurde entschieden die Rheologie der Suspensionen nicht über die Zusammensetzung der mineralischen Komponenten zu verändern, sondern vielmehr alleine über die Zugabe der Zusatzmittel zu steuern. Als Ansatzpunkt dienten die rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffs mit jeweils nur einem Zusatzmittel. Wie in Abbildung 6-11 zu erkennen ist beeinflusst der Stabilisierer die Fließgrenze nur geringfügig, während das Fließmittel die Fließgrenze mit zunehmender Dosierung deutlich absenkt. Umgekehrt zeigt Abbildung 6-12 dass das Fließmittel die Absetzmaße deutlich erhöht und der Stabilisierer die Absetzmaße in etwas geringerem Maße zu reduzieren vermag.

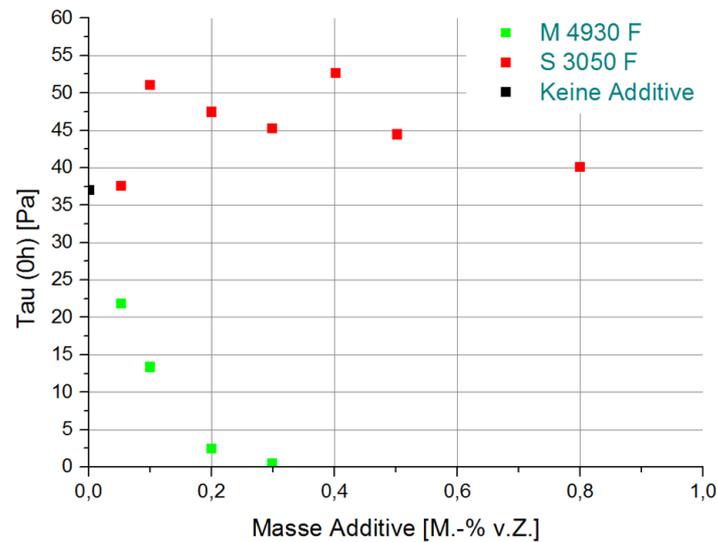


Abbildung 6-11: Fließgrenze der Verfüllbaustoffe mit jeweils nur einem Zusatzmittel bei getrennter Zugabe

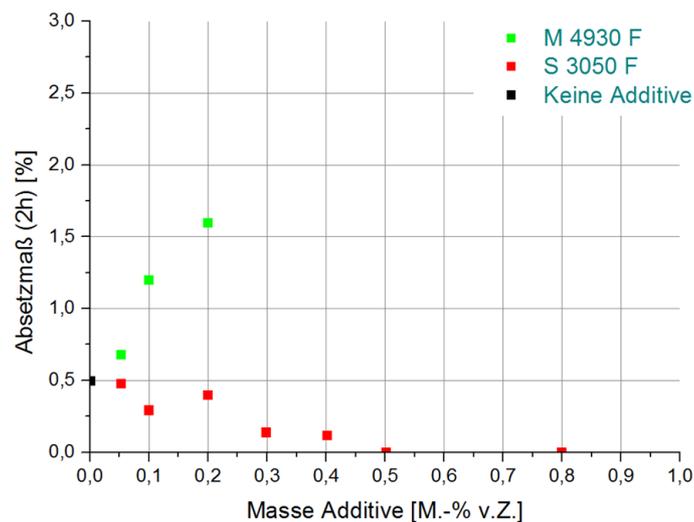


Abbildung 6-12: Absetzmaße der Verfüllbaustoffe mit jeweils nur einem Zusatzmittel bei getrennter Zugabe

In einem zweiten Schritt wurden beide Zusatzmittel gleichzeitig einem Verfüllbaustoff zugegeben, das Mischungsverhältnis beider variiert und dabei das Absetzmaß bestimmt (Abbildung 6-17). Die Variation von Fließmitteldosierung sowie der Dosierung des Stabilisierers ergab mehrere Erkenntnisse:

- Hohe Absetzmaße von > 1,0 M.-% werden nur ohne Stabilisierer erreicht
- Ohne Stabilisierer zeigt die Suspension nur ohne Fließmittel ein akzeptables Absetzmaß von 0,5 M.-%. Schon mit der geringsten Fließmitteldosierung steigt das Absetzmaß auf über 1,0 M.-%.
- Mit einer hohen Fließmitteldosierung und gleichzeitig einer hohen Dosierung des Stabilisierers ist das Absetzmaß mit < 0,10 M.-% am geringsten.

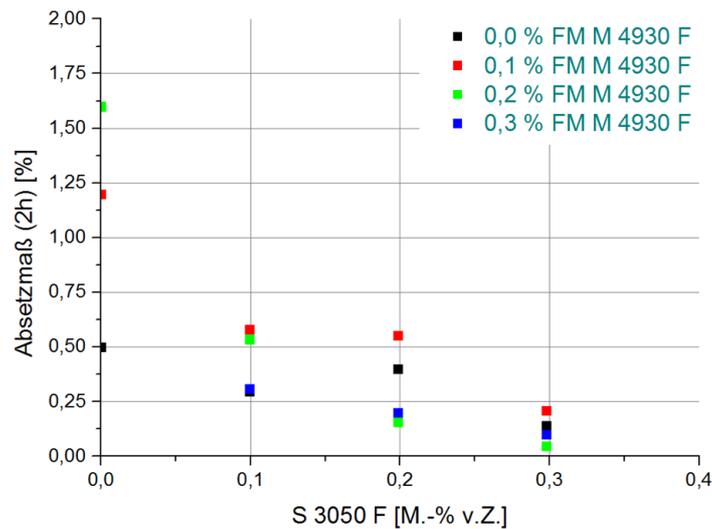


Abbildung 6-13: Absetzmaße für verschiedene Kombinationen der Dosierungen von Fließmittel und Stabilisierer

Abbildung 6-14 vergleicht die Thixotropie, d. h. den Anteil der Struktur, die nach dem Ende der Belastungsphase wieder aufgebaut wird, für verschiedene Kombinationen der Dosierung von Fließmittel und Stabilisierer.

Wie der Versuch erkennen lässt steigt die Thixotropie mit zunehmender Dosierung des Fließmittels an (Parallelverschiebung der Kurven nach oben), fällt jedoch mit zunehmender Dosierung des Stabilisierers ab. Dies ist möglicherweise damit zu erklären, dass der Stabilisierer eine Struktur aufbaut, die nach ihrer Zerstörung nicht so schnell wiederaufgebaut wird.

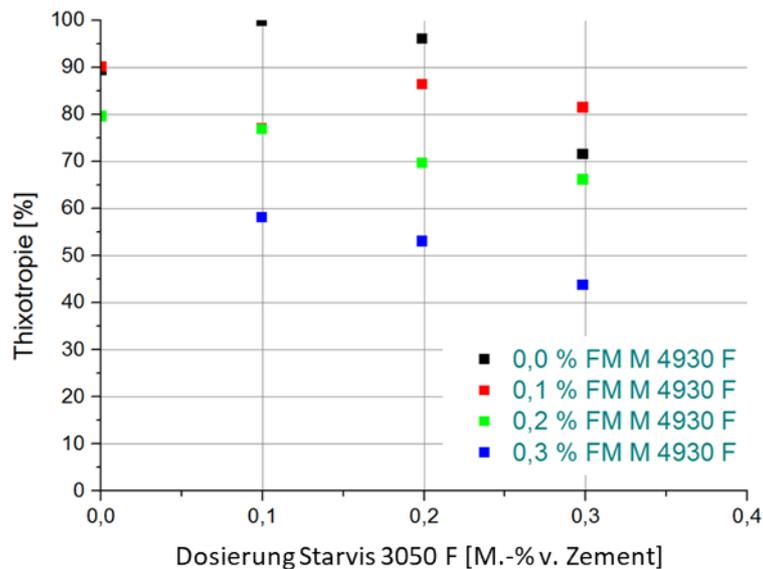


Abbildung 6-14: Anteil der Struktur, die nach Ende der Belastungsphase wieder aufgebaut wird (Thixotropie) für verschiedenen Kombinationen der Dosierung von Fließmittel und Stabilisierer

6.1.8. Mischungsrezeptur der Referenzverfüllbaustoffe mit definierten Eigenschaften

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Verfüllsuspensionen mit definierten rheologischen Eigenschaften diente ein Basis-Verfüllbaustoff, dessen Eigenschaften über Zusatzmittel angepasst wurden. Die Zusammensetzung dieses Basis-Verfüllbaustoffs ist in Tabelle 4-7 angegeben.

Tabelle 4-7: Zusammensetzung des Basis-Verfüllbaustoffs

Komponente	Einwaage [g]	Dichte [g/ml]	Trockenanteil [M.-%]	Trockenanteil [Vol.-%]
Zement 1 Class G HSR	535,4	3,18	13,82	12,01
Quarzfüller 1	2749,5	2,65	71,00	74,03
Quarzfüller 2	444,2	2,65	11,47	11,96
Magnetit Mg8	143,8	5,13	3,71	2,00
Wasser	1097,9	1,0	W/Z = 2,05; W/F = 0,28	W/F = 0,56

Um die angestrebten Eigenschaften zu erreichen wurde die Kombination der Zusatzmittel variiert. Tabelle 4-8 gibt eine Übersicht der verwendeten Zusatzmittelkombinationen zum Erreichen der angestrebten rheologischen Eigenschaften nach Tabelle 4-6.

Tabelle 4-8: Zusatzmittelkombinationen in M.-% bezogen auf die Masse des Zements

Hersteller, Produkt	Einheit	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
BASF Melflux 4930 F	[% v. Z.]	-	0,30	0,25	0,20
BASF Starvis 3050 F	[% v. Z.]	0,30	1,00	-	0,35

6.1.9. Rheologische Charakterisierung der Referenzverfüllbaustoffe

Die rheologischen Eigenschaften der Suspension werden durch die Betonzusatzmittel Fließmittel und Stabilisierer eingestellt. Als Ausgangsstoffe für die Referenzverfüllbaustoffe dienten Zement, Quarzmehl und Quarzsand, deren Zusammensetzung in einer ersten Versuchsreihe optimiert wurde, um eine hohe Packungsdichte und somit eine hohe Dichtheit zu erreichen. Durch die Variation des Phasengehaltes wurde ein Optimum zwischen Verarbeitbarkeit und Entmischungsre-

sistenz des Baustoffs erzielt. Der Einfluss der Dosierung beider Zusatzmittel auf die rheologischen Eigenschaften wurde in einer dritten Versuchsreihe quantifiziert. Nach einer Feinabstimmung der Additive wurden vier Mischungsrezepturen bereitgestellt.

Alle Mischungen wurden auf Absetzmaß, Dichte, Ausbreitmaß, Marsh-Zeit, Fließgrenze (Kugelharte), Fließgrenze (Rheometer), Viskosität sowie Thixotropie hin untersucht. Zum Vergleich mit den von allen Projektpartnern mit diesen vier Referenzverfüllbaustoffen (M1, M2, M3 und M4) durchgeführten Versuchen, erfolgte eine detaillierte, auch zeitabhängige rheologische Charakterisierung der Referenzverfüllbaustoffe.

6.1.9.1. Fließgrenze

Die Fließgrenzen der Suspensionen wurden mit einem Rotationsrheometer der Firma Thermo Fisher Scientific in einem schubspannungsgesteuerten Versuch ermittelt. Hierzu wurde die Suspension unmittelbar nach dem Herstellen in einem Kolloidalmischer in das Rheometer überführt. Abbildung 6-15 zeigt die ermittelten Fließgrenzen der vier Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4 im Vergleich.

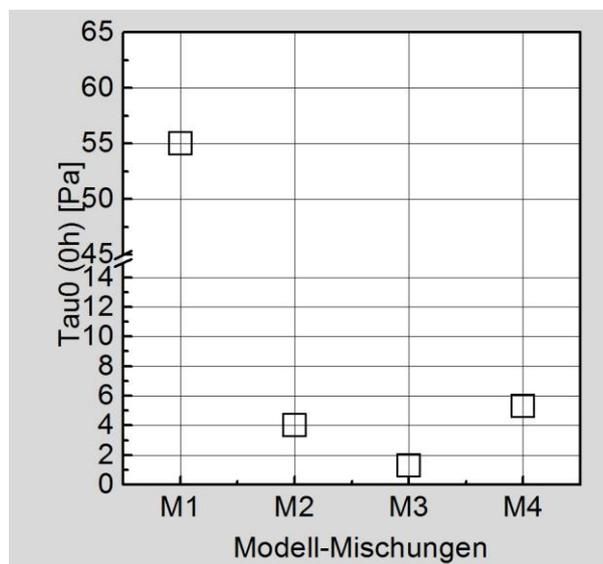


Abbildung 6-15: Vergleich der Fließgrenzen der vier Modell-Mischung (Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4)

Wie in Abbildung 6-15 zu erkennen ist wurde das Ziel mit Mischung M1 eine Suspension mit hoher Fließgrenze von zu entwickeln erreicht. Die übrigen Suspensionen M2 bis M4 weisen vergleichbar niedrige Fließgrenzen auf die um etwa den Faktor 10 niedriger liegen als die Fließgrenze der Mischung M1 mit ca. 55 Pa.

6.1.9.2. Absetzmaß

Eine charakteristische Größe für die Stabilität einer Suspension ist das Absetzmaß, es gibt an wieviel Wasser relativ zur Masse der Suspension sich in einem Zeitraum von 2 h an der Oberfläche der Suspension absetzt. Abbildung 4-6-16 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung des Absetzmaßes.

Das Absetzmaß wird von mehreren rheologischen Parametern sowie dem Dichteunterschied in der Suspension beeinflusst; es ist daher nicht zu erwarten, dass es direkt mit einer rheologischen Kenngröße korreliert.



Abbildung 4-6-16: Bestimmung des Absetzmaßes einer Suspension mit Hilfe eines mit Folie verschlossenen 250 ml Messzylinders aus Glas

Wie zu erwarten war, zeigt die Mischung M3 mit geringer Fließgrenze das höchste Absetzmaß während die Mischung M1 mit hoher Fließgrenze ein geringes Absetzmaß aufweist. Die beiden Mischungen M2 und M4 mit ebenfalls geringer Fließgrenze weisen jedoch trotz niedriger Fließgrenze ein geringes Absetzmaß auf. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-17 dargestellt.

Die Erklärung ist, wie oben erwähnt, dass das Absetzmaß nicht nur von einer rheologischen Größe bestimmt wird, sondern von einer Kombination mehrerer Faktoren bestimmt wird.

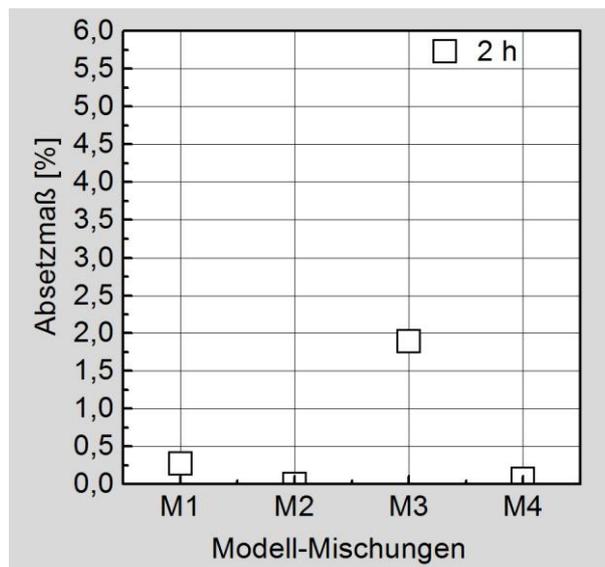


Abbildung 6-17: Absetzmaß der vier verschiedenen Modell-Mischungen (Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4) nach 2 h

6.1.9.3. Setzmaß

Das Setzmaß ist eine sehr häufig angewandte Methode um die Verarbeitbarkeit von Baustoffen zu Charakterisieren. Ein definiertes Volumen des Baustoffs wird dabei auf einer glatten Ebene, hier einer Glasplatte, aufgebracht und verteilt sich aufgrund seiner Gewichtskraft. Der Höhenunterschied zwischen der vollständig verlaufenen Suspension und der Glasplatte kann dabei in eine Kraft umgerechnet werden die proportional zur Fließgrenze ist. Abbildung 6-18 zeigt die Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Setzmaßes.



Abbildung 6-18: Bestimmung des Setzmaßes der Suspensionen mit Hilfe eines Hägermann-Trichers und einer Glasplatte

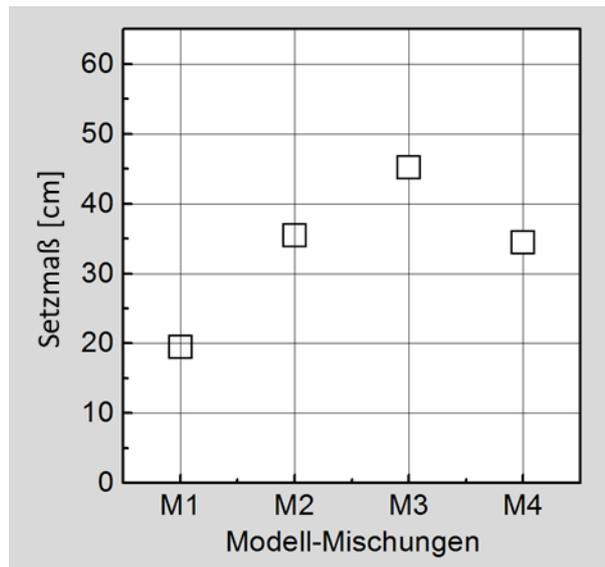


Abbildung 4-6-19: Setzmaße der Modell-Mischungen (Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4) sofort nach dem Mischen.

Der Vergleich der Setzmaße der Referenzverfüllbaustoffe (Abbildung 6-23) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Fließgrenzen der Suspensionen. Die Mischungen mit den geringsten Fließgrenzen zeigen die höchsten Setzmaße, wie es zu erwarten war. Das Setzmaß eignet sich daher gut als einfache Methode auf der Baustelle zur Abschätzung der Fließgrenze.

Da sich die rheologischen Eigenschaften der Suspensionen aufgrund der Zementhydratation mit der Zeit ändern wurden diese nach einigen Wartezeiten erneut überprüft. Während dieser Wartezeit wurden die Suspensionen abgedeckt und ruhend gelagert. Abbildung 6-20 zeigt den Einfluss einer Wartezeit von bis zu 8 h auf das Setzmaß der zwei Suspensionen M2 und M3. Das Setzmaß nimmt bei beiden Suspensionen deutlich von ca. 35 cm auf 20 cm bei Mischung M3 bzw. 12 cm bei Mischung M2 ab. Das Mischung M2 ein deutlich geringeres Setzmaß nach 8 h zeigt liegt sehr wahrscheinlich an dem zusätzlichen Beitrag durch die Thixotropie der zu dem Rücksteifen durch die Zementhydratation hinzu kommt.

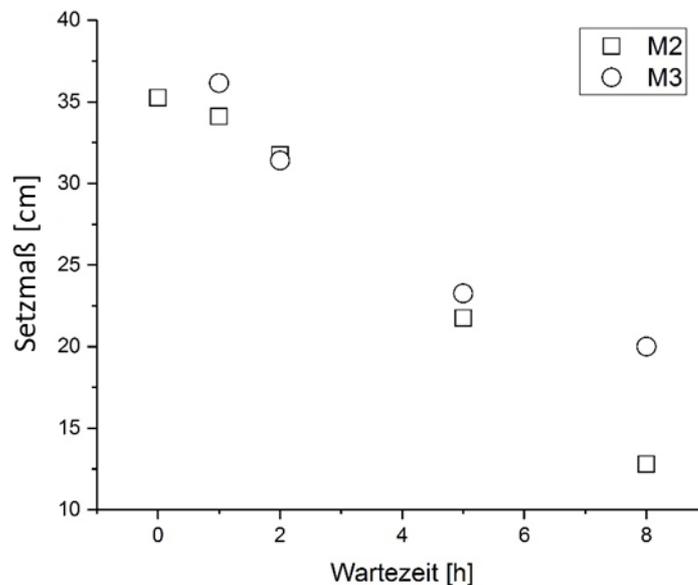


Abbildung 6-20: Einfluss einer Wartezeit von bis zu 8 h auf das Setzmaß der Referenzverfüllbaustoffe M2 und M3

6.1.9.4. Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter

Die Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter (kurz: Marsh-Zeit) ist ein Maß für die Viskosität einer Substanz. Ähnlich wie das Setzmaß ist es eine häufig angewandte Methode um die Verarbeitbarkeit von Baustoffen zu Charakterisieren. Bei der Auslaufzeit wird die Zeit gemessen die ein definiertes Volumen eines fließfähigen Baustoffs benötigt um aus dem Trichter zu fließen. Der Versuchsaufbau der Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter ist in Abbildung 6-21 dargestellt.

Die Marsh-Zeiten der vier Referenzverfüllbaustoffe (Abbildung 6-22) zeigen ein deutliches Minimum der Marsh-Zeit für Mischung M3, die eine geringe Mischungsresistenz aufweisen soll. Dies war zu erwarten, da Mischung M3 (niedrige Fließgrenze) keinen Stabilisierer enthält, der die Viskosität der Mischung erhöht um die Stabilität zu verbessern. Folgerichtig zeigt die Mischung M3 auch das höchste Absetzmaß (Abbildung 6-17).



Abbildung 6-21: Bestimmung der Auslaufzeit aus dem Marsh Trichter

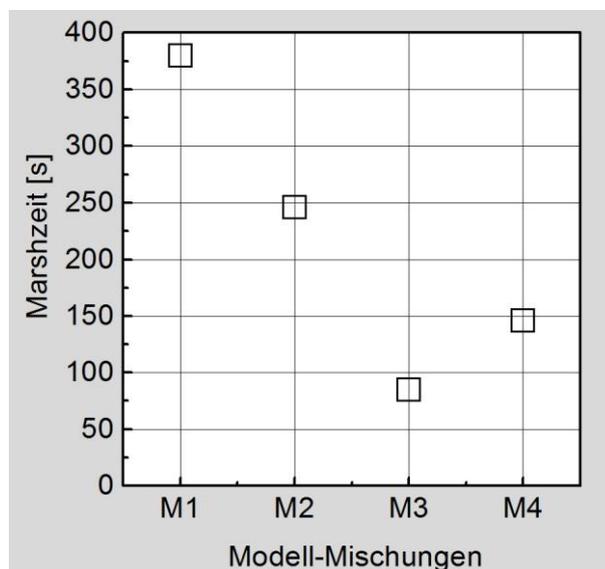


Abbildung 6-22: Marsh-Zeiten für die vier Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4

Ebenso wie das Setzmaß wird die Marsh-Zeit durch das Rücksteifen der Suspensionen während einer Wartezeit beeinflusst. Wie Abbildung 6-23 zeigt, nehmen die Marsh-Zeiten mit der Wartezeit zu, wobei bei Mischung M3 (niedrige Fließgrenze) nach 5 h keine Auslaufzeit mehr bestimmt

werden konnte und bei Mischung M2 (hohe Thixotropie) sogar bereits nach 2 h keine Auslaufzeit mehr bestimmt werden konnte.

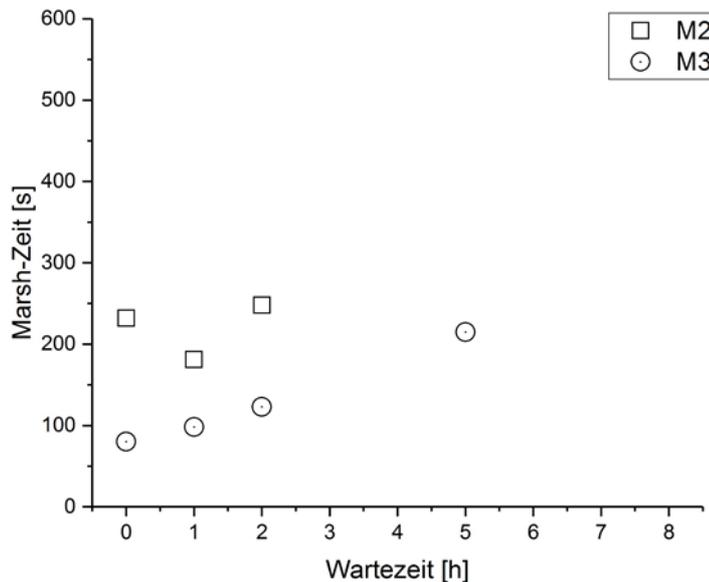


Abbildung 6-23: Einfluss einer Wartezeit auf die Marsh-Zeiten der zwei Referenzverfüllbaustoffe M2 und M3

6.1.9.5. Viskosität

Die am Rheometer ermittelte Viskosität wird aus dem Verhältnis der inkrementellen Schubspannung zur Scherrate ermittelt. Da die Schubspannung nicht linear mit der Scherrate zunimmt, ist der Wert der Viskosität abhängig von der Scherrate. Für pseudoplastische Substanzen (Kapitel 4.2.2) nimmt die Viskosität mit der Scherrate ab.

Die Viskosität im Rheometer wurde mit Hilfe eines Rotationsversuchs ermittelt. Um einen konstanten Messwert zu erhalten wurde die Probe zunächst stark geschert um Agglomerate zu zerstören. Die Viskosität wurde anschließend bei abnehmender Scherrate im Bereich mittlerer Scherraten ermittelt. Da Stabilisierer jedoch vorwiegend bei niedrigen Scherraten wirken um das Absetzen zu verringern ohne dabei die Verarbeitbarkeit zu beeinträchtigen, ist deren Effekt in der hier ermittelten Viskosität nicht deutlich erkennbar. So ermittelt weisen die Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4 eine ähnliche, niedrige Viskosität auf (Abbildung 6-24).

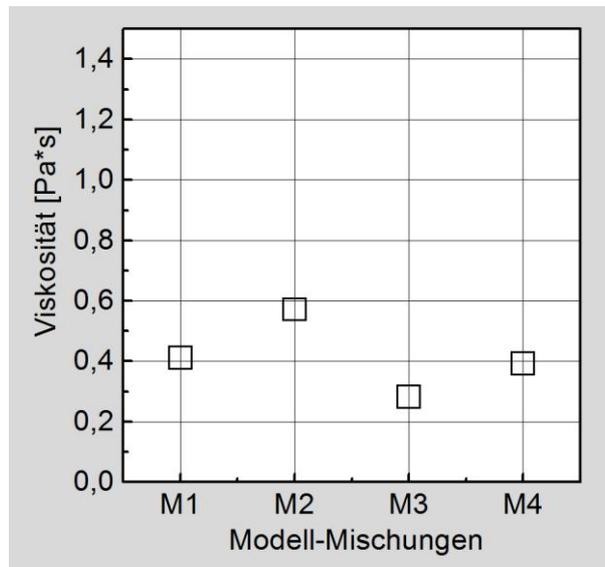


Abbildung 6-24: Im Rotationsversuch bei mittleren Scherraten ermittelte Viskositäten der vier Modell-Mischungen (Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4)

Im Unterschied zu den deutlich zunehmenden Auslaufzeiten aus dem Marsh-Trichter bleibt die Viskosität auch bei längerer Wartezeit für beide Suspensionen annähernd konstant (Abbildung 6-29). Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der Messmethode. Da die Viskosität nach dem Einbringen einer Scherkraft an dem absteigenden Ast der Fließkurve bestimmt wird, sind entstandene Vernetzungen zum Zeitpunkt der Bestimmung bereits zerstört und können nicht beobachtet werden.

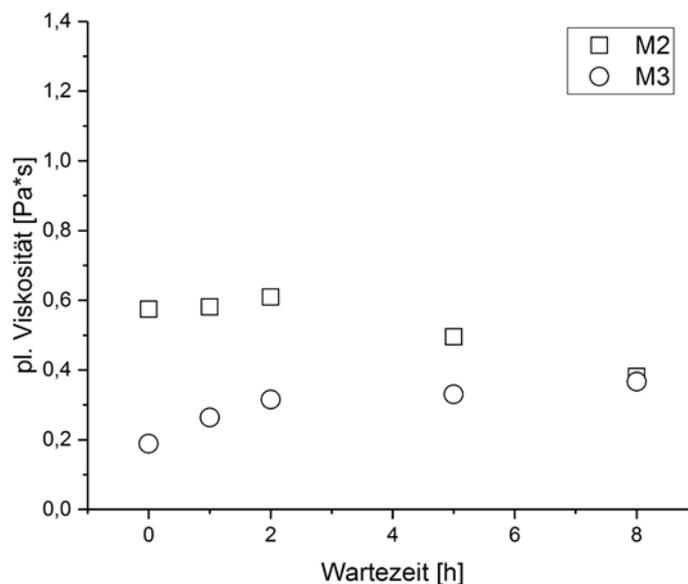


Abbildung 6-25: Einfluss der Wartezeit auf die Viskosität für die zwei Referenzverfüllbaustoffe M2 und M3

6.1.9.6. Thixotropie

Die Thixotropie ist ein Maß für den zeitabhängigen Strukturabbau und –aufbau der Mischungen. Eine Mischung mit einer hohen Thixotropie wird sofort nach dem Mischen sehr fließfähig und gut verarbeitbar sein. Nach einer gewissen Zeit wird sie eine Struktur aufbauen indem Partikel agglomerieren und so eine geringere Verarbeitbarkeit und hohe Entmischungsresistenz aufweisen. Es wurde daher erwartet, dass Mischungen mit einer hohen Thixotropie und einer geringen Fließgrenze eine gute Verarbeitbarkeit und eine hohe Entmischungsresistenz vereinen.

Um die Thixotropie der verschiedenen Suspensionen zu vergleichen wurden alle Suspensionen auf die gleiche Art für 30 s stark geschert und nach dem Ende der Scherung über einen Oszillationsversuch der Strukturaufbau nach 60 s bestimmt. Der Strukturaufbau wird dabei ausgedrückt als die relative Strukturstärke im Vergleich zum Zeitpunkt unmittelbar vor der Scherung. Abbildung 4-6-26 zeigt exemplarisch das Vorgehen zum Vergleich der thixotropen Eigenschaften der Suspensionen.

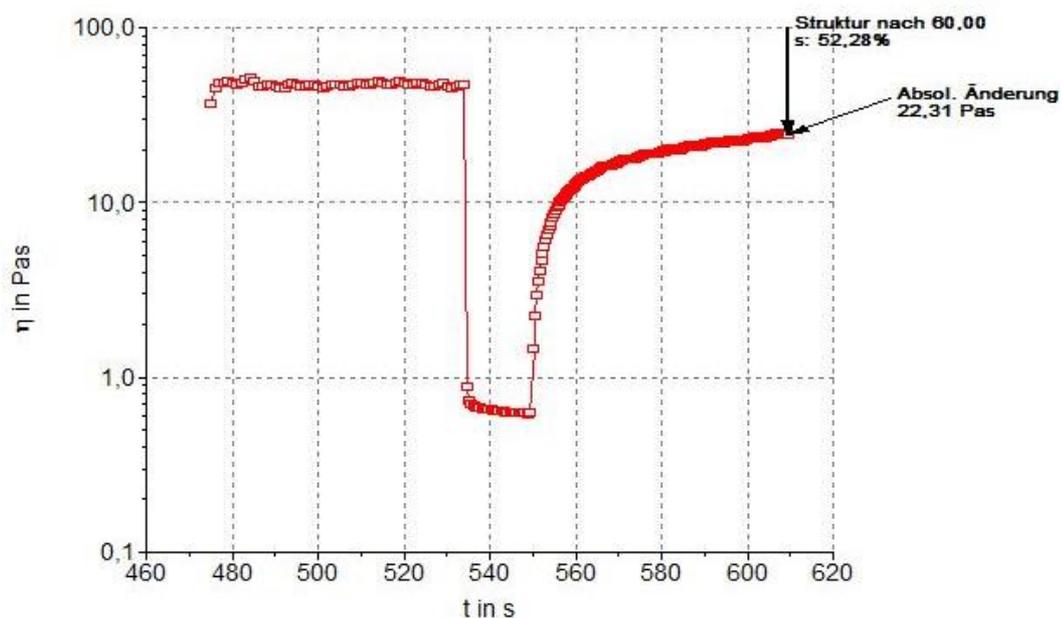


Abbildung 4-6-26: Vorgehen bei der Ermittlung einer relativen Größe zum Vergleich der thixotropen Eigenschaften der Suspensionen

Leider zeigte sich in den Versuchen, dass die Mischungen M1 bis M4 keine signifikanten Unterschiede in der Thixotropie aufwiesen (Abbildung 6-31). Insbesondere wies Mischung M2, die eine hohe Thixotropie besitzen sollte, die relativ betrachtet die niedrigste Thixotropie auf. Eine Erklärung hierfür kann sein, dass die gewählten Zusatzmittel die Thixotropie nicht stark genug beeinflussen.

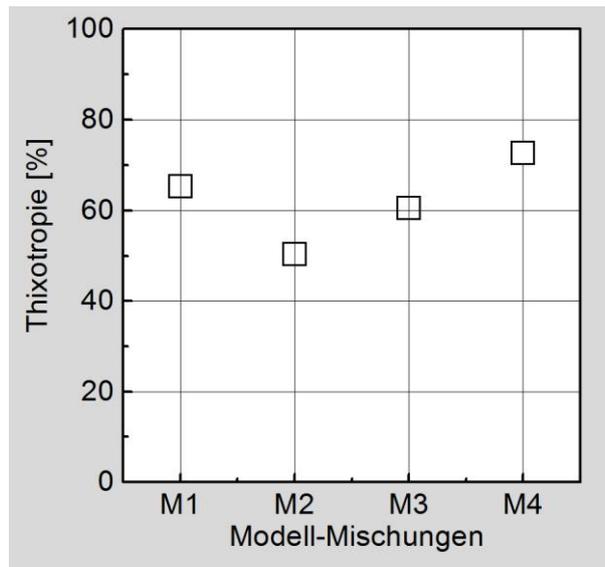


Abbildung 6-27: Vergleich der an den Modell-Mischungen (Referenzverfüllbaustoffe) ermittelten Thixotropie, als prozentualer Strukturaufbau nach 60 Sekunden

Auch bei der Messung der Thixotropie wird der Einfluss der Wartezeit auf die Thixotropie durch die Messmethode überdeckt. Da das Messprofil des Rheometers bei der Bestimmung der Thixotropie einen Abschnitt enthält, in dem Strukturen bewusst zerstört werden um nachher deren Wiederaufbau beobachten zu können, beginnt Aufbau der Strukturen bei jeder Messung neu. Der Einfluss der Wartezeit auf die Thixotropie erscheint daher „uneinheitlich“ (Abbildung 6-28), so dass keine Aussage getroffen werden kann.

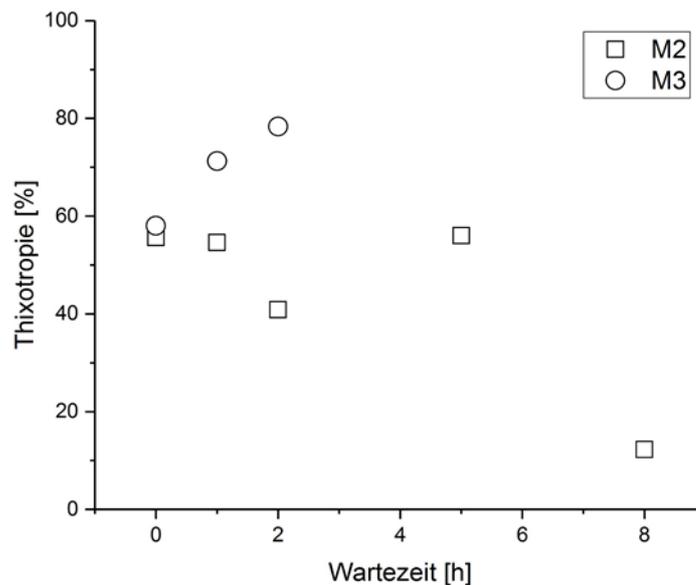


Abbildung 6-28: Der Einfluss der Wartezeit auf die Messung der Thixotropie

6.1.9.7. Dichte

Die Dichte ist eine wichtige Eigenschaft der Verfüllbaustoffe. Aufgrund der höheren Dichte der Verfüllbaustoffe in Vergleich zu Wasser ist es möglich Wasser auch in größeren Tiefen zu Verdrängen. Die Dichte der verschiedenen Mischungen wurden über das Gewicht in einem Gefäß mit einem kalibrierten Volumen von 1 L ermittelt (Abbildung 6-29).



Abbildung 6-29: Bestimmung der Dichte der Suspensionen

Die Rohdichten der vier Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4 waren im Rahmen der Messgenauigkeit vergleichbar (Abbildung 6-30). Dies war zu erwarten, da bei den Suspensionen lediglich die Zusatzmittel ausgetauscht wurden. Kleinere Unterschiede können sich dadurch ergeben, dass die Zusatzmittel unterschiedlich stark Luft einführen bzw. durch die unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften die beim Mischen eingebrachte Luft unterschiedlich schnell entweicht.

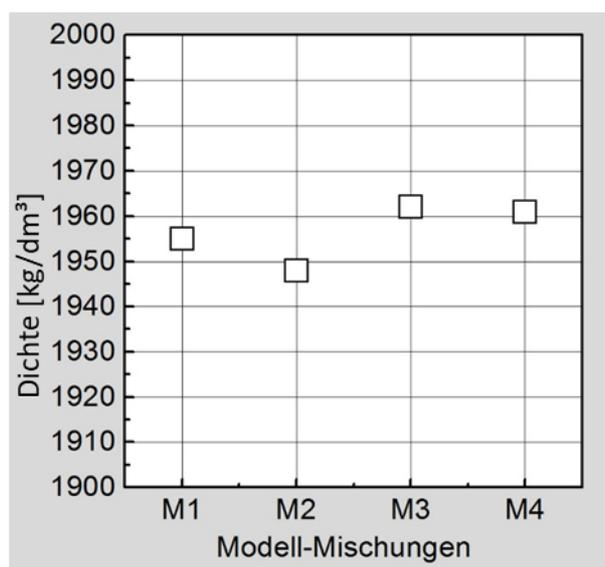


Abbildung 6-30: Rohdichten der verschiedenen Modell-Mischungen (Referenzverfüllbaustoffe M1 bis M4)

6.1.9.8. Einfluss des Mischverfahrens auf rheologische Parameter

In diesem Abschnitt erfolgt ein exemplarischer Vergleich der rheologischen Eigenschaften der vier Verfüllbaustoffe bei unterschiedlicher Herstellung. Hierzu wurde zunächst exemplarisch die Mischung M4 im Labormischer mit verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten hergestellt und die Eigenschaften verglichen. Hierzu wurde die Drehzahl des Labormischers, ausgehend von 1400 min^{-1} (der Standarddrehzahl aus den vorangegangenen Versuchen), von 650 min^{-1} bis zu 2000 min^{-1} variiert.

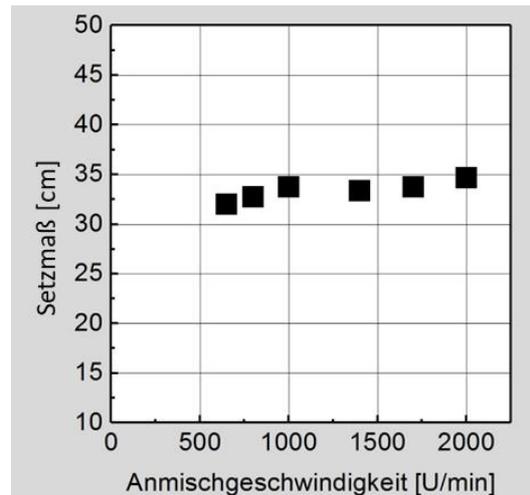


Abbildung 6-31: Setzmaße des mit verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten hergestellten Referenzverfüllbaustoffs M4

Wie Abbildung 6-31 zeigt ändert die Umdrehungsgeschwindigkeit während der Suspensionsherstellung das Setzmaß der Suspension M4 nur geringfügig, gleiches gilt für die Fließgrenze der Suspension M4, dargestellt in Abbildung 6-32.

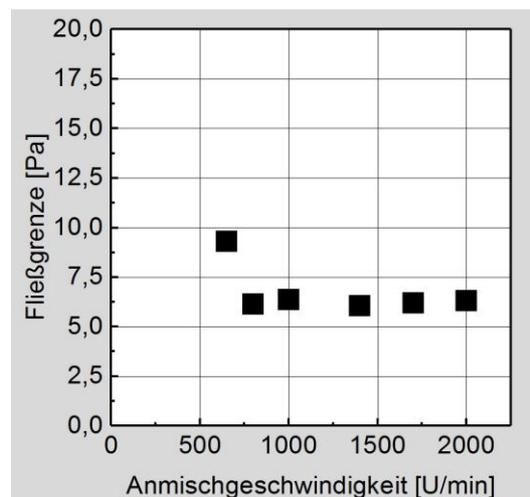


Abbildung 6-32: Fließgrenzen des mit verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten hergestellten Referenzverfüllbaustoffs M4

Vergleicht man die Marsh-Zeiten und Viskosität von Suspension, die identisch, jedoch mit verschiedenen Umdrehungszahlen hergestellt wurden verglichen, zeigt sich das die Marsh-Zeit bzw. die Viskosität der Suspension mit zunehmender Umdrehungsgeschwindigkeit abnimmt und sich scheinbar asymptotisch einem Minimalwert nähert. Dies ist in Abbildung 6-33 und Abbildung 6-34 dargestellt.

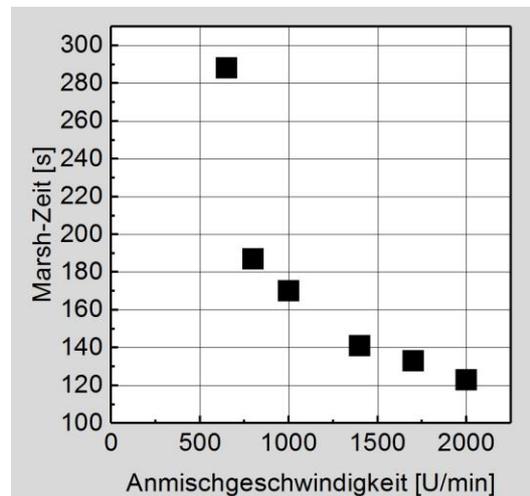


Abbildung 6-33: Marsh-Zeiten des mit verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten hergestellten Referenzverfüllbaustoffs M4

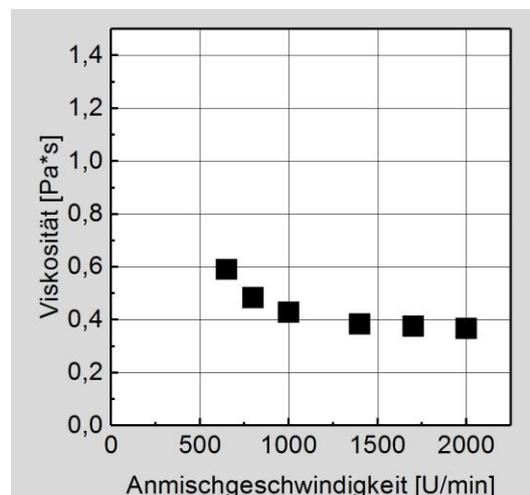


Abbildung 6-34: Viskositäten des mit verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten hergestellten Referenzverfüllbaustoffs M4

Da sich das Absetzmaß mit zunehmender Umdrehungszahl während der Herstellung nicht ändert (Abbildung 6-35), lautet die Empfehlung die Suspension mit bis zu 2000 min^{-1} zu mischen um eine optimale Verarbeitbarkeit zu erzielen.

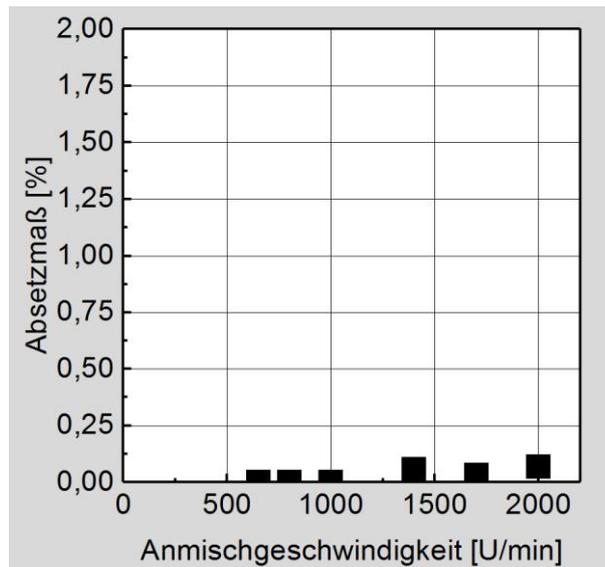


Abbildung 6-35: Absetzmaße nach 2 h des mit verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten hergestellten Referenzverfüllbaustoffs M4

6.1.9.9. Zusammenfassende rheologische Charakteristika der Referenzverfüllbaustoffe

Exemplarisch sind das Absetzmaß, die Fließgrenze (Rheometer) sowie die Thixotropie der Mischungen in Abbildung 6-36 dargestellt.

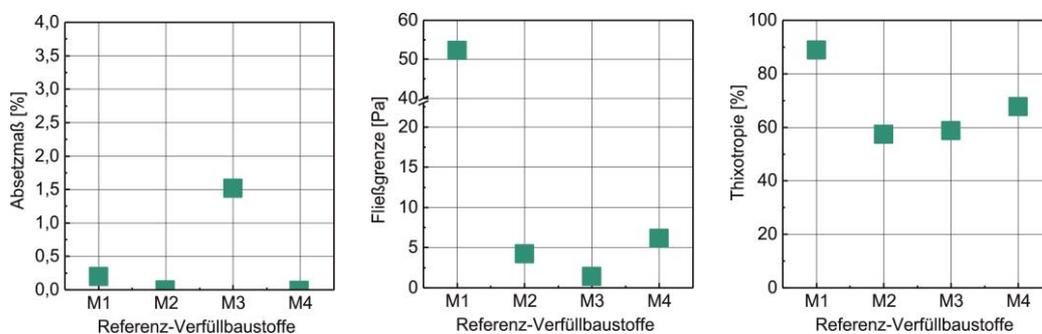


Abbildung 6-36: Absetzmaß, Fließgrenze (Rheometer) und Thixotropie der Referenz-Verfüllbaustoffe

Im Rahmen der Überprüfung zeigte sich, dass fast alle der angestrebten rheologischen Eigenschaften erreicht wurden (Tabelle 4-7). Zum vollständigen Einstellen aller Eigenschaften hätte es einen deutlich umfangreicheren Einsatz spezialisierter Zusatzmittel bedurft, um beispielweise die Thixotropie zu erhöhen. Auch wäre es zur Erhöhung der Thixotropie notwendig gewesen den Wassergehalt der Mischung M2 deutlich zu reduzieren, was wiederum andere Eigenschaften wie z. B. die Dichte beeinflusst hätte. Hierauf wurde bewusst zugunsten eines gut reproduzierbaren Systems und zwingend einzuhaltender Parameter verzichtet.

Tabelle 4-9: Vergleich der Zielsetzungen mit den erreichten rheologischen Eigenschaften

Mischung	Rheologie	Bewertung
Mischung 1	Hohe Fließgrenze	Erreicht. Mischung 1 weist eine deutlich höhere Fließgrenze auf
Mischung 2	Hohe Thixotropie	Die Mischungen zeigen keine signifikanten Unterschiede in der Thixotropie.
Mischung 3	Niedrige Fließgrenze Niedrige Entmischungsresistenz	Erreicht. Mischung 3 zeigt die niedrigste Fließgrenze und das höchste Absetzmaß.
Mischung 4	Niedrige Fließgrenze Hohe Entmischungsresistenz Geringe Thixotropie	Erreicht. Mischung 4 zeigt eine niedrige Fließgrenze und ein geringes Absetzmaß

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch den angepassten Einsatz der ausgewählten Zusatzmittel nahezu alle rheologischen Eigenschaften wie geplant eingestellt werden konnten.

6.1.10. Charakterisierung der ausgehärteten Referenzverfüllbaustoffe

Entsprechend des im Forschungsvorhaben EWS-tech erarbeiteten Untersuchungsprogramms erfolgte die exemplarische Ermittlung relevanter Eigenschaften der ausgehärteten Referenzverfüllbaustoffe. Als exemplarische Eigenschaften wurden die Druck- und Biegezugfestigkeit der jungen erhärteten Verfüllbaustoffe ausgewählt.

Wie in Abbildung 6-37 und Abbildung 6-38 dargestellt ergeben sich nach 2 und nach 7 Tagen keine signifikanten Unterschiede in der Druck- und Biegezugfestigkeit zwischen den vier Modell-Verfüllbaustoffen.

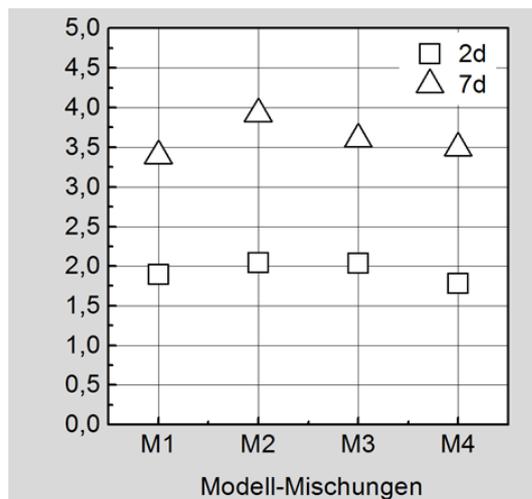


Abbildung 6-37: Druckfestigkeit in N/mm² der entwickelten Verfüllbaustoffe ermittelt an Prismen nach DIN EN 1015-10

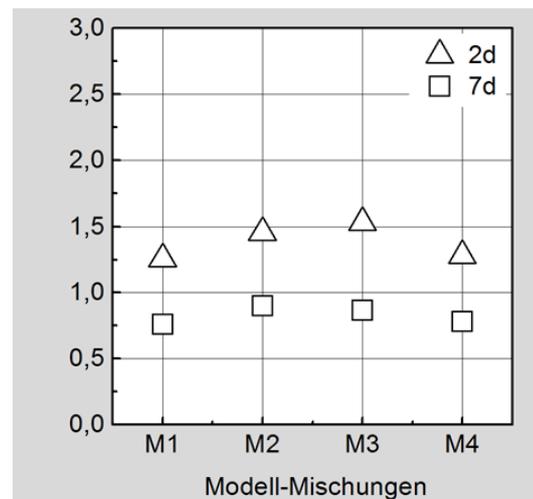


Abbildung 6-38: Biegezugfestigkeit in N/mm² der entwickelten Verfüllbaustoffe ermittelt an Prismen nach DIN EN 1015-10

6.1.10.1. Rezepturen der entwickelten Referenzverfüllbaustoffe

Die im Rahmen des vorliegenden Projekts entwickelten Rezepturen für die Referenzverfüllbaustoffe M1, M2, M3 und M4 sind in Tabelle 4-10 zusammengestellt. Die rheologischen Eigenschaften der Suspensionen wurden allein über die eingesetzten Zusatzmittel eingestellt. Dabei zeigte sich, dass es über die ausgewählten Zusatzmittel allein nicht möglich ist, die Thixotropie ausreichend stark zu beeinflussen. Dennoch war es möglich Mischungen mit fließfähiger und steifer Konsistenz herzustellen, die ein gutes und schlechtes Absetzverhalten zeigten. Es konnte keine direkte Korrelation zwischen der Viskosität oder der Thixotropie und dem Absetzmaß gezeigt werden. Es zeigte sich jedoch, dass das Absetzmaß bei Marsh-Zeiten unter 100 s deutlich zunimmt. Auf die Druck- und Biegezugfestigkeiten der Verfüllbaustoffe hatten die Zusatzmittel keinen signifikanten Einfluss. Weiter konnte gezeigt werden, dass sich die Verarbeitungseigenschaften bei einer höheren Mischgeschwindigkeit bei der Suspensionsherstellung verbessern ohne dass sich gleichzeitig das Absetzmaß verschlechtert.

Tabelle 4-10: Rezepturen der entwickelten Referenzverfüllbaustoffe (je 1 Liter Suspension)

	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
Angestrebte rheologische Eigenschaften	Hohe Fließgrenze	Hohe Thixotropie	Niedrige Fließgrenze Hohe Entmischung	Niedrige Fließgrenze Geringe Entmischung Geringe Thixotropie
Zement 1 Class G HSR [g]	215	215	215	215
Quarzfüller 1 [g]	1100	1100	1100	1100
Quarzfüller 2 [g]	178	178	178	178
Magnetit Mg8 [g]	58	58	58	58
Wasser [g]	439	439	439	439
BASF Melflux 4930 F [g]	0	0,64	0,59	0,43
BASF Starvis 3050 F [g]	0,21	2,14	0	0,75

6.2. Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung

Von den im Detail untersuchten Referenzbaustoffen M3 und M4 wurde zur Materialcharakterisierung die Wärmeleitfähigkeit über die Zeit gemessen. Hierzu wurden beide Verfüllbaustoffe nach der in Kapitel 0 beschriebenen Methode bei 650 U/min sowie bei 2000 U/min angemischt und die Wärmeleitfähigkeit nach 7, 14, 21 und 28 Tagen gemessen (Rieger et al. 2017). In Abbildung 6-39 sind die Ergebnisse dargestellt. Bei der Messung nach 14 Tagen scheint ein systematischer Fehler bei der Messung aufgetreten zu sein, da im Vergleich zu den übrigen Messtagen die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten aller Proben unter 2,5 W/mK lagen und damit um ca. 0,3 W/mK niedriger waren als an den übrigen Messtagen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass die Proben, die mit einer Geschwindigkeit von 2000 U/min angemischt wurden, eine um 0,1 W/mK höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als die bei 650 U/min angemischten Probenkörper. Dies liegt darin begründet, dass durch die höhere Mischgeschwindigkeit der Verfüllbaustoff besser aufgeschlossen ist wodurch der Hydratationsprozess begünstigt wird und der ausgehärtete Baustoff eine geringere Porosität aufweist. Diese Beobachtung wurde auch in den Umströmungsversuchen gemacht und wird im Kapitel 6.8.3 ausführlich diskutiert. Der Referenzbaustoff M3 weist eine um 0,1 W/mK höhere Wärmeleitfähigkeit als M4 auf, obwohl die Zusammensetzung weitgehend gleich ist (Kapitel 0). M3 wurde bei seiner Entwicklung mit einer niedrigen Fließgrenze und einem hohen Entmischungsverhalten eingestellt. Diese Eigenschaften sorgten bei der Probenherstellung zur Sedimentation und damit zu einer Feststoffanreicherung auf der Unterseite des Probenkörpers. Da die Messung der Wärmeleitfähigkeit verfahrensbedingt auf der Probenunterseite erfolgt, ist der Wert der Wärmeleitfähigkeit trotz ungünstiger Verfüllbaustoffeigenschaften etwas höher.

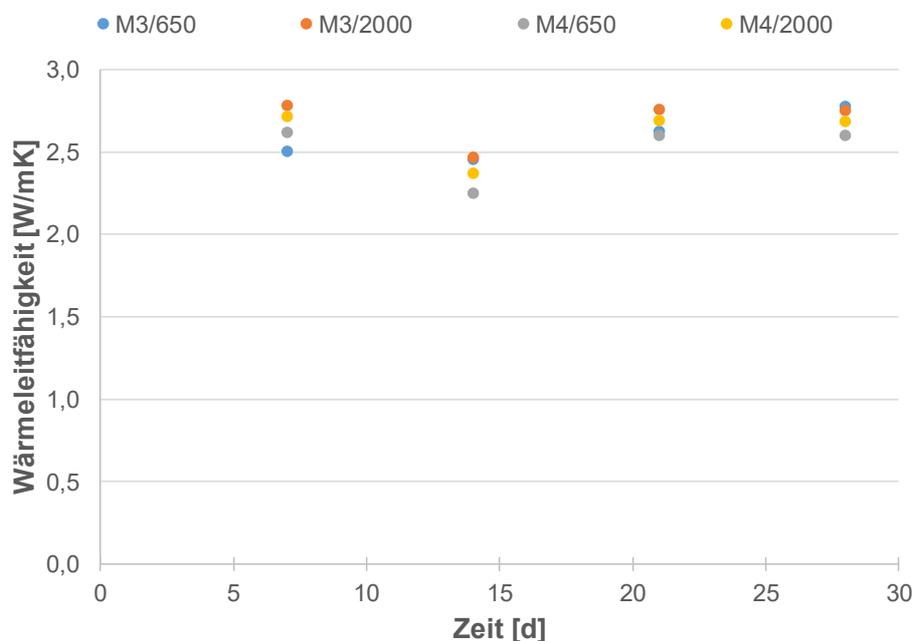


Abbildung 6-39: Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung der Referenzbaustoffe M3 und M4

6.3. Ergebnisse der Wärmeentwicklung von Verfüllbaustoffen

Verfüllbaustoffe zeigen in Abhängigkeit des verwendeten Zements sowie der Zementmenge eine charakteristische Wärmeentwicklung. Diese Temperaturentwicklung kann messtechnisch erfasst werden. Da aber die Umgebungsbedingungen sowie die dadurch bedingten Wärmetransportprozesse einen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturmesswerte haben, sollen hier unterschiedliche Szenarien von Versuchsaufbauten diskutiert werden.

Die grünen Graphen in Abbildung 6-40 und Abbildung 6-41 zeigen den Massenbezogenen Wärmefluss, der in einem adiabatische Kalorimeter unter Laborbedingungen gemessen wurde (hier ist nur die A-Probe dargestellt, die B-Probe ist deckungsgleich). Es zeigt sich eine für den jeweiligen Verfüllbaustoff charakteristische Temperaturentwicklung, die bei den Verfüllbaustoffen 07d und 13+d auch 5 Tage nach Versuchsbeginn noch einen Wärmefluss bedingt (Abbildung 6-40). Während beim Baustoff 07d ab ca. 0,5 Tagen ein leichter, kontinuierlicher Anstieg des Wärmeflusses zu erkennen ist, zeigt der Baustoff 13+d bei ca. 0,5 Tagen einen Peak und in weiteren Verlauf ab ca. einem Tag ein Anstieg bis zum Tag 4. Im Gegensatz hierzu zeigen die Referenzbaustoffe am Tag 1 einen deutlichen Peak, gefolgt von einer kontinuierlichen Abnahme des Wärmeflusses bis zu Tag 5 an dem keinen nennenswerten Wärmefluss mehr gemessen wurde (Abbildung 6-41).

Ganz anders verhält sich die Temperaturentwicklung unter den in Kapitel 0 beschriebenen Laborversuchen. In diesen Versuchen ist deutlich zu erkennen, dass die Umgebungsbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung in den Verfüllprobenkörpern haben. In den Laborversuchen war das Verfüllvolumen auf ca. 1,2 l begrenzt und die Querschnittsfläche betrug 75-85 % einer EWS. Das obere und untere Ende der Versuchsanordnung war isoliert, so dass der eigentliche Wärmetransport über die Zylinderfläche stattfand. Im Gegensatz zu einer realen EWS bei der der Wärmetransport konduktiv über das anstehende Gestein und/oder konvektiv über das Grundwasser von statten geht, erfolgte er in diesen Versuchen über die umgebende Luft. Hierbei kann von einem konvektiven Wärmetransport ausgegangen werden (angetrieben durch Temperaturdifferenzen die in Dichteunterschiede resultieren), der jedoch in diesem Versuchsaufbau nicht quantifizierbar ist.

In Abbildung 6-40 und Abbildung 6-41 ist die auf die Anfangstemperatur normierte Temperaturentwicklung inklusive der dazugehörigen Umgebungstemperatur (Raumtemperatur RT bzw. Kühlschrantemperatur KT) dargestellt. Bei allen Versuchen, die bei ca. 9 °C durchgeführt wurden, zeigt sich, dass nach ca. 6 Stunden weitgehend keine Temperaturveränderung innerhalb des Probenkörpers mehr stattfindet und die Umgebungstemperatur nahezu erreicht ist. Beim Verfüllbaustoff 13+d (Abbildung 6-40, rechts) zeigt die dunkelblaue Kurve mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 0,3 Tagen und einer sehr deutlichen Dämpfung für den ersten Tag einen ähnlichen Verlauf wie der im Kalorimeter gemessene Wärmefluss. Somit zeigen diese Versuche, dass bei nicht isolierten Laborversuchen unter realen Untergrundtemperaturen nur sehr kurzzeitig der Einfluss der Hydrationswärme zu beobachten ist.

Die orangen Kurven der Versuche 13+d (Abbildung 6-40, rechts) und M3 (Abbildung 6-41, links), die bei Raumtemperatur durchgeführt wurden, zeigen einen ähnlichen, wenn auch gedämpfteren Verlauf wie die Referenzkurven aus dem Kalorimeter. Dieser Trend ist beim Versuch M4 (Abbildung 6-41, rechts) nicht zu erkennen, da sich hier eine Überlagerung der Raumtemperatur auswirkt. Hier nimmt zur Zeit des Peaks am 1. Tag die Raumtemperatur (rote Kurve) ab und somit

auch die Temperatur im Verfüllkörper. Dadurch wird der Peak sehr stark abgeflacht und ist nur noch andeutungsweise zu erkennen. Die Versuche bei Raumtemperatur zeigen, dass größere Temperaturveränderungen gedämpft messbar sind, aber gleichzeitig sich Veränderungen der Umgebungsbedingungen deutlich auf Temperaturmesswerte auswirken. Diese äußeren Temperaturveränderungen zeigen einen zeitlichen Versatz, der von den Rahmenbedingungen des Versuchs (verwendete Materialien, Isolierung, Positionierung der Sonde, usw.) abhängig ist.

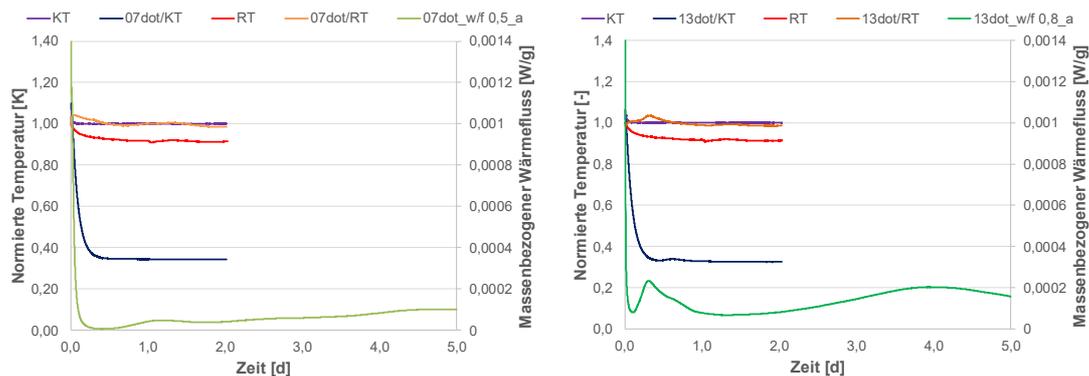


Abbildung 6-40: Hydratationswärme des Verfüllbaustoffs 07d (links) und 13+d (rechts) bei Raumtemperatur (RT) sowie bei ca. 9°C (KT) und aus dem adiabatischen Kalorimeter (grüne Kurve)

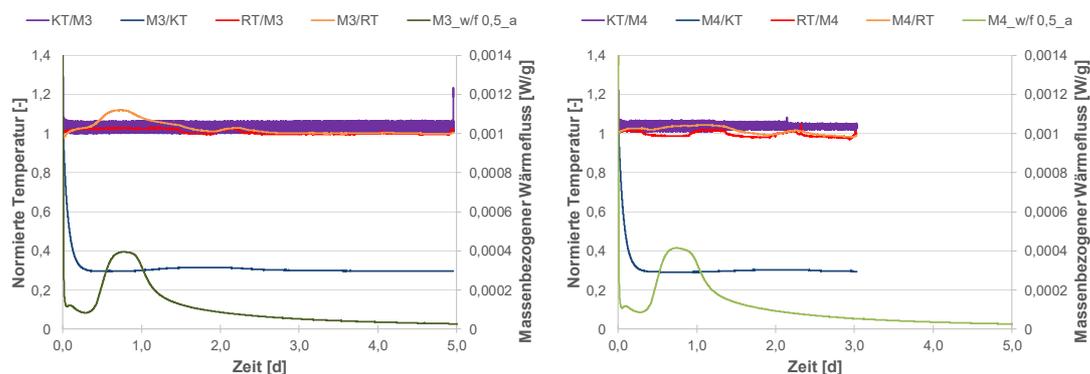


Abbildung 6-41: Hydratationswärme des Verfüllbaustoffs M3 (links) und M4 (rechts) bei Raumtemperatur (RT) sowie bei ca. 9°C (KT) und aus dem adiabatischen Kalorimeter (grüne Kurve)

Um den Realfall einer EWS zu untersuchen, wurde in einen Schenkel einer Erdwärmesonde ein Glasfaserkabel installiert und die Temperaturentwicklung während des Verfüllvorgangs (Verfüllbaustoff 07) und der ersten Stunden des Hydratationsprozesses gemessen. Aufgrund des geringen Durchmessers des EWS-Rohrs, konnte nur eine Single End-Messung mit offenem Ende (ohne Pigtail, aber Wasserdicht verschweißt) durchgeführt werden. Um den relativ schnellen Verfüllvorgang erfassen zu können, wurde eine kurze Messzeit von 0,5 Minuten festgelegt.

Die dunkelblaue Kurve in Abbildung 6-42 (links) zeigt die Außentemperatur, die in der Nacht Werte um den Gefrierpunkt annimmt. Im Sondenrohr nimmt hingegen mit zunehmender Tiefe die Temperatur aufgrund der Hydratationswärme um bis zu 2 K zu. Aufgrund der kurzen Messzeiten schwanken allerdings die einzelnen Messwerte relativ stark und die Standardabweichung beträgt

0,2. Ferner zeigt sich, dass die Messwerte am offenen Ende bei einer Teufe von 30 m deutlich von den übrigen abweichen. Dies bedeutet letztendlich, dass bei Single End-Messungen mit offenem Ende messtechnisch bedingt die letzten Temperaturmesswerte nicht realistisch sind. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Temperaturen ab einer Tiefe von 15 m auch nach 24 Stunden noch weiterhin steigen. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Kalorimetermessung des Verfüllbaustoffs 07d (Abbildung 6-40, links) überein und bedeutet gleichzeitig, dass sich im Untergrund Temperaturstörungen über einen längeren Zeitraum bemerkbar machen. In diesem Versuch konnten die Temperaturmessungen aufgrund weiterer, nachgeschalteter Untersuchungen nicht weiter fortgesetzt werden. Für diesen Fall bedeutet dies jedoch, dass eine durch den Verfüllvorgang bedingte Störung der Bodentemperatur sich sehr wahrscheinlich länger als 3 Tage bemerkbar macht. Dies muss besonders bei der Durchführung von TRT's berücksichtigt werden, da dadurch eine zu hohe ungestörte Untergrundtemperatur gemessen würde, die zu einer Unterdimensionierung der EWS-Anlage führen würde.

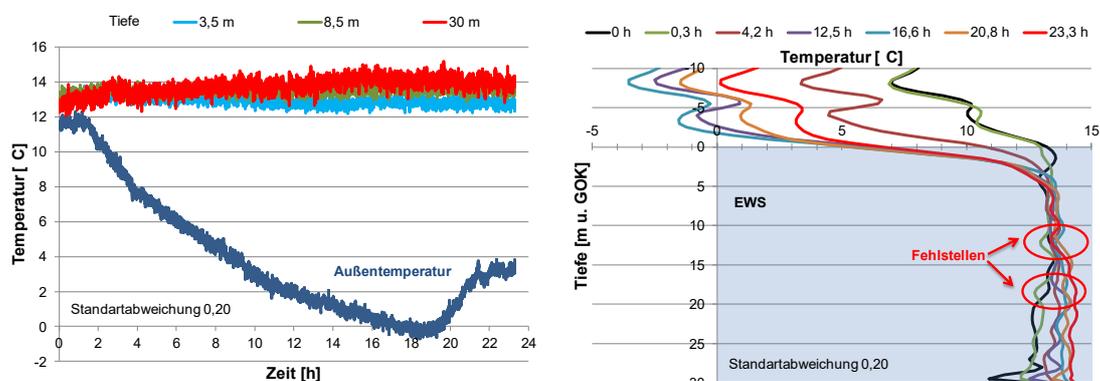


Abbildung 6-42: Temperaturentwicklung des Baustoffs 07 in einem EWS-Schenkel gemessen auf dem Testfeld des KIT

6.4. Einfluss des Grundwassers auf die Verfüllqualität (AP. B)

Zur Beurteilung des Einflusses des Grundwassers auf die Verfüllung, sowie des Einflusses der Verfüllung auf das umgebende Gestein, wurden Aquariumsversuche sowie Penetrationsversuche durchgeführt, die im Folgenden diskutiert werden.

6.4.1. Ergebnisse der kleinen Aquariumsversuche

In den kleinen Aquariumsversuchen wurde ein natürlicher Sand bzw. sandiger Kies aus der Bohrung des Testfeldes am KIT (Sand aus 0,8 m Tiefe bzw. Kies aus 24 m Tiefe) verwendet. Hierbei handelt es sich um pleistozäne Sedimente (Niederterrasse). Diese Art von Sedimente können häufig in urbanen Landschaften mit oberflächennaher geothermischer Nutzung vorkommen. Um die Penetration der Suspension nach den in Kapitel 4.1 beschriebenen Ansätzen beurteilen zu können, wurden die Sedimente nach den Versuchen gesiebt. Die Korngrößenverteilung ist in Abbildung 6-43 dargestellt und der d_{15} -Wert exemplarisch markiert. Die Versuchsbedingungen

und Materialeigenschaften sind in Tabelle 6-11 aufgelistet. Darüber hinaus wurde die Korngrößenverteilung der verwendeten Suspensionen bestimmt. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 6-44 dargestellt. Der Hauptkorngröße liegt bei den Baustoffen 07d und 13+d im Schluffbereich, geht aber bis in den Feinsand, beim Baustoff 07 sogar bis in den Mittelsandbereich. Die für die Berechnung der Eindringtiefe notwendigen rheologischen Parameter sind in Tabelle 6-12 aufgeführt.

Insgesamt wurde ein Vorversuch sowie vier weitere Versuche (V1-V4) durchgeführt. Bei der visuellen Bewertung der Versuche mussten dabei zwei ablaufende Prozesse unterschieden und separat bewertet werden:

- findet eine Penetration der Suspension in das Sediment statt
- hat das fließende Grundwasser einen Einfluss auf die Verfüllqualität

Bei allen durchgeführten Versuchen wurde ein hydraulischer Gradient von 3 ‰ angelegt. Die Versuche wurden nach Aushärtung der Suspension vorsichtig ausgebaut und visuell hinsichtlich der Verfüllqualität sowie der Penetration begutachtet. Im Vorversuch sowie in den Versuchen V1-V3 konnte keine Penetration der Suspension in die Sedimente (natürlicher Sand) beobachtet werden. Es wurde auch keine Schlieren der Suspension im Sand gefunden. Lediglich im unmittelbaren Kontaktbereich Suspension/Sediment wurden die umgebenden Sandpartikel zementiert (Abbildung 6-45 bis Abbildung 6-48). Wird das Terzaghi-Filterkriterium herangezogen (Kapitel 4.1), liegen die berechneten Werte $N1 - N3 \leq 1,7$ (Tabelle 6-11) für diese Versuche unterhalb der Grenzwerte für eine mögliche Penetration (Tabelle 4-1). Für die nach DIN 4126 (2013) berechneten Eindringtiefen wurden für diese Versuche Werte zwischen 2 und 73 mm ermittelt (Tabelle 6-11). Die Schwankungsbreiten bei den Baustoffen 07d und 13+d gehen auf chargenspezifische Abweichungen in der Fließgrenze zurück. Diese Schwankungen waren besonders beim Baustoff 13+d ausgeprägt. Hier kam das verwendete Rührwerk (IKA RE-166) beim Anmischen der Suspension bei einigen Chargen bedingt durch die hohe Viskosität an seine Leistungsgrenze. Die Abweichungen zwischen den nach DIN 4126 (2013) berechneten und den experimentell bestimmten Werten gehen wahrscheinlich darauf zurück, dass in die Gleichung (4-7) als Suspensionsparameter lediglich die Fließgrenze eingeht und keine Partikeleigenschaften der Suspension berücksichtigt werden. So wäre beispielsweise bei zwei Suspensionen mit der gleichen Fließgrenze aber unterschiedlichen Korngrößenverteilung nach DIN 4126 die Eindringtiefe in ein Sediment mit einheitlicher Porengröße gleich weit. Hierbei wird aber nicht berücksichtigt, dass größere Partikel in Abhängigkeit der Porenverteilung der Sedimente eher den Porenraum verstopfen und damit die Penetration behindern. Aus diesem Grund müsste zur Berechnung der Eindringtiefe sowohl die Eigenschaften des Sediments, als auch die der Suspension berücksichtigt werden. Hierzu wären weitere Untersuchungen mit einer eingehenden Materialcharakterisierung der Verfüllbaustoffe als auch der Untergrundbedingungen notwendig.

Bei der Betrachtung der erhärteten Verfüllkörper zeigt sich in den Versuchen V1 – V3 keine grundwasserbedingte Beeinträchtigung. Im oberen Teil des Verfüllkörpers ist eine Aufweitung in Trichterform zu erkennen, die durch das Ziehen des Metallblechs (entspricht der Verrohrung im Realfall) zustande kam. Durch das Ziehen des Blechs wurde der umgebende Sand, besonders im oberen Bereich, in geringen Umfang gestört bzw. gelockert. Darüber hinaus entstand ein zusätzliches Hohlraumvolumen von ca. 225 ml (Volumen des Blechs), das zum Teil durch die Sus-

pension als auch durch den Sand, der in den Hohlraum fiel, eingenommen wurde und die Trichterform erklärt. In diesem Bereich weist die erhärtete Verfüllung auch eine geringere Festigkeit auf. Dies liegt zum einen daran, dass je nach Verfüllbaustoff im geringen Umfang Sedimentationsprozesse stattfinden und dadurch eine Reduzierung der Festphase in den Oberen 0 – 6 mm erfolgte. In diesem Bereich kam es auch aufgrund des Grundwasserflusses zur Durchmischung Grundwasser/Suspension und damit zu einer Erhöhung des W/F-Werts. In den Versuchen V1-V3 sowie dem Vorversuch konnte kein Effekt des Grundwassers auf den Verfüllkörper festgestellt werden. Dies zeigt sich besonders bei der Betrachtung der Seitenansicht in Grundwasserzuflussrichtung (Abbildung 6-45 bis Abbildung 6-48). Die Verfüllkörper zeigen hier deutlich die Form des Blechs und weisen keine Fehlstellen, Löcher und Auswaschungen auf.

Im Versuch 4, in dem der sandige Kies verwendet wurde, fand in mehreren Bereichen eine deutliche Penetration der Suspension statt (Abbildung 6-49). Im unteren Drittel drang die Suspension ca. 170 mm bis zum Geotextil ein, das die Grenze zum Wasserreservoir bildete. Diese Beobachtung stimmt sehr gut mit den Grenzwerten des Terzaghi-Filterkriterium überein. Die berechneten Werte für N1, N2 und N3 (Tabelle 6-11) liegen zwischen 6,9 und 64,2. Unter Berücksichtigung der Werte in Tabelle 4-1 wäre lediglich für das Modell von Bell (1982) beim Verfüllbaustoff 07d keine Penetration gegeben. Bei den übrigen Modellansätzen werden für den sandigen Kies die Grenzwerte für eine mögliche Penetration für die Verfüllbaustoffe 07d und 13+d überschritten. In diesem Versuch liegt die experimentell bestimmte Eindringtiefe im Bereich der berechneten Werte von 43 – 333 mm. Die bessere Übereinstimmung in diesem Fall liegt wahrscheinlich darin begründet, dass im verwendeten sandigen Kies die Porenöffnungsweiten so groß sind, dass die Partikelgrößenverteilung der Suspension für den Penetrationsprozess weniger stark ausgeprägt ist. Dies zeigt, dass die Penetration entscheidend von der Porenöffnungsverteilung des Sediments, als auch von der Partikelgrößenverteilung der Suspension abhängig ist. Aufgrund der Resultate der Aquariumsversuche wurde ein neuer Untersuchungsansatz in Form der Penetrationsversuche durchgeführt.

Wie in den eingangs beschriebenen Versuchen, konnte auch im Versuch 4 kein eindeutiger Einfluss des Grundwassers auf den Verfüllkörper festgestellt werden. Es wurden beim Ausbau im sandigen Kies keine Schlieren aus Verfüllbaustoff vorgefunden. Eine exakte Beurteilung ist jedoch in diesem Versuch schwer, da der Verfüllkörper anders als bei den übrigen Versuchen keine klar definierte Form aufweist und bereits beim Verfüllvorgang die Suspension in das Sediment penetrierte. Der ausgehärtete Verfüllkörper zeigt jedoch keine Fehlstellen und Löcher.

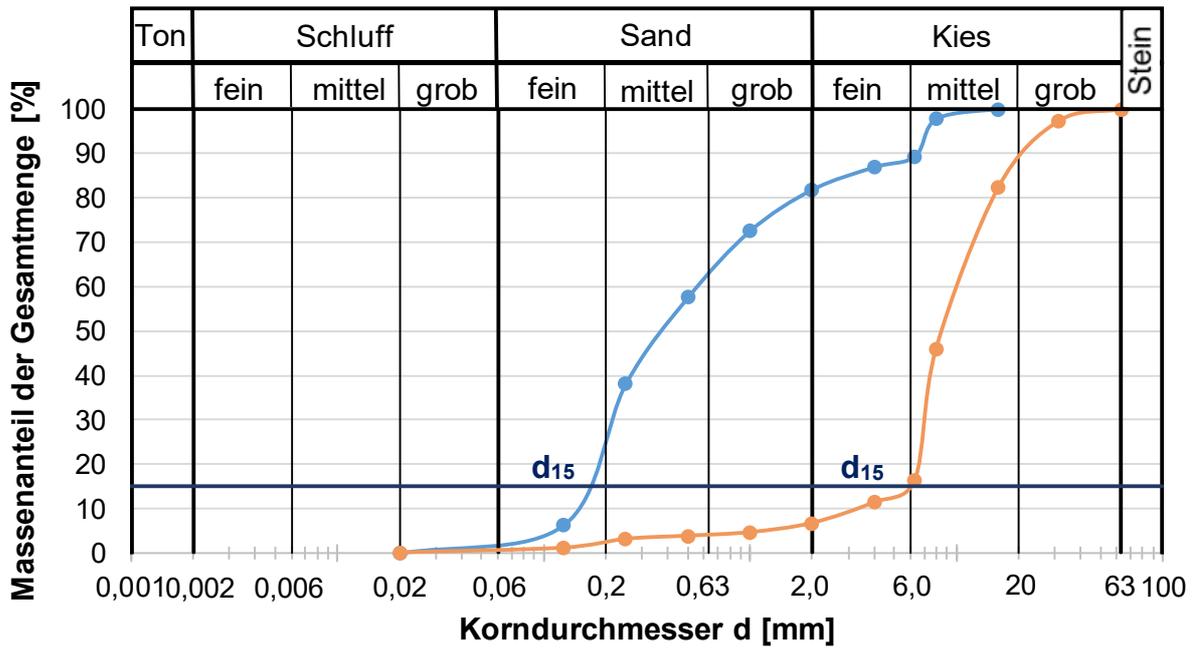


Abbildung 6-43: Korngrößenverteilung der verwendeten Sedimente (Sand, Kies)

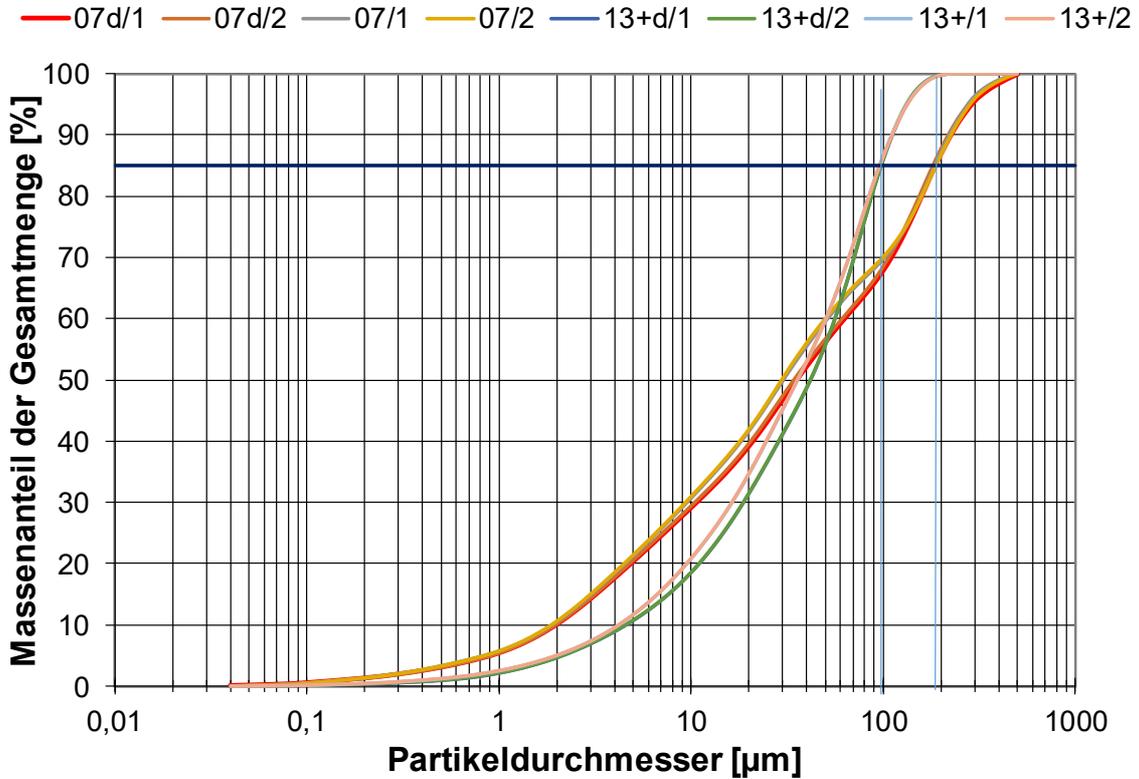


Abbildung 6-44: Korngrößenverteilung der verwendeten Baustoffe

Tabelle 6-11: Versuchsbedingungen, Materialeigenschaften und Ergebnisse der kleinen Aquariumsversuche

Parameter	V1	V2	V3	V4
Verfüllbaustoff	07+/2000	02+/2000	13+d/2000	13+d/2000
Geologie	Nat. Sand	Nat. Sand	Nat. Sand	Nat. Sand/Kies
k_{f20} -Werte [m/s]	9,6E-5	1,1E-4	4,5E-5	1,6E-4
Hydr. Gradient	3 ‰	3 ‰	3 ‰	3 ‰
d_{10} [mm]	0,13	0,13	0,13	3,16
d_{15} [mm]	0,16	0,16	0,16	6,10
N_1 für 07d	1,0	1,0	1,0	37,0
N_2 für 07d	0,5	0,5	0,5	11,7
N_3 für 07d	0,3	0,3	0,3	6,9
N_1 für 13+d	1,7	1,7	1,7	64,2
N_2 für 13+d	1,0	1,0	1,0	25,3
N_3 für 13+d	0,7	0,7	0,7	15,8
Eindringtiefe [mm]	27 / 73	16	2 / 14	43 - 333
$m_H(t_0)$ [g]	7935	7831	7395	7687
$m_H(t_{End})$ [g]	7891	7712	7846	7418
Differenz [g]	-44	-119	451	-269
Füllstand (t_0) [cm]	37,0	36,8	37,0	38,0
Füllstand (t_{End}) [cm]	37,0	36,0	38,5	37,2
Differenz	0	1,2	1,5	0,8

$N_1 = d_{15}/d_{85}$, $N_2 = d_{10}/d_{90}$, $N_3 = d_{10}/d_{100}$,

Tabelle 6-12: Rheologie der verwendeten Verfüllbaustoffe

Verfüllmaterial	Fließgrenze τ_0 [Pa]	Plastische Viskosität η_p [Pa*s]	Bestimmtheitsmaß	Thixotropiemaß [%]
07 ¹⁾	6,37	0,164	0,9977	74
07d ¹⁾	2,67	0,185	0,9942	55
07d ¹⁾	7,24	0,502	-	-
13+ ¹⁾	7,74	0,146	0,9975	94
13+d ¹⁾	6,55	0,593	-	-
13+d ¹⁾	50,99	0,226	0,9967	94
13+d ²⁾	11,09	0,163	0,9935	82,28

¹⁾ aus Labormischer, ²⁾ GerTec-Mischanlage (IS-38E)

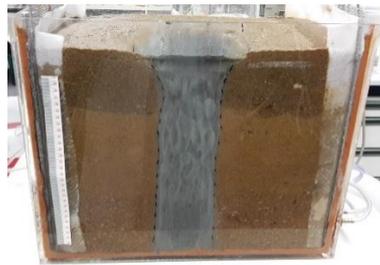


Abbildung 6-45: Verfüllkörper des Vorversuchs mit dem Baustoff 13+d (von links nach rechts, Vorderansicht, Seite Grundwasserzustrom, Hinteransicht, Aufsicht)



Abbildung 6-46: Verfüllkörper des Versuchs 1 mit dem Baustoff 07d (von links nach rechts, Vorderansicht, Seite Grundwasserzustrom, Hinteransicht, Aufsicht)



Abbildung 6-47: Verfüllkörper des Versuchs 2 mit dem Baustoff 02 (von links nach rechts, Vorderansicht, Seite Grundwasserzustrom, Hinteransicht, Aufsicht)



Abbildung 6-48: Verfüllkörper des Versuchs 3 mit dem Baustoff 13+d (von links nach rechts, Vorderansicht, Seite Grundwasserzuströmung, Hinteransicht, Aufsicht)

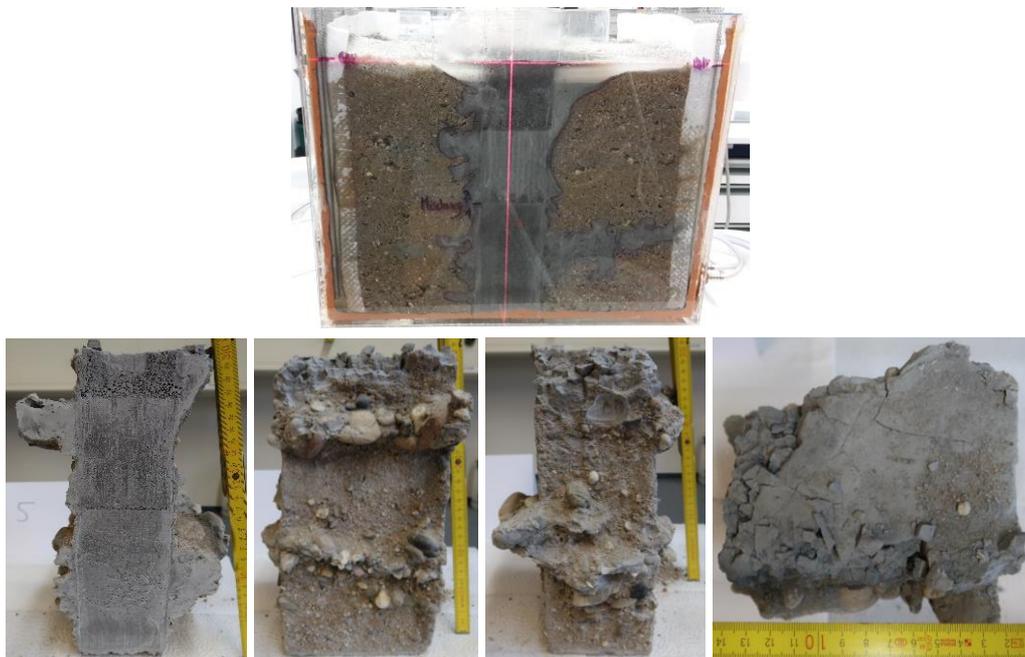


Abbildung 6-49: Verfüllkörper des Versuchs 4 mit dem Baustoff 13+d (von links nach rechts, Vorderansicht, Seite Grundwasserzuströmung, Hinteransicht, Aufsicht)

6.4.2. Ergebnis des großen Aquariumsversuchs

Der große Aquariumsversuch wurde mit vorgeseibten, kommerziellen Baustoffen (Sand, Kies, Split) durchgeführt. Hierfür gab es zwei Gründe. Zum einen war bei der Dimension des Aquariums eine große Menge an homogenen Sedimenten mit vordefinierten Eigenschaften notwendig um nachvollziehbare Ergebnisse zu erlangen. Zum anderen konnten so deutlich unterschiedliche Porenstrukturen erzielt werden, die das Penetrationsverhalten der Verfüllsuspension schichtspezifisch beeinflussen und somit eine große Bandbreite an Sedimenten abbilden. Dadurch wurden sowohl Best Case als auch Worst Case Szenarien erreicht.

Der Aufbau des großen Aquariumsversuchs ist in Kapitel 0 ausführlich beschrieben. In diesem Versuch wurde der Verfüllbaustoff 13+d verwendet. Die Vorortparameter des Verfüllbaustoffs sind in Tabelle 6-13 aufgelistet. Die Korngrößenverteilung des Verfüllbaustoffs 13+d ist in Abbildung 6-44 dargestellt. Die Materialeigenschaften der verwendeten Sedimente sind in Tabelle 6-14 aufgelistet sowie die Korngrößenverteilung ist in Abbildung 6-50 dargestellt.

Der große Aquariumsversuch sollte möglichst realitätsnah durchgeführt werden. Daher wurde der Verfüllbaustoff mit der GerTec-Mischanlage (IS-38E) angemischt und mit einer Verpressgeschwindigkeit von 40 l/min verpresst. Unmittelbar nach der Verfüllung wurde die Verrohrung mittels eines Krans vorsichtig vertikal nach oben gezogen und die Ereignisse im Aquarium fotografisch festgehalten. Beim Ziehen der ersten 30 cm der Verrohrung konnten keine Auffälligkeiten beobachtet werden. Erst als die Unterseite der Verrohrung auf Höhe der Kiesschicht angelangt war, zeigten sich erste Schlieren aus Verfüllbaustoff an der Grenze Sand/Kies. Beim weiteren Ziehen begann sich ein Trichter an der Oberfläche der Kiesschicht auszubilden (Abbildung 6-51). Unmittelbar nach dem die Verrohrung vollständig gezogen war, zeigte sich im Grenzbereich Sand/Kies eine vollständige Füllung des Porenraums mit Verfüllbaustoff (ca. 8-10 cm, Abbildung 6-52 unterhalb der grünen Linie). Darüber hinaus bildete sich innerhalb der Kiesschicht ein ca. 15 cm mächtiger Bereich mit deutlichen Schlieren aus Verfüllbaustoff aus (zwischen roter und grüner Linie). Weiterhin hatte sich ein ausgeprägter Trichter an der Oberkante der Kiesschicht ausgebildet. Die Ursache der Trichterbildung lag darin, dass das „Bohrloch“ kollabierte. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Verfüllbaustoff keine ausgeprägten thixotropen Eigenschaften aufweist, die das Bohrloch stabilisiert. Verstärkend kommt in diesem Versuchsfall allerdings hinzu, dass im Bohrloch keine Erdwärmesondenrohre vorhanden waren und damit der Kies ungehindert in das Bohrloch fallen konnte. Zudem handelt es sich beim verwendeten Kies um einen vorgeseibten Baustoff, dem der Feinkornanteil fehlte und der sich daher nicht wie ein natürlicher Kies verhielt und weniger standfest war. Das Kollabieren des Bohrlochs kann in diesem Versuch durch die Versuchsbedingungen hervorgerufen worden sein. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass dieses Szenarium nicht auch bei einer realen EWS auftritt.

Einen Einfluss des Grundwassers konnte in diesem Versuch beobachtet werden. Der Grundwasserfluss wurde bereits vor dem Verfüllvorgang mit 2 ‰ angelegt. Die Schlieren (in Abbildung 6-52 zwischen roter und grüner Linie), die sich im Kies während des Verfüllvorgangs ausgebildet haben, wurden mit dem Grundwasser transportiert. Dies zeigt sich deutlich in Abbildung 6-52. Hier wird im Versuchsverlauf der Bereich der Schlierenbildung über die Zeit immer klarer und der Bereich mit der größten Schichtmächtigkeit der Schlieren wird in Grundwasserfließrichtung (von links nach rechts) transportiert. Aber auch im Split ist der Grundwassereinfluss erkennbar. Hier

hat sich ein leicht elliptischer Verfüllkörper mit einer Längsausdehnung in Grundwasserfließrichtung gebildet (Abbildung 6-53, Abbildung 6-58).

Tabelle 6-13: Vorortparameter des verwendeten Verfüllbaustoff 13+d

Parameter	Wert
Charge	02.04.2019
W/F-Wert	0,8
Dichte [g/cm ³]	1,48
Temperatur [°C]	16,2
Marshzeit [s]	56
Restauslauszeit [s]	47
Absetzmaß 1 h [%]	0,4
Absetzmaß 24 h [%]	0,8
Verpressgeschwindigkeit [l/min]	40
d ₈₅ [mm]	0,095
d ₉₀ [mm]	0,125
d ₁₀₀ [mm]	0,200
Fließgrenze [N/m ²]	11,09

Tabelle 6-14: Materialeigenschaften der verwendeten Sedimente (N₁ = d₁₅/d₈₅, N₂ = d₁₀/d₉₀, N₃ = d₁₀/d₁₀₀)

	Mittelsand	Fein Kies (Split)	Mittel Kies (8/16)
k _{f20} -Wert [m/s]	3,9E-5 - 7,7E-5	5,1E-3	1,0E-2
k _{f20} -Wert [m/s] ¹⁾	4,5E-3		
Porosität [%]	44	44	35
Korndichte [g/cm ³]	2,63	2,64	2,60
d ₁₀ [mm]	0,21	2,07	9,10
d ₁₅ [mm]	0,22 - 0,29	2,11	10,2
N ₁ für 07d	1,3 – 1,8	12,8	61,8
N ₂ für 07d	0,7 – 0,8	7,5	33,6
N ₃ für 07d	0,4 – 0,5	4,4	19,8
N ₁ für 13+d	2,3 – 3,1	22,2	107,4
N ₂ für 13+d	1,6 – 1,8	16,3	72,6
N ₃ für 13+d	1,0 – 1,1	10,2	45,4
Eindringtiefe [mm]	28	379	1027

¹⁾ k_{f20}-Wert der gesamten Schichtenfolge im Aquariumsversuch

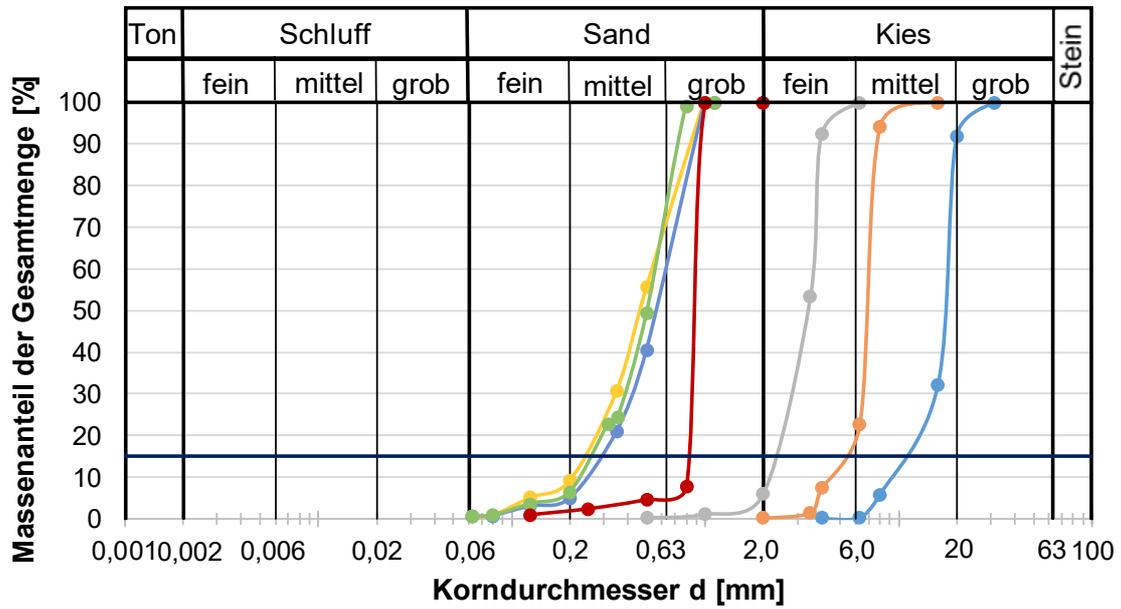


Abbildung 6-50: Korngrößenverteilung der verwendeten Sedimente



Abbildung 6-51: Aquariumsversuch unmittelbar nach Ziehen der Verrohrung.



Abbildung 6-52: Zeitliche Entwicklung des Versuchs. Links bei Versuchsbeginn, Mitte unmittelbar nach Ziehen der Verrohrung, rechts 2 Stunden nach Ziehen der Verrohrung

Nach 28 Tagen wurde der Versuch vorsichtig ausgebaut und die Verteilung der Verfüllung begutachtet und fotografisch dokumentiert. In Abbildung 6-53 ist die Verteilung der Verfüllung dargestellt. Von der Oberkante bis in eine Tiefe von 32 cm ist im Bereich der EWS kein Verfüllbaustoff zu erkennen. In diesem Bereich war das Bohrloch vollständig in sich zusammengefallen und es befand sich an der Stelle der EWS ausschließlich Kies. Es ist jedoch an der Oberfläche ein ca. 4 cm tiefer wassergefüllter Trichter mit einem Durchmesser von etwa 25 cm erkennbar. Ab einer Tiefe von 32 cm sind im Bereich der EWS Schlieren zu erkennen. Der Kies ist jedoch nicht verfestigt und die Schlieren lassen sich mit einem Tuch entfernen (Abbildung 6-54). Von 48 cm bis ca. 50 cm (49 bis 52 cm an den Rändern) sind über die gesamte Fläche des Aquariums deutliche Schlieren zu erkennen. Der Kies ist hier ebenfalls nicht verfestigt. In Grundwasserfließrichtung nehmen die Schlieren ab der Mitte des Aquariums ab. Die Verteilung der Schlieren ist in Abbildung 6-53 hellgrau dargestellt.

Ab einer Tiefe von ca. 50 cm ist der Verfüllbaustoff vollständig in den Kies penetriert und hat den Kies zementiert und die Poren vollständig gefüllt (Abbildung 6-55). In Grundwasserfließrichtung nimmt von der Mitte an die Mächtigkeit der zementierten Schicht um ca. 1-2 cm ab (Abbildung 6-52, rechts). Der Kies wird von einer Sandschicht unterlagert, in die der Verfüllbaustoff maximal 1 mm eingedrungen ist (Abbildung 6-56). In dieser Schicht befindet sich im Bereich der EWS der Verfüllbaustoff sowie viel Kies aus der obersten Kiesschicht (Abbildung 6-57). In der Splitschicht hat sich ein Kegelsumpf ausgebildet, dessen Durchmesser mit zunehmender Tiefe größer wird (Abbildung 6-58). Ferner wird der Durchmesser in Grundwasserfließrichtung etwas größer und weist eine leichte ellipsenform auf. Darüber hinaus befindet sich auch hier im Verfüllbaustoff Kies aus der Kiesschicht.

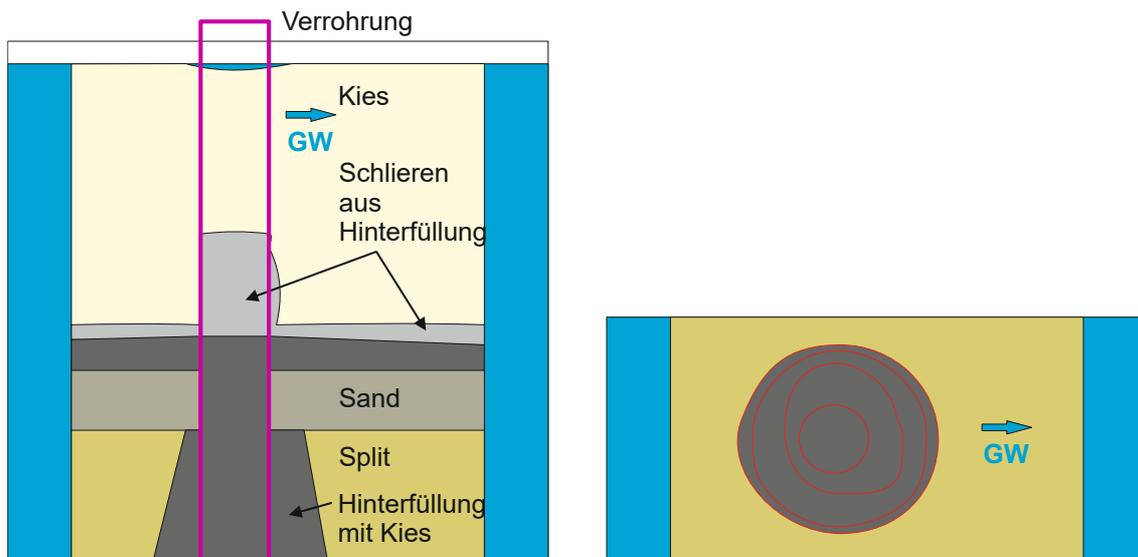


Abbildung 6-53: Verteilung des Verfüllbaustoffs bei Versuchsende (dunkelgrau Verfüllung, hellgrau Schlieren der Verfüllung)



Abbildung 6-54: Schlieren in 32 cm Tiefe



Abbildung 6-55: Zementierte Kiesschicht in 48 cm Tiefe



Abbildung 6-56: Links Grenze Kies/Sand in ca. 58cm Tiefe. Innerhalb des Sandes keine Verfällung und Schlieren zu erkennen. Eindringtiefe der Verfällung in den Sand ca. 1mm. Rechts zementierter Kies an der Grenze zum Sand



Abbildung 6-57: Runder Verfällkörper aus der Sandschicht. Deutlich sichtbar ist Kies, der ins Bohrloch gefallen ist



Abbildung 6-58: Links Grenze Sand/Kies in ca. 67cm Tiefe. Mitte und rechts zementierter Split. Zementierter Spiltkörper ist in Richtung des Grundwasserflusses asymmetrisch ausgebildet

Für die im Aquariumsversuch verwendeten Sedimente wurden das Terzaghi-Filterkriterium berechnet (Tabelle 6-14). Hier zeigt sich für alle verwendeten Modellansätze eine gute Übereinstimmung für die Kiesschicht. Die Werte liegen zwischen 45,4 und 107,4 und damit deutlich über den Grenzwerten (Tabelle 4-1) für eine mögliche Penetration. Für die Sandschicht liegen die berechneten Werte zwischen 1,0 und 3,1 und sind damit < 5 . Dies bedeutet, dass keine Penetration stattfindet, was durch das Versuchsergebnis bestätigt wird. Für die Splitschicht ist eine eindeutige Bewertung anhand des Terzaghi-Filterkriteriums nicht möglich. Wird das Verhältnis N1 herangezogen (Tabelle 4-1), wird nur für die Annahmen von Kravetz (1958) der Grenzwert für eine mögliche Penetration überschritten, während nach Kutzner (1991), Mitchell (1970) und Sherard & Dunningan (1984) keine eindeutige Aussage über eine mögliche Penetrierbarkeit des Verfällbaustoffs getroffen werden kann. Für die Terzaghi-Verhältnisse N2 und N3 hingegen werden die Grenzwerte für eine mögliche Penetration überschritten.

Bezüglich der berechneten Eindringtiefe (Tabelle 6-14) stimmen die Werte besser überein als in den natürlichen Sedimenten der kleinen Aquariumsversuche. Für den Sand liegen die Werte mit 28 mm zwar deutlich über den im Experiment ermittelten Werten von ca. 1 mm, für den Split

liegen die Werte jedoch in der gleichen Größenordnung. Eine genaue Berechnung der Eindringtiefe war in diesem Versuch für den Split nicht möglich, da die Druckdifferenz aufgrund der Penetration in die Kiesschicht nicht bekannt war und nur das Worst Case Szenarium mit einer zu hohen Druckdifferenzen angenommen werden konnte und somit auch höhere Eindringlängen berechnet wurden. Der Unterschied zwischen Mess- und Rechenwerte beträgt wenige Zentimeter. Die berechnete Eindringtiefe für den Kies beträgt 1027 mm. Da beim Ziehen der Verrohrung kein Verfüllbaustoff nachgeführt wurde, verringerte sich penetrationsbedingt die Druckdifferenz über die Zeit und somit auch die mögliche rechnerisch Eindringtiefe. Experimentell konnte in diesem Versuch keine eindeutige Eindringtiefe bestimmt werden, da mit dem Filterfließ eine natürliche Grenze für die Penetration gegeben war und somit lediglich ca. 400 mm für die Eindringtiefe zur Verfügung standen. Die bessere Übereinstimmung in diesem Versuch liegt wahrscheinlich daran, dass der verwendete Split und Kies vorgeseibt wurde und damit eine sehr engständige Korngrößenverteilung (Abbildung 6-50) aufweist. Bei solchen Baustoffen sind in der Regel die Poren nicht durch kleinere Partikel gefüllt und damit für die Suspension zugänglicher.

6.4.3. Ergebnisse der Penetrationsversuche im Labormaßstab

Mit Hilfe der Penetrationsversuche sollte das Eindringverhalten der Verfüllsuspension in das anstehende Gestein untersucht werden. Da die Porosität von Sedimenten in der Regel größer als bei Festgesteinen ist und die Versuchsdurchführung mit Sedimenten leichter zu bewerkstelligen ist, wurden die Versuche mit unterschiedlichen Sedimenten durchgeführt. Um vergleichbare Laborwerte zu erzielen und klar definierte Rahmenbedingungen zu erlangen, wurden vorgeseibte Sande und Kies verwendet. Die Versuche mit den Kiesen haben jedoch gezeigt, dass aufgrund der sehr großen Eindringtiefe der Suspension die Laborversuche zu kleinskalig waren, da die Suspension unmittelbar beim Überführen in den Versuchsaufbau am Überlauf ausfloss, sodass keine Daten erhoben werden konnten und weitere Versuch mit diesem Versuchsaufbau in Frage stellten. Daher wurden im Projekt ein neuer Versuchsaufbau im Technikumsmaßstab entwickelt und zusätzlich Penetrationsversuche (Kapitel 5.12.3, Kapitel 6.4.4) durchgeführt. Insgesamt wurden 10 Laborversuche durchgeführt, wobei Versuch 3 und Versuch 4 unter den gleichen Bedingungen als Parallelversuche verwirklicht wurden um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu validieren.

Die Versuchsparameter aller durchgeführten Penetrationsversuche sind in Tabelle 6-15 und Tabelle 6-16 aufgelistet. Da sich die Ergebnisse der Versuche nicht grundlegend unterscheiden, werden im Folgenden nur die Versuche 3 und 4 sowie Versuch 9 exemplarisch besprochen. Die Ergebnisse aller Versuche sind in Tabelle 6-15 und Tabelle 6-16 aufgelistet und, soweit in diesem Kapitel nicht detailliert besprochen, im Anhang 10.3 in Abbildung 10-35 bis Abbildung 10-40 dargestellt. In den Versuchen 3 und 4 wurde kein äußerer Druck angelegt. Der Druck an der Grenzschicht Sediment/Verfüllung resultiert aus dem hydrostatischen Druck der Suspension.

In Abbildung 6-59 links oben ist die zeitliche Entwicklung des Wassers dargestellt, das im Versuch 3 und 4 am Überlauf austrat. Die Wassermenge wird dabei durch zwei Prozesse hervorgerufen. Zum einen wird durch das Eindringen der Suspension in den Porenraum des Sediments das Wasser aus den Poren in Richtung des geringsten Widerstands verdrängt und damit hin zum

Überlauf transportiert. Dieser Vorgang verläuft nach Arwanitaki et al. (2007) binnen weniger Minuten. Die Wassermenge wird dabei bei wassergesättigten Sedimenten durch die Eindringtiefe der Suspension und die Porosität des Sediments bestimmt. Der weitere Teil des Wassers entstammt aus der Suspension selbst. Hierbei wird durch den Filtrationsprozess (Kapitel 4.1) an der Grenze Sediment/Suspension Wasser der Schwerkraft folgend an das Sediment abgegeben und über den Überlauf in den Auffangbehälter abgeleitet. In diesem Fall spielen auch Sedimentationsprozesse noch eine wichtige Rolle. Die durch den Filtrationsprozess bedingte Wasserabgabe ist von den rheologischen Eigenschaften, dem Absetzverhalten sowie der Hydratation der Suspension abhängig und hat in den Penetrationsversuchen ohne äußeren Druck bis zu 8 Stunden andauert (Abbildung 6-59 und Abbildung 6-61). Bei den Versuchen mit Mittelsand ohne äußeren Druck wurden ca. 9,0 – 9,5 ml Wasser (berechnet anhand der Eindringtiefe und der Porosität, Tabelle 6-15 und Tabelle 6-16) aus dem Porenraum durch die Suspension verdrängt. Für den Grobsand waren dies bedingt durch die größere Eindringtiefe der Suspension 32,0 – 50,4 ml. Werden diese Zahlen bezüglich der zeitlichen Entwicklung der Wasserabgabe in den durchgeführten Versuchen zugrunde gelegt, kann die Penetration bis zu 100 min andauern (Abbildung 6-61). Die längeren Penetrationszeiten treten in den durchgeführten Versuchen beim Grobsand auf, der über größere Porenöffnungsweiten als der Mittelsand verfügt. Dies bedeutet, dass beim Mittelsand sich die Poren zeitnah nach der Suspensionseingabe zusetzen und damit eine weitere Penetration verhindern, während beim Grobsand sich der Porenraum nach Überwindung der Scherkräfte nur langsam füllt. Die Versuche 3 und 4 wurden unter denselben Bedingungen mit den gleichen Materialien durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Hierbei wurde eine sehr gute Übereinstimmung erzielt und damit die Qualität der Ergebnisse bestätigt.

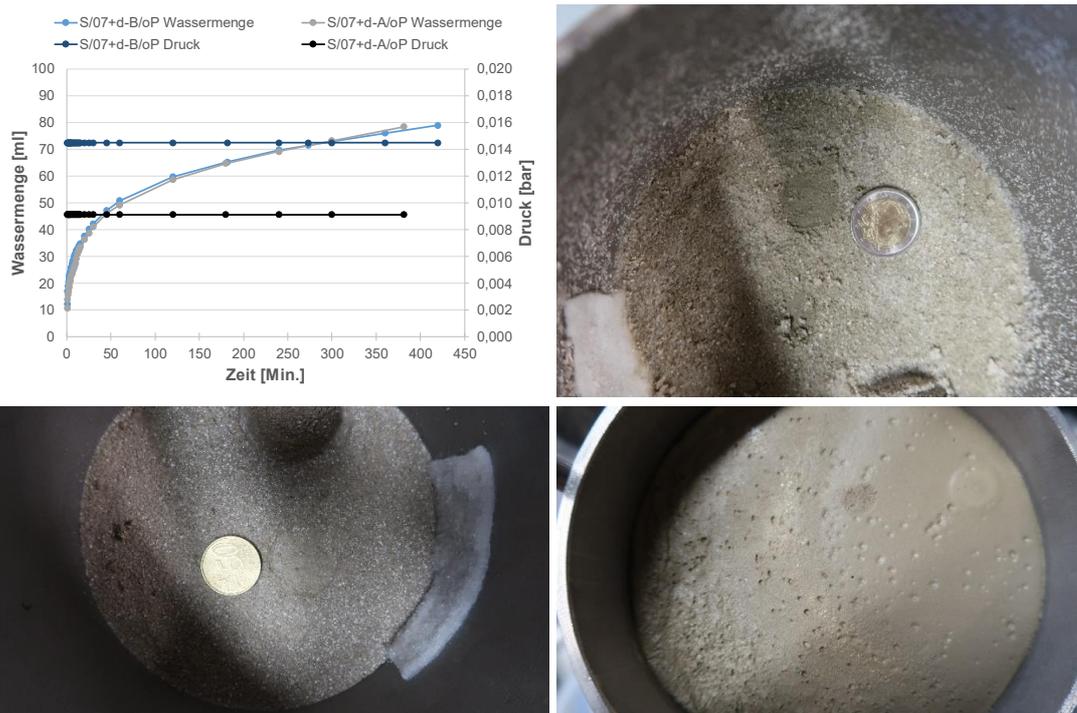


Abbildung 6-59: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 3 und 4 (links oben), Grenzschicht Sand/Verfüllung des Versuch 3 (rechts oben). Grenzschicht Sand/Verfüllung des Versuch 4 (links unten) und Oberseite der Verfüllung Versuch 4 (rechts unten)

Tabelle 6-15: Vorortparameter und Ergebnisse der Penetrationsversuche V1 bis V5

Versuch	V1	V2	V3	V4	V5
Verfüllmaterial	13+d	13+d	07d	07d	07d
Charge	02.04.2019	02.04.2019	29.05.2019	09.07.2019	09.07.2019
ρ_s [g/cm ³]	1,40	1,44	1,96	1,95	1,95
Marschzeit [s]	70	79	69	-	88
Restauslaufzeit [s]	96	89	61	-	74
Absetzmaß 1 h [%]	0	0	0,4	0	0,1
Absetzmaß 2 h [%]	0	0	0,8	0,4	0,8
Absetzmaß 24 h [%]	0	0	1,6	0,4	1,2
Temperatur [°C]	21,4	21,4	22,7	23,0	22,7
Geologie	MSa	MSa	MSa	MSa	GSa
ρ_k [g/cm ³]	2,63	2,63	2,63	2,63	2,65
K _{f10} -Wert [m/s]	3,9E-5 – 7,7E-5	3,9E-5 – 7,7E-5	3,9E-5 – 7,7E-5	3,9E-5 – 7,7E-5	7,0E-5
Porosität [%]	53	53	51	54	52
Höhe Suspension [mm]	55,18	46,46	47,38	75,71	76,62
Hydrostatischer Druck [bar]	0,0076	0,0066	0,0091	0,0145	0,015
Druck [bar]	nein	0,29	Nein	nein	nein
Wassermenge aus Sediment [ml]	9,3	9,3	9,0	9,5	50,4
Eindringtiefe ¹⁾ [mm]	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	5-6
Eindringtiefe ²⁾ [mm]	2 / 7	59 / 271	13 / 36	21 / 57	81 / 219
N1	2,3 – 3,1	2,3 – 3,1	1,3 – 1,8	1,3 – 1,8	4,9
N2	1,6 – 1,8	1,6 – 1,8	0,7 – 0,8	0,7 – 0,8	3,0
N2	1,0 – 1,1	1,0 – 1,1	0,4 – 0,5	0,4 – 0,5	1,7

N1 = d15/d85, N2 = d10/d90, N3 = d10/d100; ¹⁾ gemessen; ²⁾ berechnet

Im Versuch 9 wurde an der Versuchszelle ein zusätzlicher Druck von 0,26 bar angelegt, um einen Druckunterschied zwischen dem hydrostatischen Druck der Suspensionssäule und dem Porenwasserdruck des Untergrunds zu simulieren. Bedingt durch den höheren Druck verlief in diesem Versuch die Wasserabgabe deutlich schneller als in den drucklosen Versuchen, was sich im steileren Anstieg der Wasseraustragskurve in Abbildung 6-60 zeigt. Dieses Verhalten wurde gemäß Abbildung 6-61 auch in den übrigen Versuchen beobachtet. Der sprunghafte Anstieg des Wasseraustrags in den druckgeführten Experimenten (Abbildung 6-60 links, Abbildung 6-61 rechts) geht auf einen Blow out zurück. Hierbei wurde die Suspension durch den Druck in der Versuchszelle soweit zusammengepresst und dabei entwässert, dass die komprimierte Luft im oberen Teil der Versuchszelle schlagartig entwich und dabei das Porenfluid im Sediment über den Auslauf in

das Auffangbehältnis transportierte. In Abbildung 6-60 unten ist ein deutlicher Spalt in der Verfüllung zu erkennen, über den die komprimierte Luft ins Sediment gelangte. Ähnliche Wegsamkeiten wurden auch in den übrigen druckgeführten Versuchen beobachtet (Anhang 10.3).

Tabelle 6-16: Vorortparameter und Ergebnisse der Penetrationsversuche V6 bis V10

Versuch	V6	V7	V8	V9	V10
Verfüllmaterial	13+d	07d	07d	13+d	07d
Charge	02.04.2019	29.05.2019	29.05.2019	27.04.2019	02.04.2019
ρ_s [g/cm ³]	1,43	1,95	1,98	1,45	-
Marschzeit [s]	72	81	-	-	-
Restauslaufzeit [s]	97	71	-	-	-
Absetzmaß 1 h [%]	0	0	0,4	0	-
Absetzmaß 2 h [%]	0	0,2	0,4	0	-
Absetzmaß 24 h [%]	0	0,7	1,2	0	-
Temperatur [°C]	22,2	23,4	22,6	20,6	-
Geologie	GSa	MSa	GSa	GSa	Split
ρ_k [g/cm ³]	2,65	2,63	2,65	2,65	
K _{f10} -Wert [m/s]	7,0E-5	3,9E-5 – 7,7E-5	7,0E-5	7,0E-5	
Porosität [%]	52	55	54	53	
Höhe Suspension [mm]	46,57	49,88	61,05	62,40	
Hydrostatischer Druck [bar]	0,0065	0,0095	0,0119	0,0089	
Druck [bar]	nein	0,24	0,23	0,26	-
Wassermenge aus Sediment [ml]	32,0	19,1	28,5	55,8	
Eindringtiefe ¹⁾ [mm]	3-4	1-2	2-3	5-7	vollständig
Eindringtiefe ²⁾ [mm]	5 / 24	342 / 926	1286 / 3489	201 / 923	-
N1	8,5	1,3 – 1,8	4,9	8,5	12,8
N2	6,4	0,7 – 0,8	3,0	6,4	7,5
N2	4,0	0,4 – 0,5	1,7	4,0	4,4

- Bei diesen Versuchen war nicht genügend Verfüllmaterial übrig um die Marschzeit zu bestimmen; N1 = d₁₅/d₈₅, N2 = d₁₀/d₉₀, N3 = d₁₀/d₁₀₀; ¹⁾ gemessen; ²⁾ berechnet

Die Eindringtiefe der Suspension in das Sediment wurde in den Penetrationsversuchen mit einem Messschieber gemessen. Hierzu wurde beim Versuchsausbau der lose Sand vorsichtig entfernt und die Strecke zwischen den zementierten Sandkörnern und der erhärteten Verfüllung gemessen (Abbildung 6-59, rechts oben und links unten, Abbildung 6-60 rechts oben). Die Messwerte sind in Tabelle 6-15 und Tabelle 6-16 dargestellt. Darüber hinaus wurde die Eindringtiefe auch nach DIN 4126 (2013) berechneten. Wie in den kleinen Aquariumsversuchen weichen die Werte

erheblich voneinander ab. Lediglich im Versuch 1 und Versuch 6 sind die Abweichungen im einstelligen Millimeterbereich. Wie bereits erwähnt, liegt der Grund für die Abweichung wahrscheinlich darin, dass vom Verfüllbaustoff lediglich die Fließgrenze in die Berechnung einfließt und die Korngrößenverteilung nicht berücksichtigt wird (Kapitel 4.1 und Kapitel 6.4.1).

Bei der Betrachtung des Terzaghi-Filterkriterium (Tabelle 6-15 und Tabelle 6-16) werden für den Mittelsand sowie für den Grobsand die Grenzwerte für eine mögliche Penetration nicht überschritten. Hier zeigt sich wieder eine sehr gute Übereinstimmung zu den gemessenen Eindringtiefen, die verdeutlichen, dass in den Versuchen 1 bis 9 keine nennenswerte Penetration stattfand. Im Versuch 10 lassen die Modellansätze jedoch keine zuverlässige Anwendbarkeit bezüglich des Penetrationsverhalten zu. In diesem Versuch wurde Split als Sediment verwendet und bereits während des Verfüllvorgangs penetrierte der Verfüllbaustoff 07d vollständig in den Split und lief am Überlauf aus der Versuchszelle. Werden die Grenzwerte aus Tabelle 4-1 herangezogen, gilt für N1 die Penetration als unsicher. Für N2 und N3 liegen die Werte mit 7,5 bzw. 4,4 unter dem Grenzwert, ab dem eine Penetration vorliegt. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine eindeutige Aussage über das Penetrationsverhalten von Verfüllbaustoffen mit den vorhandenen Ansätzen zurzeit noch nicht möglich ist.

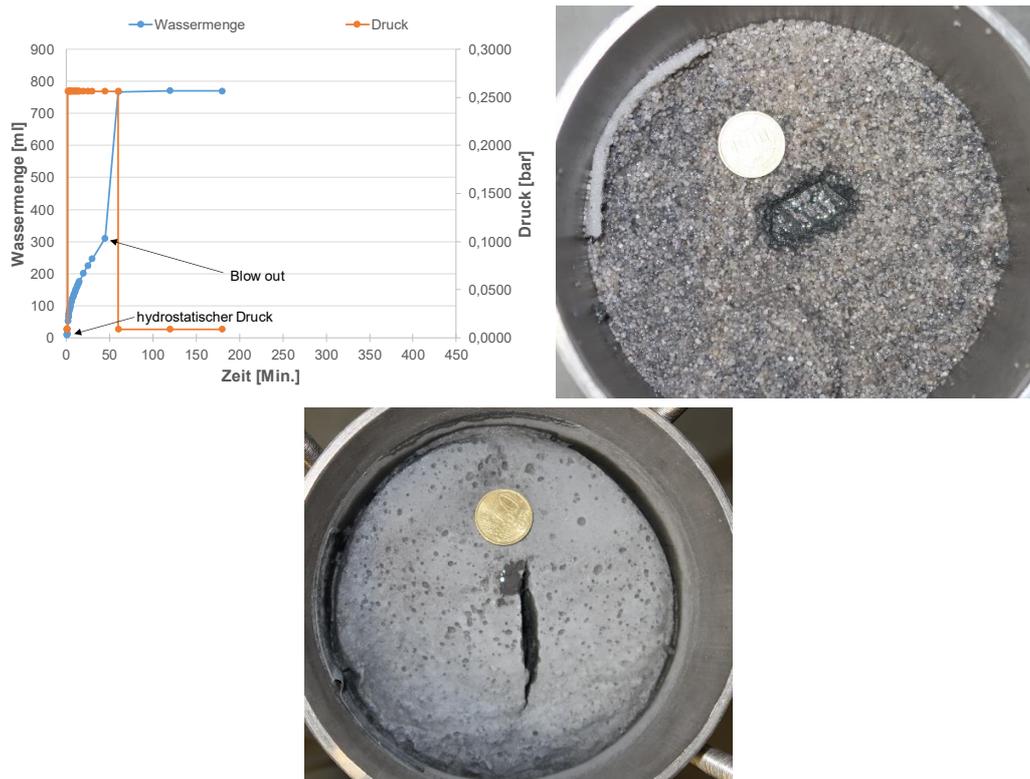


Abbildung 6-60: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 9 (links oben), Grenzschicht Sand/Verfüllung des Versuch 9 (rechts oben). Oberseite der Verfüllung (unten)

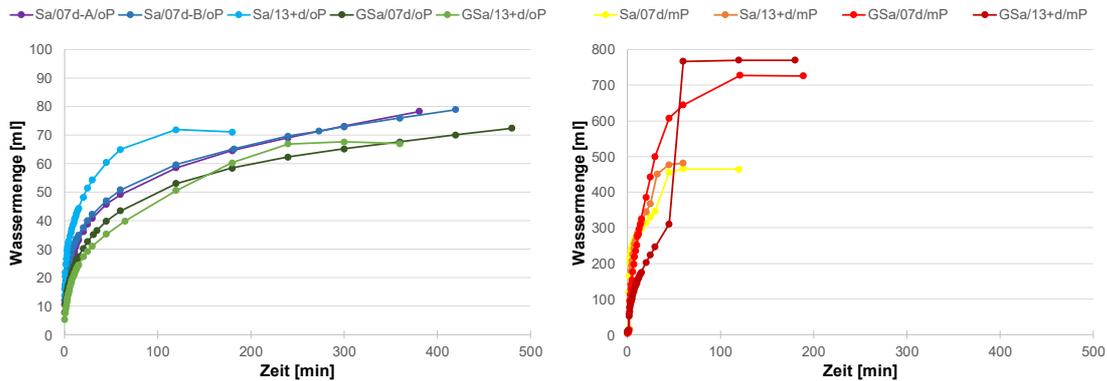


Abbildung 6-61: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus allen Penetrationsversuch (links Versuche ohne äußeren Druck, rechts Versuche mit äußerem Druck)

Bei der Bestimmung der Vorortparameter des Verfüllbaustoffs 13+d im Versuch 9 zeigte sich im Sieb des Marschtrichters ein Siebrückstand von 0,56g (0,344g zwischen 2-4mm, 0,211g zwischen 1-2mm und 0,001g zwischen 0,5-1mm). Dabei handelte es sich vorwiegend um Quarzkörner (Abbildung 6-62).



Abbildung 6-62: Siebrückstand in Versuch 9

6.4.4. Ergebnisse der Penetrationsversuche im Technikumsmaßstab

Aufgrund der großen Eindringtiefe der Suspension waren die Laborversuche für Sedimente mit großer Porenöffnungsweite nicht geeignet und es mussten zusätzlich großmaßstäbliche Technikumsversuche durchgeführt werden. Bei diesen Versuchen konnte kein zusätzlicher Druck aufgebracht werden, sodass der Druck an der Grenzfläche Sediment/Verfüllung lediglich aus dem hydrostatischem Druck der Suspensionssäule resultierte. Die Vorortparameter der verwendeten Suspensionen sind in Tabelle 6-17 aufgelistet. Die verwendeten Sedimente sowie die Versuchsbedingungen der einzelnen Experimente sind in Tabelle 6-18 vermerkt.

Tabelle 6-17: Vorortparameter der Suspensionen

	[Einheit]	07d	13+d
Charge		09.07.2019	
Dichte Araeometer	[g/cm ³]	2,00	1,54
Dichte Waage	[g/cm ³]	1,98	1,56
Marshzeit	[s]	87	n.b.
Restlaufzeit	[s]	168	n.b.
Absetzmaß 24 h	[%]	0	0

Tabelle 6-18: Versuchsparameter und Ergebnisse der Technikumsversuche

Parameter	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
	Splitt FGr	Kies 8/16 MGr	Splitt Fgr	Kies 8/16 MGr
Einwaage [kg]	40,52	45,9	40,16	45,7
Korndichte [g/cm ³]	2,64	2,6	2,64	2,6
Radius [m]	0,0759	0,0759	0,0759	0,0759
Einbauhöhe [m]	1,508	1,515	1,508	1,515
Volumen [m ³]	0,0273	0,0274	0,0273	0,0274
Trockendichte [g/cm ³]	1,48	1,67	1,47	1,67
Porosität [%]	44	36	44	36
Kf ₁₀ -Wert [m/s]	5,1E-3 m/s	1,0E-2 m/s	5,1E-3 m/s	1,0E-2 m/s
Verfüllbaustoff	07d	07d	13+d	13+d
N1	12,8	61,8	22,2	107,4
N2	7,5	33,6	16,3	72,6
N3	4,4	19,8	10,2	19,8
Eindringtiefe ¹⁾ [m]	2,54 – 3,89	6,13 – 9,39	0,43 – 3,34	1,04 – 8,07
Eindringtiefe ²⁾ [m]	0,14	1,50	0,07	0,13 – 0,32
Wassermenge aus Sediment [l]	1,1	12	0,5	1,5

¹⁾ berechnete Eindringtiefe, ²⁾ gemessene Eindringtiefe

In Abbildung 6-63 ist die zeitliche Entwicklung des filtrierten Wassers der durchgeführten Technikumsversuche dargestellt. Hierbei zeigt sich, wie in den Laborversuchen, dass die Zeitdauer in der die Penetration stattfindet in den Versuchen mit den größeren Porenöffnungsweiten, wie sie im Mittelkies vorkommen, länger sind als im Feinkies (Split). So sind beim Split die Penetrationszeiten bei ca. 0,25 min. während sie beim Mittelkies zwischen 0,5 - 0,8 min. liegen. Der Grund hierfür sind die größeren Eindringtiefen im Kies gegenüber dem Split (Abbildung 6-64 - Abbildung 6-67, Tabelle 6-18). Bezüglich der Eindringtiefe und der daraus resultierenden Penetrationszeit ist auch eine Abhängigkeit von den Baustoffeigenschaften erkennbar. So penetriert der Verfüllbaustoff 07d mit <1,50 m deutlich weiter in den Kies als der Verfüllbaustoff 13+d mit 0,13 – 0,32 m. Die

berechneten Werte der Eindringtiefe (Tabelle 6-18) weichen wie in den zuvor beschriebenen Aquarius- und Penetrationsversuchen deutlich voneinander ab, da die Korngrößenverteilung innerhalb der Suspension in die Berechnungsgleichung nach DIN 4126 (2013) nicht eingeht.

Anhand der Porosität und der Eindringtiefe wurde die theoretisch mögliche Wassermenge berechnet die in den Versuchen durch die Penetration der Suspension aus dem Sediment ausgetrieben werden konnte. Für die Versuche 3 und 4 stimmen die berechneten Werte mit den gemessenen Werte in erste Näherung gut überein, während in den Versuchen 1 und 2 die berechneten Werte zum Teil deutlich höher als die gemessenen Werte waren. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Verfüllung den Porenraum nicht vollständig ausgefüllt hat und damit noch ursprüngliches Porenwasser im Sediment verblieb. Dies zeigte sich besonders in Versuch 2, in dem größere Bereiche nur schwach zementiert waren (Abbildung 6-64, Tabelle 6-19). Die Mehrmenge an filtriertem Wasser in den Versuchen 3 und 4 entstammt aus dem Filtrationsprozess innerhalb der Suspensionssäule, die über der Grenzschicht Sediment/Suspension anstand.

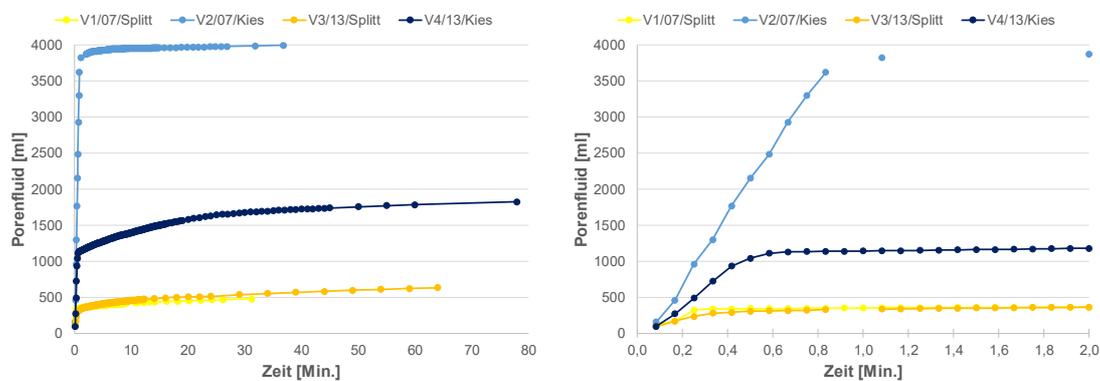


Abbildung 6-63: Zeitliche Entwicklung des filtrierten Wassers aus allen Penetrationsversuch (links gesamte Versuchsdauer, rechts für die ersten zwei Minuten)

In Versuch 1 betrug die Suspensionseindringtiefe 0,14 m. Unter Berücksichtigung der Versuchsparameter sind nach den Grenzwerten des Terzaghi-Filterkriterium das Penetrationsverhalten als unsicher eingestuft. Bei den experimentell bestimmten 0,14 m deutet dies auf eine nicht weitreichende Penetration hin. Im Versuch 2 überschreiten die Terzaghi-Werte N1 – N3 die Grenzwerte für eine mögliche Penetration, was durch den Versuch belegt wurde. Für den Versuch 3 lassen die Terzaghi-Werte gemäß der vorgegebenen Modellansätze (Tabelle 4-1) keine eindeutige Aussage zu. Hier liegt der N1 Wert mit 20,2 nach Kravetz (1958) im Bereich der Penetration, während nach Kutzner (1991), Mitchell (1970) sowie Sherard & Dunningan (1984) eine mögliche Penetration als unsicher angegeben wird. Für die Werte N2 und N3 wird hingegen wieder von einer Penetration ausgegangen. In diesem Versuch war die experimentell bestimmte Eindringtiefe auch am geringsten. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Versuchsbedingungen den Grenzbereich einer möglichen Penetration widerspiegeln. Für den Versuch 4 werden die Terzaghi-Filterkriterien deutlich überschritten, was eigentlich auf ein ausgeprägtes Penetrationsverhalten schließen ließe. Mit einer Eindringtiefe von 0,13 – 0,32 m ist eine Penetration zwar eindeutig gegeben, sie ist jedoch deutlich weniger stark ausgeprägt als in Versuch 2, in dem die

Terzaghi-Werte niedriger waren aber gleichzeitig die Eindringtiefe deutlich größer war. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich also eine mögliche Penetration der Suspension in den Untergrund ableiten, wie ausgeprägt diese jedoch ist, lässt sich nach dem momentanen Stand der Untersuchungen nicht beurteilen. Eine genaue Beurteilung der Penetrationsfähigkeit von Verfüllsuspension für EWS im Planungsstadium einer Erdwärmesondenanlage wäre wünschenswert, da hierdurch eine Abschätzung über eine zu erwartende Beeinträchtigung des Grundwassers und des Porenraums im Nahfeld der EWS möglich wäre und darüber hinaus eine genauere Bemessung des benötigten Verfüllbaustoffvolumens möglich wäre, was die Logistik der Bohrunternehmen vereinfachen würde.

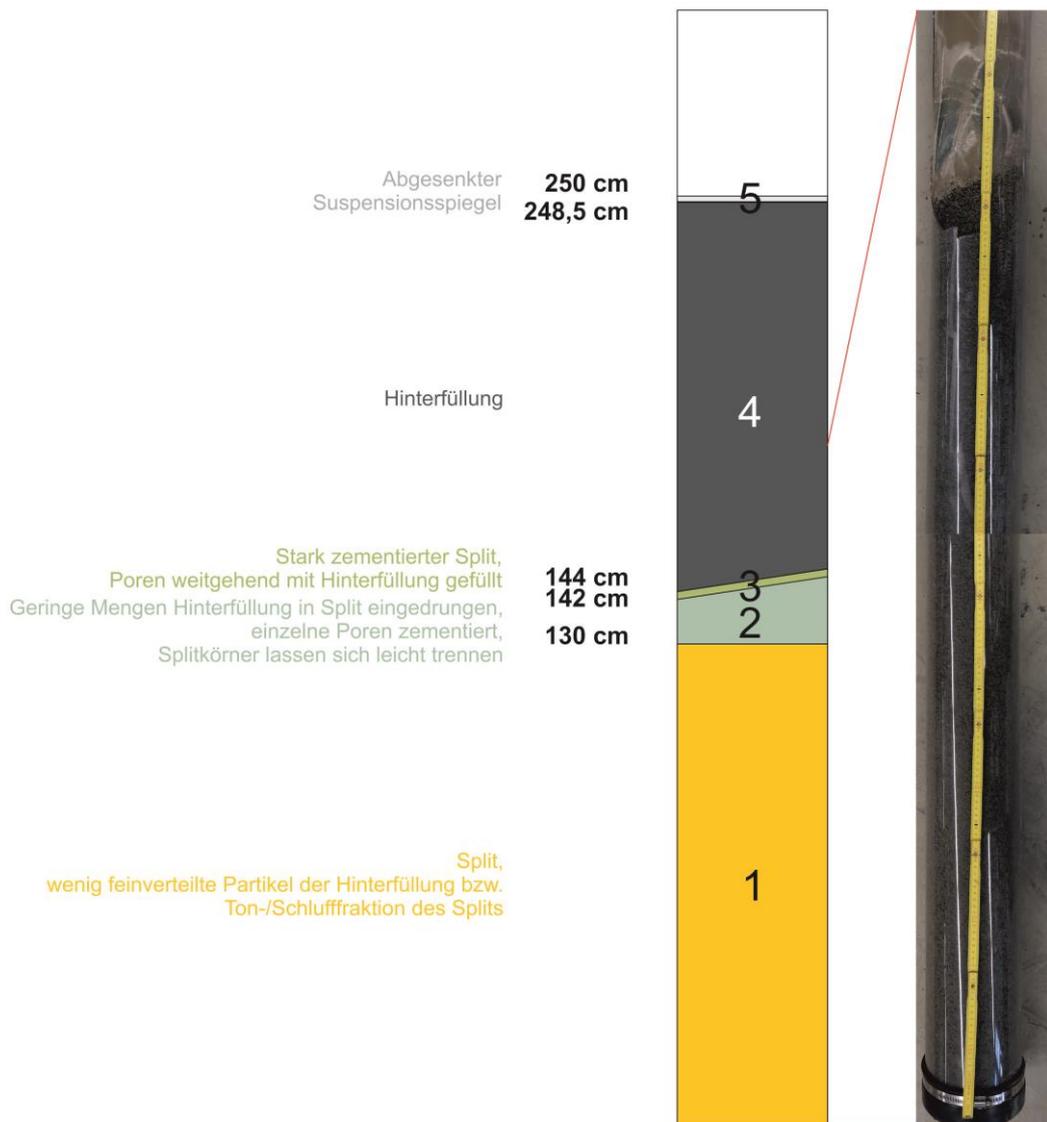


Abbildung 6-64: Verteilung des Verfüllbaustoffs im Versuch 1 mit Split und dem Verfüllbaustoff 07d

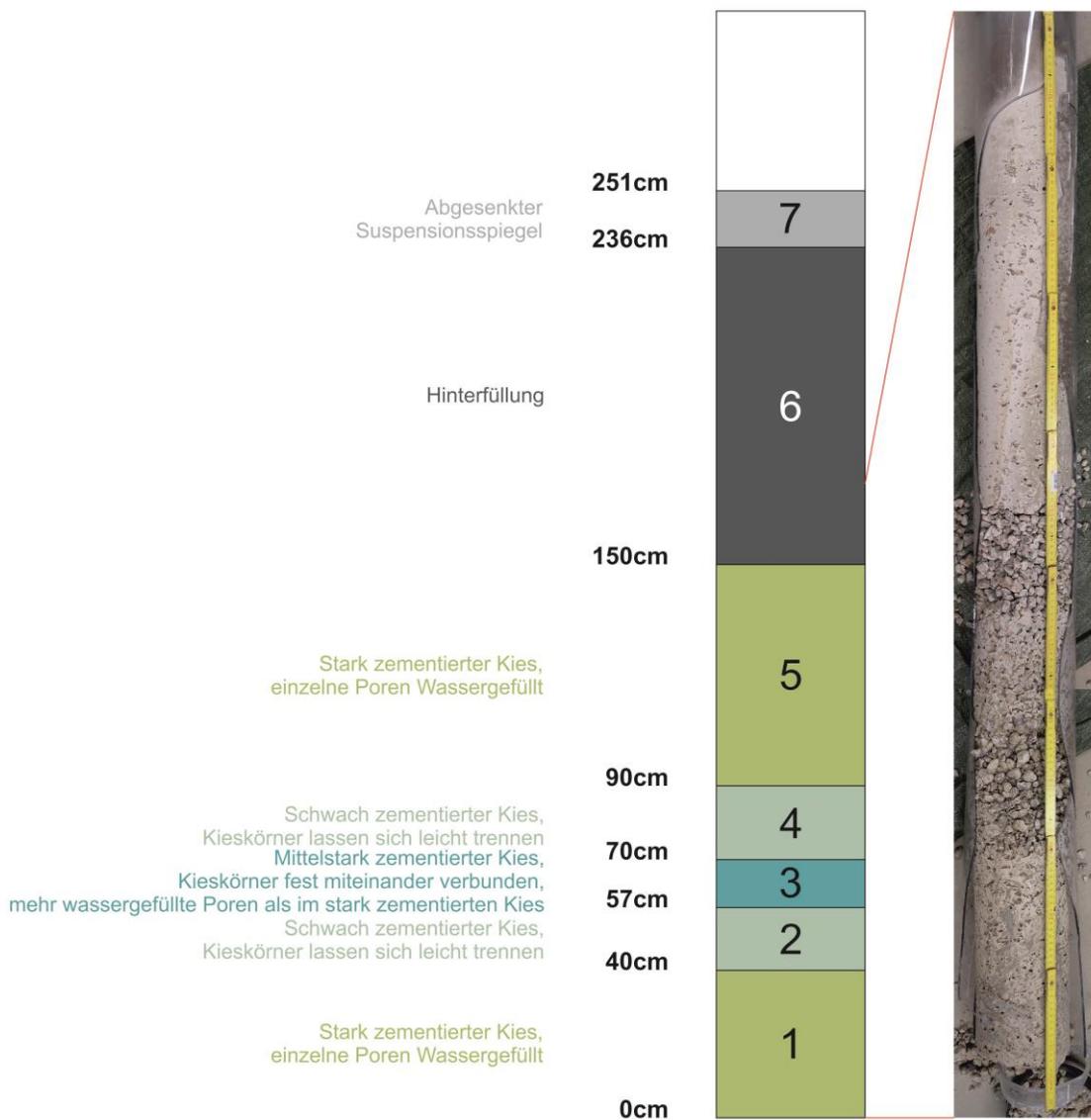
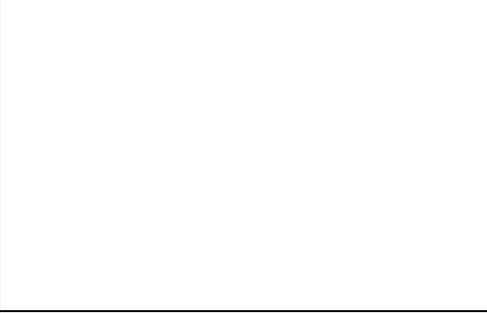
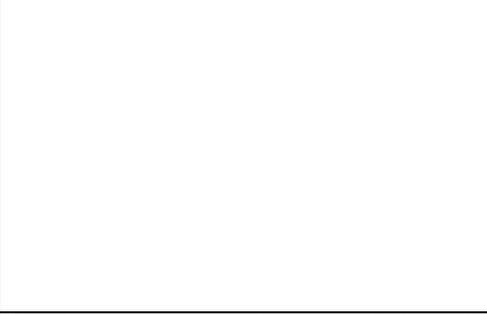


Abbildung 6-65: Verteilung des Verfüllbaustoffs im Versuch 2 mit Mittelkies und dem Verfüllbaustoff 07d

In Abbildung 6-64 bis Abbildung 6-67 ist die Verteilung der Verfüllsuspension nach Versuchsende dargestellt. Tabelle 6-19 und Tabelle 6-20 zeigen dabei Detailfotos der einzelnen Bereiche, die in den Abbildungen numerisch abgegrenzt sind. Hierbei zeigen die Versuche 1, 3 und 4 mehr oder weniger das gleiche Muster. Im Bereich 1 ist in diesen Versuchen keine Suspension eingedrungen, während im Bereich 2 der Porenraum zum Teil von der Suspension eingenommen wird. Hierbei ist jedoch keine feste Zementation der Sedimentpartikel aufgetreten. Im anschließenden Bereich 3 ist der Porenraum weitgehend von der Suspension verfüllt und die Sedimentpartikel sind fest miteinander zementiert. Im Bereich 4 liegt die erhärtete Suspensionssäule vor. Diese hatte in allen 4 Versuchen keine Fehlstellen oder andere Auffälligkeiten, die auf eine schlechte Verfüllqualität schließen ließe.

Tabelle 6-19: Detailfotos der Verfüllstoffverteilung in den Versuchen 1 und 2

Schicht	Split/07d	Kies/07d
6		
5		
4		
3		
2		

Schicht	Split/07d	Kies/07d
1		

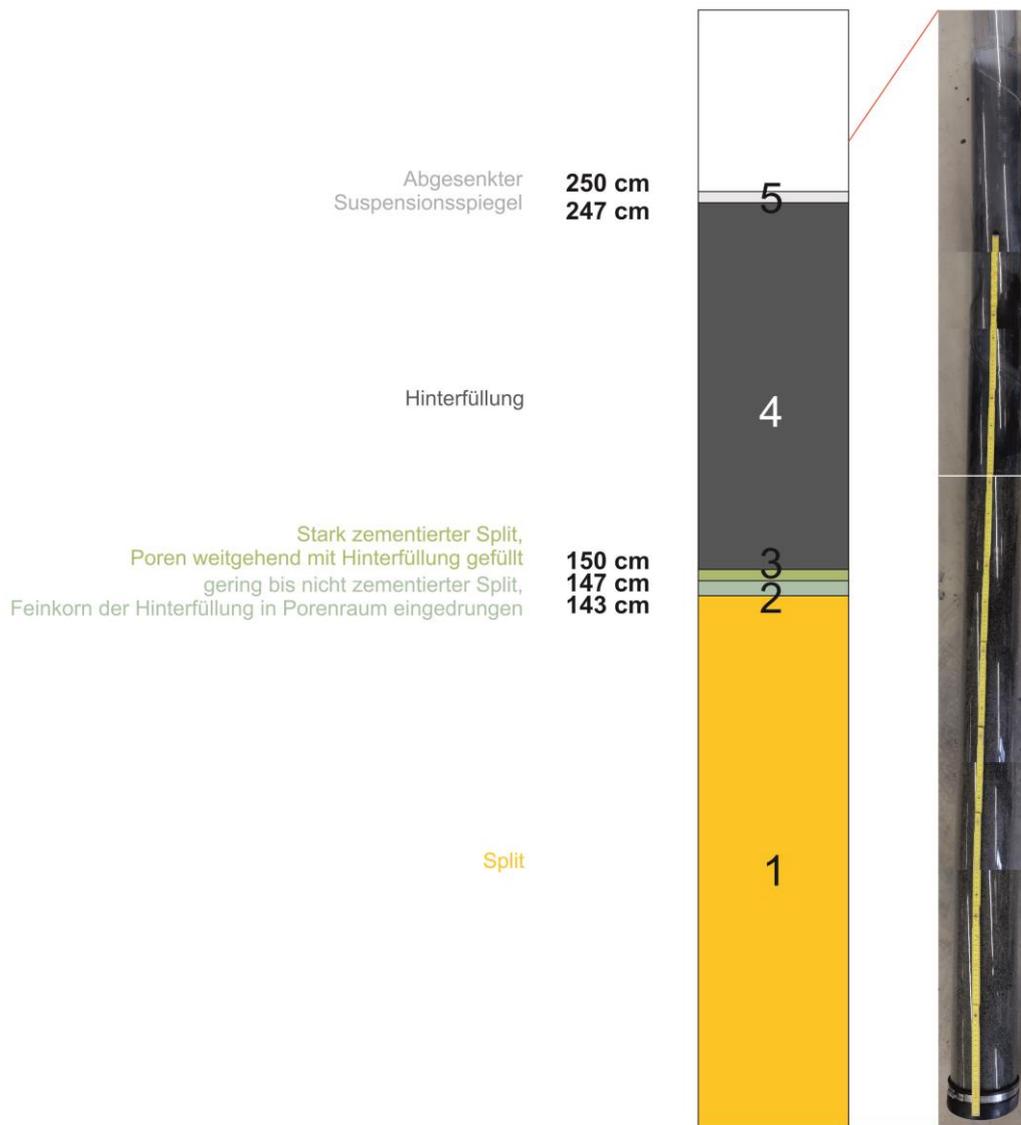


Abbildung 6-66: Verteilung des Verfüllbaustoffs im Versuch 3 mit Split und dem Verfüllbaustoff 13+d

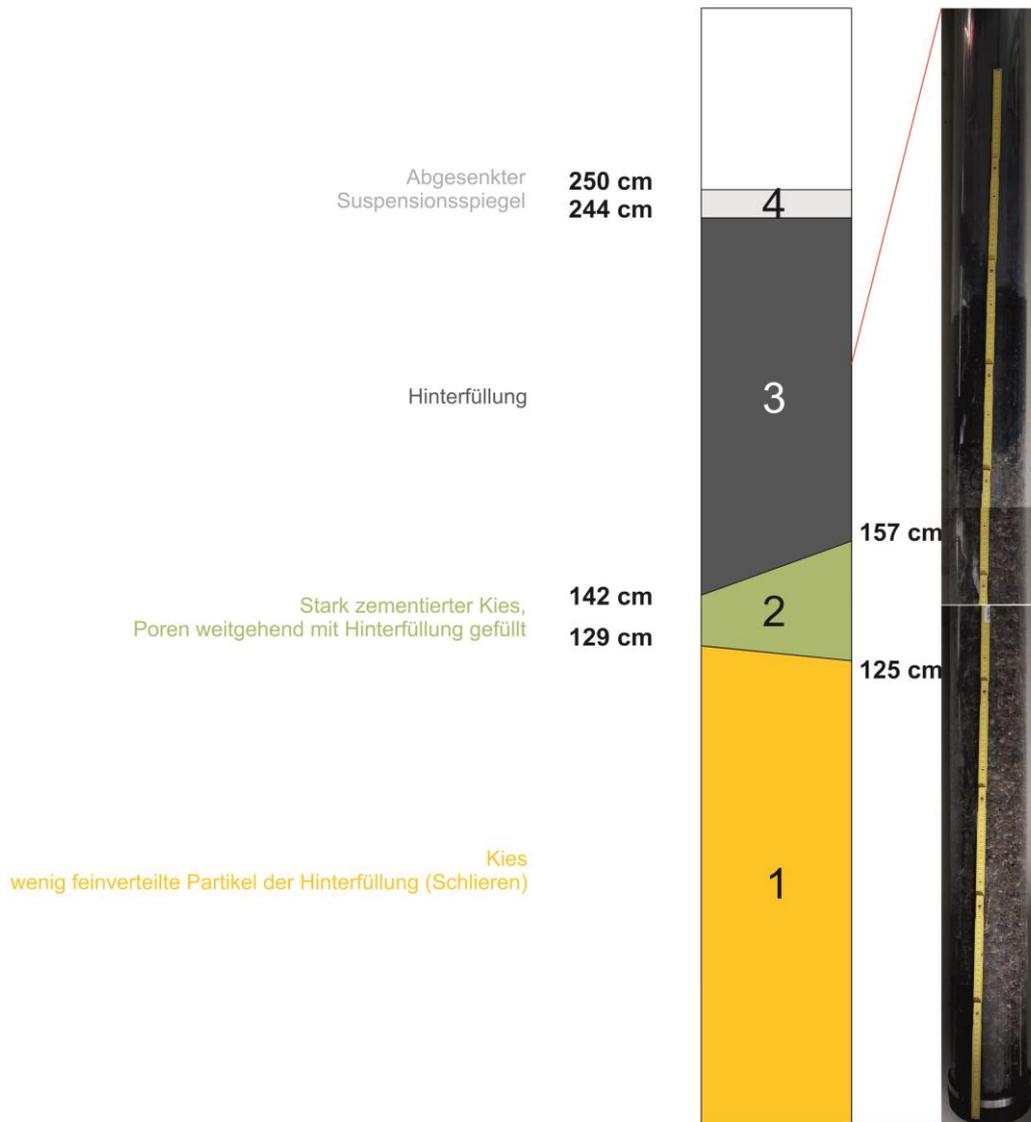
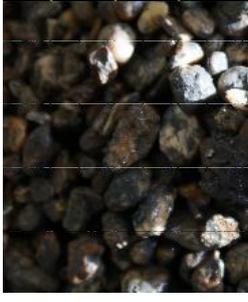


Abbildung 6-67: Verteilung des Verfüllbaustoffs im Versuch 4 mit Split und dem Verfüllbaustoff 13+d

Der Versuch 2 unterscheidet sich deutlich von den übrigen Versuchen. Der Grund hierfür liegt im ausgeprägten Penetrationsverhalten des Baustoffes 07d in den Mittelkies sowie am Versuchsaufbau selbst. Bei diesem Versuch ist bereits mit dem Einbringen der Suspension in die Versuchssäule der Baustoff weit in den Kies penetriert. Innerhalb der ersten Minute war bereits der gesamte Kies mit der Suspension durchsetzt. Aufgrund des reduzierten Querschnitts des Ablaufs (Innendurchmesser 10 mm) konnte das Porenwasser während des Penetrationsprozesses nicht schnell genug abgeführt werden, so dass es Bereiche innerhalb des Kiesel gab, in dem das Porenwasser nicht vollständig ausgetrieben werden konnte und sich Bereiche bildeten, in denen der Porenraum nicht vollständig zementiert wurde. Diese Erscheinung sollte bei einer realen EWS

nicht auftreten - eine homogene Porenverteilung vorausgesetzt - da hier das Wasser radialsymmetrisch von der Erdwärmesonde abtransportiert werden kann. Dieser Versuch hat auch gezeigt, dass bei Sedimenten mit sehr großen Porenöffnungsweiten eine mehrere Meter lange Versuchsanordnung notwendig ist, um die tatsächliche Penetrationsendringtiefe zu ermitteln.

Tabelle 6-20: Detailfotos der Verfüllstoffverteilung in den Versuchen 3 und 4

Sc hic ht	Kies/13+d	Kies/13+d	Split/13+d	Split/13+d
4/3				
2/3				
1				

6.5. Einfluss der Bohrlochtopographie und von Grundwasserbewegungen auf die Verfüllqualität

Zur Beurteilung des Einflusses der Bohrlochtopographie/-geometrie und von Grundwasserbewegungen bzw. -strömungen auf die Verfüllqualität wurden großmaßstäblicher Laboruntersuchungen mittels Bohrlochsimulator durchgeführt. Als Bewertungskriterium sollte die Systemdichtigkeit und die Fehlstellenrate dienen.

6.5.1. Erweiterung des Bohrlochsimulators

Im ersten Schritt wurde der am IMB/MPA vorhandene Bohrlochsimulator um Bauelemente zur späteren Durchführung von abschnittswisen Systemdichtigkeitsprüfungen erweitert. Abbildung 6-68 zeigt schematisch die geplante Erweiterung des Bohrlochsimulators. Im Einzelnen wurden die dort sichtbaren, ringförmigen Bauteile zunächst geplant und gefertigt, Pumpen beschafft, die auch bei sehr geringen Fördermengen und gleichzeitiger Partikelbeaufschlagung einen definierten Grundwasserstrom gewährleisten sollten sowie zwei Segmente der lastabtragenden Schalung und entsprechendes künstliches Formationsgestein neu beschafft bzw. gefertigt. Nachfolgend werden die Arbeiten im näher beschrieben.

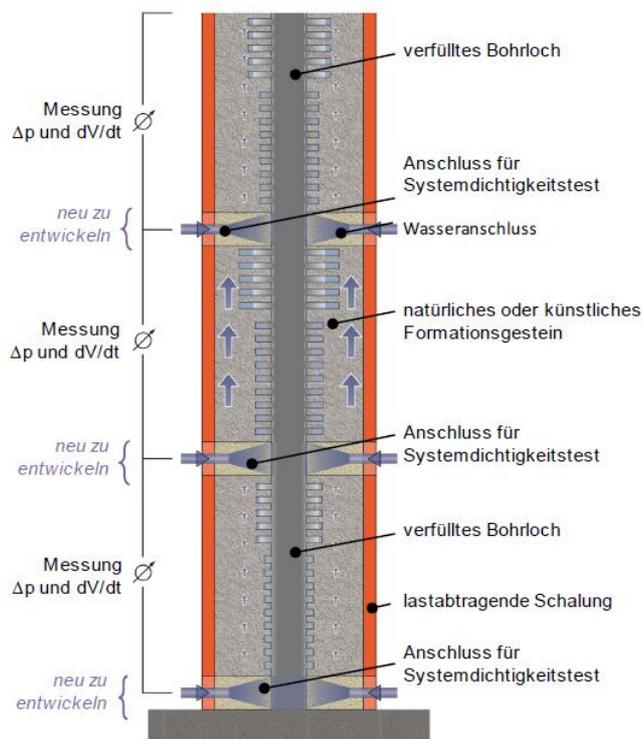


Abbildung 6-68: Schematische Darstellung der geplanten Weiterentwicklung des Bohrlochsimulators inklusive einer Grundwasserströmung

Ausgangslage Bohrlochsimulators:

Im Rahmen eines vorangegangenen Forschungsprojektes am IMB/MPA wurde ein Bohrlochsimulator entwickelt, der eine Untersuchung der Mechanismen der Fehlstellenbildung infolge der

Verfüllung von Bohrungen mit einem Verfüllbaustoff ermöglicht. Bei der Entwicklung des Bohrlochsimulators wurde auf drei wesentliche Punkte geachtet:

- Die Querschnittsabmessungen des Bohrlochs sollten den Dimensionen aus der Praxis entsprechen, weshalb eine maximale Bauhöhe in Verfüllrichtung von bis zu 12 m gewählt wurde.
- Aufgrund des maßgebenden Einflusses der Bohrlochrauheit und der Oberflächentopographie auf die fehlerstellenfreie Verfüllung des Bohrlochs, war es notwendig diese für einzelne Versuche konstant zu halten. So konnten die Wechselwirkung der Verfüllbaustoffe mit dem Bohrloch reproduzierbar untersucht werden.
- Nach Abschluss der Verfüllung sollte es zudem möglich sein, den Bohrlochsimulator so auseinanderzubauen zu können, dass der erhärtete Verfüllkörper möglichst unbeschädigt entnommen werden kann. So konnte die Fehlerstellenrate direkt (und nicht mittels indirekter Messverfahren) untersucht werden.

Aus diesen Punkten resultieren wichtige Randbedingungen, die in die finale Bemessung und Konzeption des Bohrlochsimulators eingegangen sind. Der entwickelte Bohrlochsimulator ist beispielhaft in Abbildung 6-69 dargestellt.

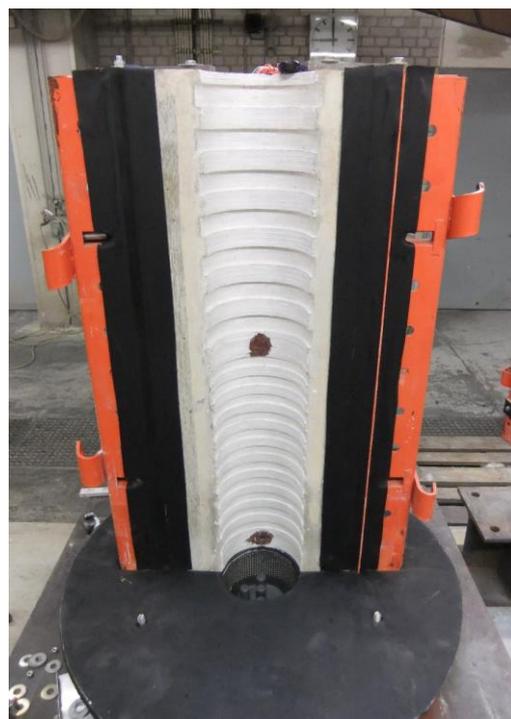


Abbildung 6-69: Bohrlochsimulator am IMB/MPA; links, Aufbau des Bohrlochsimulators während eines Versuchs im Rahmen von EWS-Tech II; rechts, Ansicht einer Halbschale mit Profilierung der Bohrlochwandung

Der Bohrlochsimulator besteht aus halbkreisförmigen Halbschalenelementen, die mit einem ringförmig ausgebildeten, künstlichen Formationsgestein aus Beton bestückt sind. Jeweils zwei der

Halbschalenelemente wurden zu einem zylindrischen Element mit einer Bauhöhe von 1,2 m zusammgebaut und bilden somit ein Bohrloch mit darum liegendem Formationsgestein. Die Innenseiten des künstlichen Formationsgesteins weisen rillenartige Vertiefungen auf, die die Rauheit und die Oberflächentopographie der Bohrlochwandung nachstellen.

Das Relief des Formationsgesteins zur Nachbildung der Bohrlochwandung wurde auf Grundlage vorhandener, realer Bohrlochprofile in Tonsteinen entwickelt. Die Nachbildungen der Bohrlochwandung decken die verschiedenen Verhältnisse aus Höhe zu Tiefe der Ausbrüche, Einbuchtungen und Vorsprünge realer Bohrlöcher ab. Das künstliche Formationsgestein wurden aus einem speziell für diesen Anwendungszweck entwickelten Beton hergestellt. Wie bereits erwähnt wurden die Halbschalen hierbei mit unterschiedlichen Profilen, also einem variierenden Höhe-zu-Durchmesser-Verhältnis (h/d) sowie verschiedenen Bohrlochradien (r_{Bg} bzw. r_{Bk}) der Bohrlochwandung gefertigt. Insgesamt sind acht unterschiedliche Geometrien der Betonhalbschalen vorhanden, wobei das h/d -Verhältnis jeweils zwischen 1,0 und 6,0 liegt. In Abbildung 6-70 ist die Ausbildung der Bohrlochtopographie einer Betonhalbschale schematisch dargestellt.

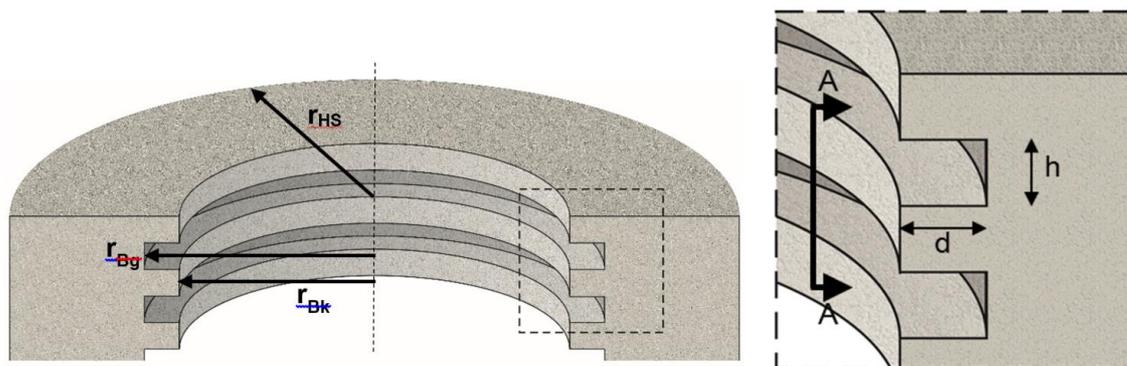


Abbildung 6-70: Schematische Darstellung der Bohrlochtopographie der künstlichen Formationsgesteins aus Beton

Entwicklung und Fertigung der Bauteile zur Nachbildung einer Grundwasserströmung:

Im Rahmen des Projekts wurde der Bohrlochsimulator um Bauelemente zur späteren Durchführung abschnittsweiser Systemdichtigkeitsprüfungen erweitert. Hierfür wurden spezielle Bauelemente entwickelt, konstruiert und hergestellt, die in den vorhandenen Bohrlochsimulator passen und die geforderte Grundwasserströmung (insbesondere das geforderte Nennvolumen sowie den Durchfluss) nachbilden können.

Die endgültige Ausführung des Grundwasserleiters wurde mit Hilfe mehrerer Konstruktionsentwürfe und Vorversuche optimiert. In Abbildung 6-71 sind die Designskizzen der Grundwasserleiter in der Aufsicht und im Querschnitt dargestellt.

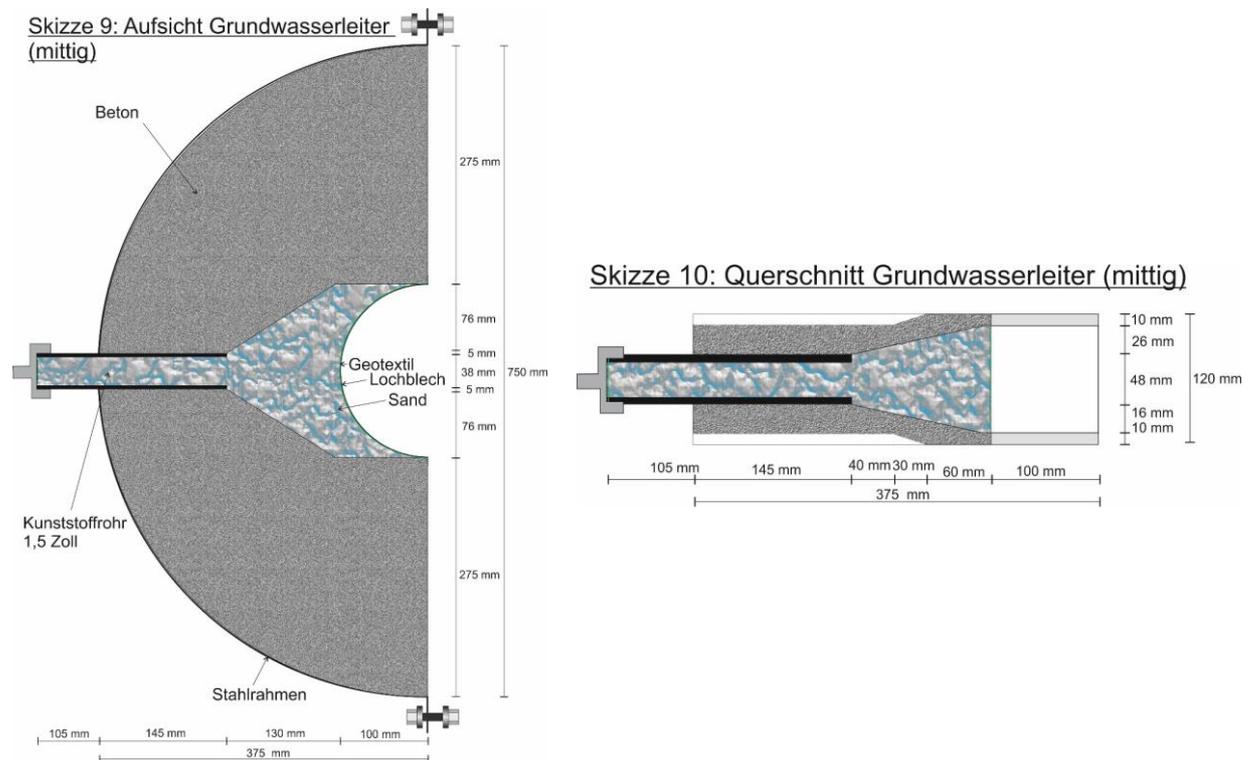


Abbildung 6-71: Skizzen der entwickelten Bauteile zur Nachbildung einer Grundwasserströmung in der Aufsicht (links) und im Querschnitt (rechts)

Die halbkreisförmigen Grundwasserleiter bestehen aus einem Stahlrahmen der mit Beton aufgefüllt wurde. Für den Wassereinlass wurde eine spezielle Konstruktion entwickelt, bestehend aus einem Kunststoffrohr und einem mit Beton ausgebildeten Bereich, der sich auf den Verfüllkörper zulaufend weitet. In das Kunststoffrohr wurde ein Gewinde gefräst, um den Anschluss an die Wasserleitung zu ermöglichen.

Der Rückfluss des Verfüllbaustoffs aus dem Verfüllraum in den Grundwasserleiter wurde mit Hilfe eines aus einem Lochblech, Sand/Kieses und einem Geotextil hergestellten „Filter“ verhindert. Hierbei lag ein besonderer Augenmerk auf der Auswahl des Lochbleches, des Sandes/Kieses und des Geotextils. Der Filter musste dicht genug sein, um den Rückfluss des Verfüllbaustoffs aus dem Verfüllraum zu vermeiden, jedoch auch durchlässig genug um die gewünschte Grundwasserströmung im Verfüllraum einstellen zu können.

Hierfür wurden diverse Vorversuche durchgeführt, wobei sowohl das gewählte Geotextil, wie auch der einzusetzende Sand bzw. Kies variiert wurde. Hierzu ein Trichter an einem Gestell befestigt und am Auslauf des Trichters das Geotextil. Zusätzlich dazu wurde der Trichter mit Sand bzw. Kies aufgefüllt und schließlich, unter Zugabe von Wasser, der Durchfluss am Auslauf bestimmt. Ein beispielhafter Versuchsaufbau ist in Abbildung 6-72 dargestellt. Aus den Ergebnissen der Vorversuche wurde schlussendlich ein feiner Kies gewählt, der sowohl erosionsstabil war wie auch den notwendigen Durchfluss ermöglichte.



Abbildung 6-72: Vorversuch zur Bestimmung des Durchflusses einer Kombination aus Geotextil und Sand bzw. Kies

Für die Auswahl des Betons der Grundwasserleiter wurde die im Bohrlochsimulator auf die Grundwasserleiter wirkende Auflast (Abbildung 6-69) bestimmt und bei der Auswahl der Druckfestigkeit des Betons berücksichtigt. In Abbildung 6-73 sind die Elemente der Schalung, sowie das Kunststoffrohr vor der Betonage des Grundwasserleiters sowie des Gegenstückes dargestellt.



Abbildung 6-73: Schalung, Stahlblech und Kunststoffrohr des Grundwasserleiters vor der Herstellung bzw. vor der Verfüllung mit Beton

Insgesamt wurden sechs Grundwasserleiter (mit Einlassrohr) sowie sechs Gegenstücke (ohne Einlassrohr) hergestellt. Diese Anzahl wurde auf Grundlage der geplanten Wasserführung festgelegt. Die Grundidee war, die drei Türme mit einem, zwei beziehungsweise drei Grundwasserleitern in unterschiedlichen Höhen auszustatten.

Entwicklung und Fertigung der neuen Segmente der lastabtragenden Schalung:

Aus dem bereits erwähnten vorangegangenen Projekt am IMB/MPA waren acht Halbschalenelemente unterschiedlicher Geometrie vorhanden. Da im Rahmen von EWS-Tech II alle drei Türme gleich hoch ausgeführt wurden, war es nötig weitere zwei Halbschalenelemente herzustellen. Hierzu wurde eine Bodenplatte mit Bohrungen vorbereitet, wodurch anschließend zwei Gewindestangen geführt und befestigt werden konnten. Abbildung 6-74 zeigt den Aufbau der Bodenplatte mit Gewindestangen.

Im Anschluss daran wurden auf die Gewindestangen vorgebohrte Kunststoffscheiben aufgebracht, die die geplanten Vertiefungen der künstlichen Gesteinsformation nachbilden. Die Elemente wurden mit einem Trennmittel eingeölt, um eine sichere Trennung der Elemente ohne Beschädigung der Halbschalen beim Ausschalen zu gewährleisten. Die SRS-Schalung wurde positioniert und die Fuge zwischen Bodenplatte und Schalung verschlossen (Abbildung 6-75). Anschließend wurde das Halbschalenelement mit einer Schallhaut verschlossen, abgedichtet und mittels Schraubzwingen zusätzlich an der Grundplatte befestigt. In Abbildung 6-76 ist die fertig präparierte Schalung in der Drauf- und Ansicht dargestellt.



Abbildung 6-74: Bodenplatte inklusive zweier Gewindestangen zur Positionierung der Scheiben zur Nachbildung des künstlichen Formationsgesteins



Abbildung 6-75: SRS Schalung mit fertiggestellter Schalung der Gesteinsformation mittels Kunststoffscheiben



Abbildung 6-76: Fertiggestellte Schalung inklusive Kunststoffscheiben zur Formgebung des künstlichen Gesteins, sowie Schallhauetelementen; Draufsicht (links) und Ansicht (rechts)

Die fertiggestellten Schalungen für die Halbschalenelemente wurden anschließend mit Beton ausgefüllt. Hierfür kam die im vorangegangenen Projekt speziell entwickelte Betonmischung zum Einsatz, die sowohl eine hohe Frühfestigkeit, als auch eine ausreichende Fließfähigkeit zur Ausfüllung und Nachbildung der Gesteinsformation aufweist. In Tabelle 6-21 ist der Mischungsentwurf für 1 m³ Beton dargestellt.

Tabelle 6-21: Mischungsentwurf für die Herstellung von 1 m³ Beton für die Halbschalenelemente

Ausgangsstoff	Einwaage
Zement CEM I 32,5 R	320 kg
Flugasche	240 kg
Sand 0/2 mm	630 kg
Kies 2/8 mm	910 kg
Fließmittel	5 kg
Zugabewasser	185 kg

Zur Herstellung eines Halbschalenelementes wurden ca. 150 l Beton benötigt. Zum Mischen wurde der beim IMB/MPA vorhandene Planeten-Betonmischer Teka 375 verwendet, da dieser eine ausreichende Kapazität besitzt. Der Beton wurde insgesamt 12 min gemischt, wobei nach 6 min den trockenen Ausgangsstoffen das Wasser und das Fließmittel hinzugegeben wurde. Im Anschluss an die Durchführung der Versuche zur Sicherstellung der gewünschten Frischbetoneigenschaften, wurden die Halbschalenelemente gefüllt. Die Verfüllung des Betons erfolgte in zwei Lagen, wobei jede Lage 90 Sekunden mit einem Innenrüttler verdichtet wurde. Hierbei wurde insbesondere auf die Verzahnung der zwei Schichten geachtet. Im Anschluss daran wurde eine weitere Schalttafel an dem oberen Ende des Halbschalelements mit Gewindestangen befestigt. Um eine gute Selbstentlüftung des Betons zu ermöglichen, wurde das Halbschalenelement nun mit Hilfe eines Portalkrans um 90° versetzt und somit waagrecht positioniert. Hierdurch konnte vermieden werden, dass sich Luftporen im Bereich der geplanten Vertiefungen bilden. Abbildung 6-77 zeigt die Umlagerung des Halbschalenelementes nach der Verfüllung.



Abbildung 6-77: Halbschalenelement nach der Verfüllung, während der Drehung (links) und bei der Lagerung zur Aushärtung (rechts)

Nach 24 h wurde das Halbschalenelement erneut aufgerichtet und die Schalung auf der Seite der Grundplatte entfernt (Abbildung 6-78, links). Hierbei muss besonders sorgfältig gearbeitet werden, um eine Beschädigung der Betonhalbschale zu vermeiden. An den freigelegten Flanschen

der SRS-Schalung wurden nun insgesamt vier Halteplatten angebracht, um ein Herausfallen der Betonhalbschale aus der SRS-Schalung zu vermeiden (Abbildung 6-78, rechts).



Abbildung 6-78: Ausschalung des Halbschalenelementes (links), Anbringung der Halteplatten (rechts)

Im Anschluss war es notwendig die Kunststoffscheiben sorgfältig zu entfernen (Abbildung 6-79). Die Scheiben wurden einzeln gelöst, damit ein Herausbrechen des Betons verhindert wurde.



Abbildung 6-79: Entfernung der Kunststoffscheiben zur Formgebung der Gesteinsformation aus dem Halbschalenelement

Zuletzt wurde das fertig ausgeschaltete Halbschalenelement erneut waagrecht positioniert und mit feuchter Jute und Folie für weitere 6 Tage abgedeckt gelagert, um eine Nacherhärtung des Betons zu ermöglichen. Die Jute wurde dazu während dieses Zeitraumes regelmäßig befeuchtet, mit dem Zweck eine Austrocknung des Betons zu vermeiden.

Waren im Anschluss noch Fehlstellen in den Vertiefungen vorhanden, wurden diese entsprechend nachgebessert. Grobe Fehlstellen wurden mit der Original-Betonrezeptur (Tabelle 6-21)

nachgebessert. Feine Fehlstellen wurden hingegen mit einer Zement-Wassermischung ($w/z = 0,4$) ausgebessert.

6.5.2. Einstellung der Wasserführung für die Grundwasserströmung

Zur Einstellung der geforderten Grundwasserströmung war es notwendig die Wasserführung der Türme sorgfältig zu planen. Wie in Abbildung 6-68 schematisch dargestellt wird und bereits erläutert wurde, wurde die drei Türme mit ein, zwei beziehungsweise drei Grundwasserleitern ausgestattet. Hierfür wurde, unter Berücksichtigung der vorhandenen Gegebenheiten, ein Wasserführungsplan entwickelt, mit dem die Grundwasserströmung zielsicher und reproduzierbar bei den Versuchen am Bohrlochsimulator eingestellt werden konnte.

Erste Überlegungen sahen hierbei vor, jedem der drei Bohrlochsimulatoren einen eigenständigen Wassertank zuzuordnen, mit Hilfe dessen über einen geodätischen Höhenunterschied Δh der entsprechende Wasserdruck aufgebracht werden kann. Abbildung 6-80 zeigt den ersten Entwurf der möglichen Wasserführung sowie den Einbau der Grundwasserleiter in die Bohrlochsimulatoren.

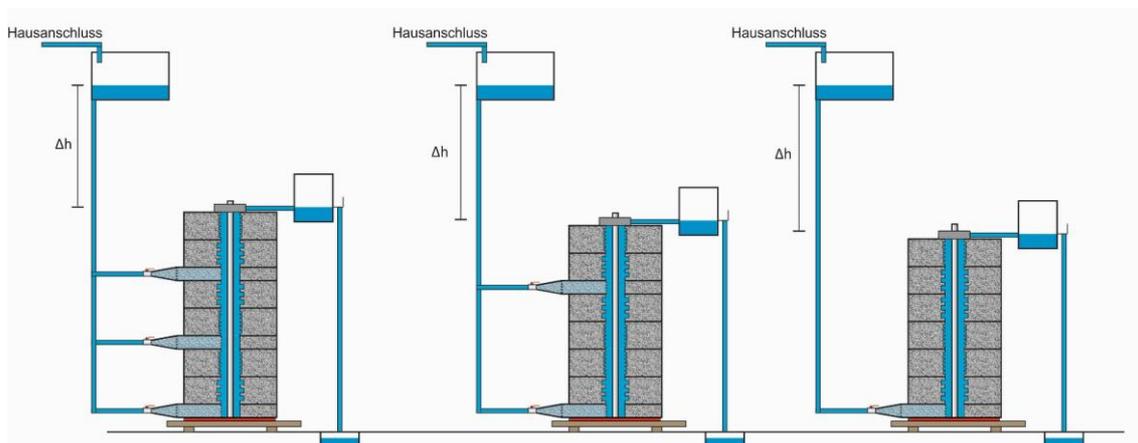


Abbildung 6-80: Erster Entwurf der Wasserführung, sowie Einstellung der Grundwasserleiter in den Bohrlochsimulatoren.

Aufgrund der hohen Kosten im Zuge der Vorhaltung der Wassertanks sowie des erhöhten Platzbedarfes wurden weitere Lösungen in Erwägung gezogen. Die finale Entscheidung fiel nicht auf die Lösung mit Wassertanks. Stattdessen wurde ein Druckminderer für den Hausanschluss angeschafft, mit dem der anstehende Druck gezielt reguliert werden konnte (Abbildung 6-81).

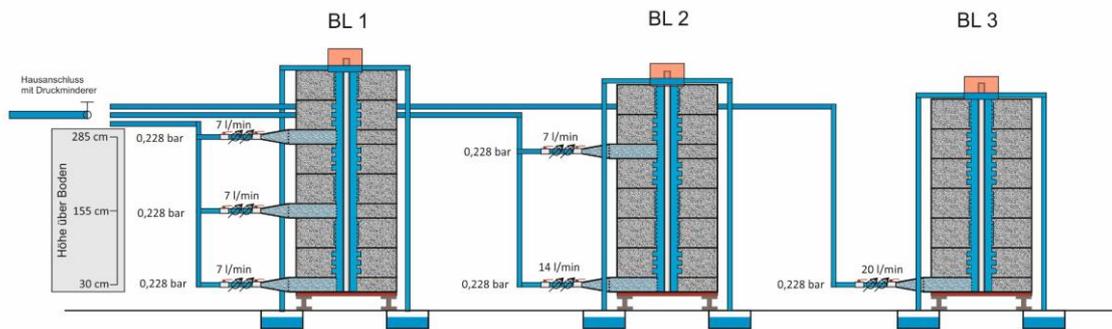


Abbildung 6-81: Endgültiger Plan der Wasserführung mit der Position der Grundwasserleiter in den Bohrlöchern sowie dem eingestellten Grundwasserstrom

Jeder der Türme wurde zudem mit einer Stahldeckplatte mit Überlauf versehen über die das abfließende Wasser zur Entsorgung abgeführt werden konnte. Die Stahldeckplatten sind in Abbildung 6-82 dargestellt.

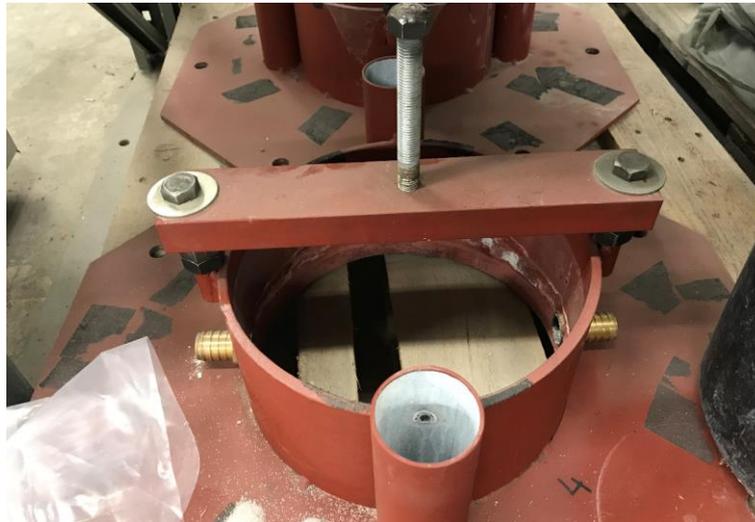


Abbildung 6-82: Stahldeckplatten der Bohrlochsimulatoren mit seitlichen Abflüssen für das abfließende Wasser aus der nachgebildeten Grundwasserströmung

Zum Einstellen einer Grundwasserströmung von 20 l/min wurden zudem die Einstellungen für die Bohrlöcher 1, 2 und 3 erprobt und festgelegt (Abbildung 6-81). Bei Bohrlöcher 1 wurden drei Grundwasserleiter bei 30 cm, 155 cm und 285 cm über dem Boden aufgebaut. Die Wasserzufuhr wurde auf ca. 7 l/min pro Grundwasserleiter eingestellt. Für Bohrlöcher 2 wurde auf den mittleren Grundwasserleiter (bei 155 cm Höhe über Boden) verzichtet, dafür aber der Durchfluss des Grundwasserleiters auf 30 cm Höhe über dem Boden auf 14 l/min verdoppelt. Bohrlöcher 3 hatte lediglich einen Grundwasserleiter bei 30 cm Höhe über dem Boden, durch welchen die kompletten 20 l/min hindurchfließen mussten. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde sowohl mit Messuhren an den jeweiligen Grundwasserleitern kontrolliert als auch beim abfließenden Wasser gemessen.

6.5.3. Verfüllversuche mit dem Bohrlochsimulator

Zielsetzung

Im Arbeitspaket B2.3 waren insgesamt vier Versuche (im Folgenden „Kampagnen“) mit dem Bohrlochsimulator, unter Verwendung der in AP A3 entwickelten, dotierten EWS-Verfüllbaustoffe, enthalten. Für jeden Versuch wurden jeweils drei Bohrlochsimulatoren (im Folgenden „Türme“) mit jeweils unterschiedlichen aber definierten Bohrlochinnenoberflächen aufgebaut. Zudem waren, die jeweiligen Türme mit ein, zwei oder drei Grundwasserleitern versehen. Diese sollten einen definierten Grundwasserstrom von 20 l/min gewährleisten. Die Versuche wurden alle bei 20 °C durchgeführt. Zudem sollten bei der Verfüllung der Bohrlöcher verschiedene Messungen durchgeführt werden, um den Zementationsverlauf nachvollziehen zu können. Der Verfüllbaustoff wurde zudem begleitend zur Verfüllung baustofftechnologisch charakterisiert und überprüft. Nach der Erhärtung des Verfüllbaustoffs soll die Dichtigkeit des Systems durch das Anlegen eines Druckgradienten überprüft werden. Durch das anschließende Zerlegen der Segmente des erhärteten Verfüllbaustoffs wurde die Bildung von Fehlstellen quantifiziert und mit den Ergebnissen der zerstörungsfreien Methoden verglichen.

Planung der Verfüllversuche

Insgesamt waren vier Kampagnen geplant, wobei jede Kampagne mit einer der in AP B3 entwickelten Mischungen durchgeführt werden sollte. Die vier Verfüllbaustoffe sind in Tabelle 6-22 dargestellt. In Tabelle 6-23 ist die Zuordnung der Kampagnen und der Mischungsnummer angegeben.

Tabelle 6-22: Eigenschaften und Rezeptur der entwickelten vier Mischungen der Verfüllbaustoffe

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

Tabelle 6-23: Zuordnung der Kampagnen zu den jeweils gewählten Mischungen und den gewünschten rheologischen Eigenschaften

Kampagne	Mischung	Rheologische Eigenschaften
Kampagne I	M1	Hohe Fließgrenze
Kampagne II	M3	Hohe Thixotropie
Kampagne III	M2	Niedrige Fließgrenze Hohe Entmischung
Kampagne IV	M4	Niedrige Fließgrenze Niedrige Entmischung Geringe Thixotropie

Bei jeder Kampagne war derselbe Aufbau der Halbschalenelemente geplant, um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse der unterschiedlichen Mischungen zu gewährleisten. In Abbildung 6-83 ist der Aufbau der drei Bohrlöcher mit den dazugehörigen Halbschalenelementnummern, sowie der Anordnung der Grundwasserleiter gegeben. Dieser Aufbau wurde bei allen vier Messkampagnen beibehalten.

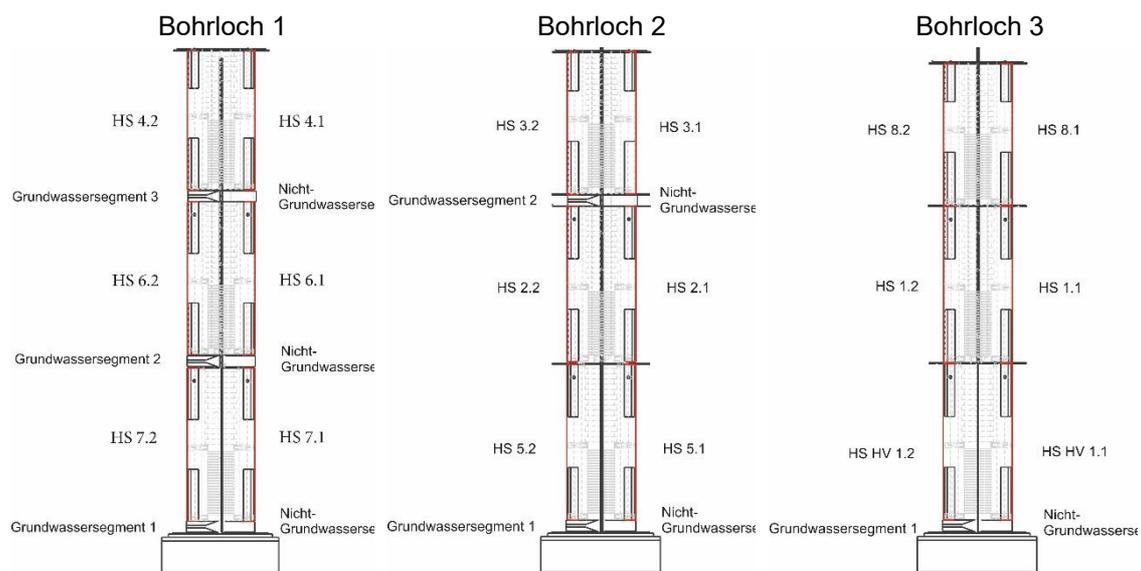


Abbildung 6-83: Darstellung des Aufbaus der drei Bohrlöcher mit den dazugehörigen Halbschalenelementnummer sowie der Anordnung der Grundwasserleiter

Aufbau der Bohrlöchersimulatoren

Der Aufbau der Bohrlöchersimulatoren wurde im Rahmen mehrerer Vorversuche getestet. Hierbei wurden diverse Dichtungsbänder und Kautschukmatten sowie deren Anbringung und Verteilung erprobt, um eine optimale Abdichtung der Türme gewährleisten zu können. Zudem wurden mehrere Durchläufe mit Wasserführung an den realen Halbschalen und Grundwasserleitern durchgeführt, um die gewonnenen Erkenntnisse zu überprüfen. Im Nachfolgenden ist lediglich der endgültige Aufbau der Bohrlöchersimulatoren für die Kampagnen dargestellt.

Zum Aufbau der Bohrlochsimulatoren mussten zuerst die entsprechenden Stahlprofile gerichtet werden und die zum Aufbau erforderlichen Stahlplatten positioniert und verschweißt werden. Im unteren Bereich wurde anschließend die Halterung der Sonden platziert. Auf der Bodenplatte wurden Dichtungsbahnen aufgebracht und die entsprechenden Fugen mit Silikon abgedichtet. Abbildung 6-84 zeigt die Anordnung der Dichtungen auf der Bodenplatte.



Abbildung 6-84: Anordnung der Dichtungen auf der Bodenplatte aus Stahl

Das nicht durchlässige Grundwasserelement (kurz NGWS) wurde anschließend auf die Bodenplatte aufgebracht und mit vertikalen Dichtungsbahnen versehen. Das Grundwasserelement (kurz GWS) wurde zunächst mit Hilfe einer Traverse transportiert (um ein Versagen des Grundwasserleiters infolge des Transports zu vermeiden) und der Filter mit Kies ausgefüllt und mit Geotextil und einer Lochplatte ausgekleidet. Anschließend wurde der GWS auf der Bodenplatte platziert und an das NGWS angelegt. Hierbei war insbesondere auf die Anordnung der vertikalen Dichtungsbahnen zu achten, um eine erfolgreiche Abdichtung zu gewährleisten. Anschließend wurde ein Spannungsgurt um beide Elemente gelegt um den Radialdruck zu erhöhen und eine Wasserläufigkeit zu verhindern.



Abbildung 6-85: Positionierung des GWS und NGWS auf der Bodenplatte eines Bohrloches inklusive Ausbildung des Filters sowie der Anbringung des Spanngurtes. Zudem sind die Bohrungen zur Durchführung von Gewindestangen zu sehen.

Anschließend wurde das erste/untere Halbschalenpaar aufgebracht. Hierzu wurden Gewindestangen durch die Bodenplatte und die GWS bzw. NGWS durchgefädelt und mit Kanthölzern unterhalb der Bodenplatte aufgestockt. Die Halbschalen wurden anschließend mit dem Portalkran auf die Betonage-Plattform gebracht und vorbereitet. Hierfür wurde an jeder Halbschale die vertikale Schweißnaht mittels Silikon verfugt und vertikale Dichtungsbahnen auf den Stoßflächen angebracht. Die Dichtungsbahnen wurden sowohl über die Schweißnaht sowie am Rand der Schalung aufgebracht. Zudem war die zuvor im Bohrlochprofil aufgebrachte Wachsschicht auf Fehlstellen und Beschädigungen zu kontrollieren und bei Bedarf nachzubessern. In Abbildung 6-86 sind die Anordnung der vertikalen Dichtungsbahnen sowie die Wachsschicht auf dem Halbschalenelement zu erkennen.



Abbildung 6-86: Anordnung der vertikalen Dichtungsbahnen an einem Halbschalenelement

Beide Halbschalenelemente wurden nun zusammengeführt und mittels einer integrierten Spannvorrichtung aneinander gezogen und fixiert. Im Anschluss daran erfolgte das Anheben der Halbschale mit Hilfe des Portalkrans sowie das Anbringen der horizontalen Dichtungsbahnen unterhalb der Halbschale. Die Positionierung der Dichtungsbahnen unterhalb der Halbschalen ist in Abbildung 6-87 dargestellt.



Abbildung 6-87: Horizontale Dichtungsbänder unterhalb der Halbschale bei Anhebung der Halbschalen durch das Portalkran

Nun wurde die Halbschale auf den GWS bzw. NGWS positioniert, wobei darauf zu achten war, dass die Positionen der Gewindestangen mit den Öffnungen in den Halbschalen übereinstimmen. In Abbildung 6-88 ist die Positionierung der aufgesetzten Halbschale inklusiver der Gewindestangen zur Fixierung zu erkennen.



Abbildung 6-88: Aufgesetzte Halbschalen auf GWS bzw. NGWS inklusive der Gewindestangen zur Fixierung der Elemente

Die Halbschalen wurden anschließend mit Hilfe der Gewindestangen befestigt und angezogen, um eine sichere Haltung der Türme zu gewährleisten. Hierbei wurde mittels eines Drehmomentschlüssels eine definierte Kraufbringung sichergestellt. Alle weiteren offenen Fugen (z. B. zwischen Halbschalenelement und Grundwasserleiter) wurden zusätzlich mit Silikon abgedichtet. Eine Nahaufnahme der Anordnung der Gewindestangen, sowie der zusätzlichen Silikonabdichtung ist in Abbildung 6-89 dargestellt.



Abbildung 6-89: Detailaufnahme der Anordnung der Gewindestangen und der Spannglieder, sowie der zusätzlichen Silikonabdichtungen im Bereich der Bodenplatte

Je nach Bohrlochaufbau (Abbildung 6-83) wurde nun das zweite Grundwasserelement aufgebracht. Hierfür wurde vorerst die Oberseite der bereits positionierten Halbschale mit mehreren Ringen aus Dichtungsband beklebt. In Abbildung 6-90 ist die Anordnung der Dichtungsbänder auf der Halbschale dargestellt. Im Anschluss daran wurde eine vorgebohrte Kautschukmatte aufgebracht, um eine weitere Abdichtung der Elemente sowie eine bessere bzw. gleichmäßigere Lastverteilung auf die Grundwasserleiter zu ermöglichen



Abbildung 6-90: Anordnung der Dichtungsbänder auf der Oberseite einer Halbschale

Der zweite GWS bzw. NGWS wurde, wie zuvor beschrieben, mit Dichtungsband versehen und auf der Kautschukmatte platziert. Anschließend wurde das Grundwasserelement mittels Gewindestangen und Spannvorrichtungen fixiert. In Abbildung 6-91 ist die endgültige Positionierung des zweiten Grundwasserelementes auf dem ersten Bohrlochelement dargestellt. Hierbei ist der Überstand der Kautschukmatte noch zu erkennen, der anschließend abgetrennt wurde.

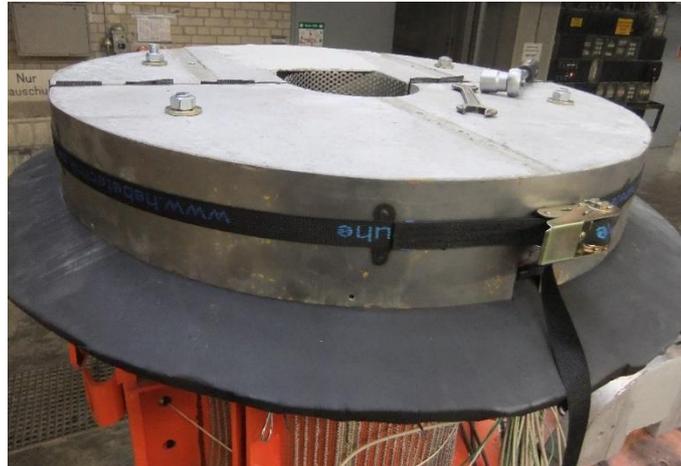


Abbildung 6-91: Endgültige Positionierung des zweiten Grundwasserleiters auf dem ersten Halbschalenelement inklusive der Überstände der Kautschukmatte

Die zuvor beschriebenen Schritte wurden für alle Segmente der drei Bohrlöcher wiederholt bis die in Abbildung 6-83 dargestellte Anordnung erreicht war. Hierbei war durchgehend sowohl auf die richtige, paarweise An- und Zuordnung der jeweiligen Elemente zu achten, wie auch auf die ausgiebige Abdichtung mittels Dichtungsbändern und Silikon zu achten. In Abbildung 6-92 ist die Anordnung des zweiten Halbschalenelements auf dem ersten Grundwasserleiter des Bohrloches I dargestellt.



Abbildung 6-92: Aufbau der zweiten Halbschale auf dem ersten Grundwasserleiter des Bohrloches I

Abschließend wurde auf jedem Bohrlochkopf die in Abbildung 6-82 dargestellte Stahldeckplatte aufgebracht und mittels Dichtungsband und Silikonfugen abgedichtet. Um die Bohrlöcher wurde zudem ein Gerüst aufgebaut um die anfallenden Höhenarbeit bei gleichzeitigem Erreichen der Bohrlochoberkante sicher gewährleisten zu können.

Zur Nachbildung der Erdwärmesonden wurden zwei PVC-Rohrpaare in das Bohrloch eingebracht und in entsprechenden Abschnitten mit Metallösen fixiert. Jedes Rohrpaar war am Bohrlochfuß mittels eines U-Rohrs verbunden. Zudem wurde ein Verfüllrohr abgeteuf, welches eine Befüllung des Bohrloches am Bohrlochfuß ermöglicht. In Abbildung 6-100 sind die Rohre beim Abbau eines Verfüllversuchs an der Oberseite des Bohrloches dargestellt.

Vormischung des Verfüllbaustoffs

Zur zielsicheren Herstellung eines homogenen Verfüllbaustoffs war es erforderlich den Trockenbaustoff vor der Durchführung des Verfüllversuchs herzustellen. Hierbei wurden mehrere Möglichkeiten zur Mischung sowie Zwischenlagerung des trockenen Verfüllbaustoffs (Silo, Big-Bag, etc.) in Erwägung gezogen. Aus Kosten- und Zeitgründen wurde die Mischung vor Ort, sowie die Lagerung in Säcken bevorzugt. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes EWS-Tech II ein Pflugscharmischer der Fa. Lödige angeschafft mit dem die Chargenweise Herstellung des Verfüllbaustoffs gemäß Tabelle 6-22 möglich war. Der Pflugscharmischer war mit vier Schaufeln ausgestattet die eine Homogenisierung des Verfüllbaustoffs ermöglichen. Eine Ansicht des Pflugscharmischers sowie eine Detailaufnahme des Mischwerkzeuges sind in Abbildung 6-93 dargestellt.



Abbildung 6-93: Ansicht des Pflugscharmischer der Fa. Lödige (links), Detailaufnahme der Anordnung des Mischwerkzeuges im Chargen-Mischer (rechts)

Der Pflugscharmischer erlaubt hierbei das Mischen von ca. 60 l Trockenbaustoff auf einmal. Um eine ausreichende Homogenisierung der Ausgangsstoffe zu ermöglichen wurde aufgrund der einfacheren Handhabung des Quarzsandes ein Ansatz für 45,5 l Suspensionsvolumen des Verfüllbaustoffs gewählt. In Tabelle 6-24 sind die Einwaagen für jeweils eine Charge des Verfüllbaustoffs für die verschiedenen Mischungen dargestellt.

Tabelle 6-24 Einwaagen für eine Charge im Pflugscharmischer (entspricht 45,5l Suspension) in Abhängigkeit der Mischungszusammensetzung

Ausgangsstoffe	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
Material	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
Zement	9,74	9,74	9,74	9,74
Quarzmehl	8,1	8,1	8,1	8,1
Quarzsand	50,0	50,0	50,0	50,0
Magnetit	2,6	2,6	2,6	2,6
	[g]	[g]	[g]	[g]
Fließmittel	0,00	29,23	26,80	19,49
Stabilisierer	9,74	97,44	0,00	34,10

Aufgrund der Staubentwicklung beim Umfüllen der Ausgangsstoffe wurde der Pflugscharmischer auf der Versuchsfläche im Außenbereich des IMB/MPA aufgestellt. Zudem wurde durchgehend die Verwendung von Schutzbrille, Handschuhen und FFP2-Masken gefordert, da insbesondere der Quarzsand der Gefahrenstoffklasse H373 (Lungengängig) zuzuordnen ist. Zur Herstellung einer Charge wurden zunächst die Ausgangsstoffe Zement und Quarzmehl jeweils einzeln abgewogen und in Plastikwannen bereitgestellt. Das Magnetit, sowie das Fließmittel und der Stabilisierer wurden abgewogen und in Zip-Lock Tüten abgepackt. Anschließend wurden Zement und Quarzmehl in den Pflugscharmischer gegeben. Im Anschluss daran wurden zwei Säcke Quarzsand hinzugegeben, anschließend Magnetit, Fließmittel und Stabilisierer. Nach dem Verschließen des Mixers wurden die Ausgangsstoffe für 5 Minuten homogenisiert. Der Trockenbaustoff wurde dann in drei vorbeschriftete Säcke gefüllt und mittels Kabelbindern verschlossen. Pro Kampagne waren etwa 819 l Suspension vorzuhalten, weshalb insgesamt 18 Chargen pro Kampagne (3 Türme) hergestellt wurden. Dies entspricht einem Gesamtausgangsstoffverbrauch von ca. 1,3 t pro Kampagne. Trotz der erheblichen Menge an Ausgangsstoffen wurde diese Herstellungsvariante aus Kosten- und Zeitgründen bevorzugt. In Abbildung 6-94 ist ein Teil des vorgemischten Verfüllbaustoffs vor der Verwendung während einer Kampagne dargestellt.



Abbildung 6-94: Euro-Palette mit Säcken des vorgemischten Verfüllbaustoffs vor der Verwendung während einer Kampagne

Vorbereitung der Verfüllversuche

Nach dem Aufbau der drei Bohrlochsimulatoren sowie der Vormischung des Verfüllbaustoffs mussten noch einige vorbereitende Arbeiten vor der Durchführung der Verfüllversuche geleistet werden.

Zur Herstellung des Verfüllbaustoffs kam der Gertec Suspensionschargenmischer der AGW zum Einsatz. Dieser besteht aus einem Misch- und einem Vorhaltebehälter, die miteinander verbunden sind. Am Boden des Mischbehälters war ein schneckenförmiges Mischwerkzeug eingebaut, um die Suspension hochtourig zu durchmischen. Im Vorhaltebehälter war ein zylindrisches Umrührwerkzeug vorhanden, um ein Absetzen oder Ansteifen der hergestellten Mischung zu vermeiden. Abbildung 6-95 zeigt den verwendeten Suspensionschargenmischer in der Ansicht.



Abbildung 6-95: Ansicht des verwendeten Suspensionschargenmischers der Fa. Gertec inklusive Misch- und Vorhaltebehälter

Nach Bereitstellung und Anschluss des Gertec-Mischers im Betonierkeller des IMB/MPA wurde ein Schlauchsystem mit dem Mischer verbunden, über welches eine Befüllung der Bohrlochsimulatoren möglich sein soll. Hierbei wurde zudem ein Coriolis-Messgerät zwischengeschaltet um den Durchfluss des hergestellten Verfüllbaustoffs zu bestimmen. Zudem wurde eine Y-Schaltung eingebaut um eine Probenentnahme für Laboruntersuchungen sowie zum Anschluss an das Sondenrohr zu ermöglichen. Außerdem mussten alle Wasserleitungen sowie der Druckminderer verlegt werden, um die Wasserführung zur Nachbildung des Grundwasserstroms aufzubauen. In Abbildung 6-96 ist eine Übersicht der drei Bohrlochsimulatoren vor dem Beginn eines Verfüllversuchs dargestellt.

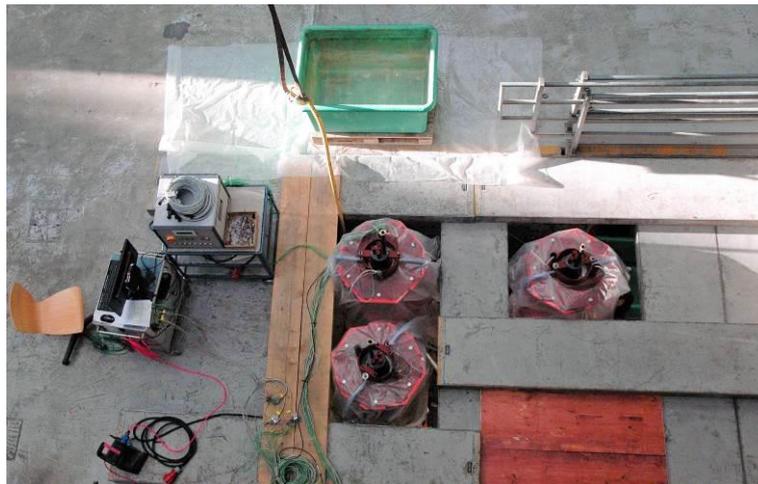


Abbildung 6-96: Übersicht der drei Bohrlochsimulatoren vor Beginn eines Verfüllversuchs im Rahmen einer Kampagne

Durchführung des Verfüllversuchs

Zu Beginn eines Verfüllversuchs wurden die Bohrlochsimulatoren über die Grundwasserleiter mit Wasser gefüllt. Anschließend wurde die gewünschte Grundwasserströmung von 20 l/min eingestellt, die über die Überlaufwassermenge, sowie über die Messuhren bei der Zufuhr kontrolliert wurde. Abbildung 6-97 zeigt exemplarisch den Aufbau der Wasserzufuhr inklusive der Messuhren zur Bestimmung des Wasserdurchflusses an den Grundwasserleitern.



Abbildung 6-97: Aufbau der Wasserzufuhr zu den Grundwasserleitern inklusive der Messuhren zur Kontrolle des Wasserzuflusses

Im Anschluss daran wurde der zuvor hergestellte Trockenbaustoff in den Gertec-Mischer gegeben und gemäß Tabelle 6-22 zu einer Suspension gemischt. Die Wassermenge wurde hierbei durch eine im Mischer integrierte Waageeinheit kontrolliert. Die Wasserzufuhr erfolgte hierbei über einen an den Gertec-Mischer angeschlossenen Schlauch. Nach der Herstellung der ersten

Charge wurde diese in den Vorratbehälter umgeleitet und eine weitere Charge hergestellt. In Abbildung 6-98 ist die Befüllung des Gertec-Chargenmischers abgebildet. Wie zu erkennen ist, war hierbei infolge der starken Staubentwicklung auf eine ausreichende persönliche Schutzausrüstung (PSA) zu achten.



Abbildung 6-98: Befüllung des Gertec-Chargenmischers mit dem vorbereiteten Trockenbaustoff

Nach der Herstellung der ersten beiden Chargen konnte mit der Verfüllung eines Bohrlochsimulators begonnen werden. Hierfür wurde der Gertec-Chargenmischer an ein Schlauchsystem angeschlossen, welches auf der anderen Seite an das Verfüllrohr gekoppelt werden konnte. In Abbildung 6-99 ist der Anschluss des Verpressschlauchs an das Verfüllrohr dargestellt. Nach der Herstellung des Verfüllbaustoffs im Gertec-Mischer sowie vor der Verfüllung des Bohrlochsimulators wurden zudem Proben für Laboruntersuchungen entnommen.

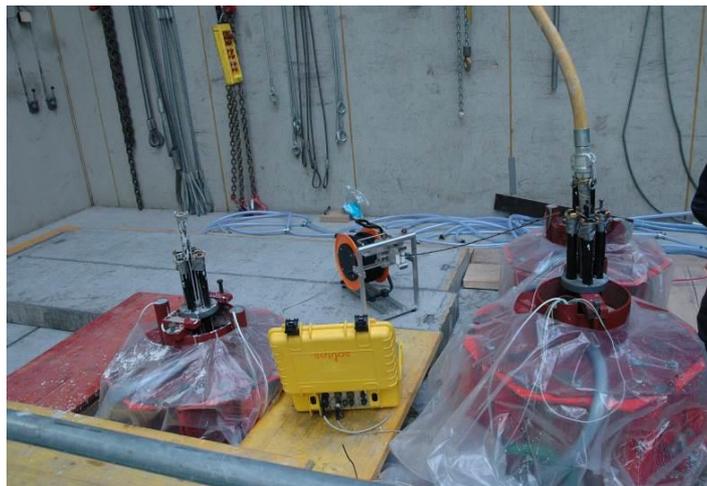


Abbildung 6-99: Übersicht der Verfüllung der Bohrlochsimulatoren am Simulatorkopf, rechts der Anschluss des Verpressschlauchs an das Verfüllrohr, mit dem eingesetzten CEM-Trakker zur Nachverfolgung des Verfüllstands

Während des Verfüllvorgangs war kontinuierlich sowohl auf eine ausreichende Bereitstellung der Suspension sowie auf eine kontinuierliche Verfüllung im Bohrlochfuß zu achten. Hierbei war es ebenfalls wichtig, dass das Bohrloch stetig bei kontrollierter Geschwindigkeit gefüllt wurde und das verdrängte Wasser über die Überlaufrohre abfließen konnte. Zum Schutz der Messuhren am Grundwasserleiter, wurden beim Erreichen einer definierten Höhe die Grundwasserleiter verschlossen, um ein Rückfluss des Verfüllbaustoffs in die Messuhren zu vermeiden. Alle drei Bohrlochsimulatoren wurden nacheinander im Laufe eines Arbeitstages verfüllt, um gleiche Einbau- sowie Erhärtungsbedingungen gewährleisten zu können.

Im Anschluss an die Verfüllung der drei Bohrlochsimulatoren sowie der Reinigung aller Gerätschaften wurden die drei Bohrlöcher für ca. 48 Stunden erwärmt um die Aushärtung des Verfüllbaustoffs bzw. die Festigkeitsbildung des Zementes zu begünstigen. In der ursprünglichen Versuchsplanung sollte hierbei die Erwärmung über die an der Halbschalenwandung integrierten Heizmatten erfolgen. Jedoch zeigte sich im Rahmen eines Vorversuches, dass die Heizleistung nicht ausreichend war, um im inneren des Bohrlochs die gewünschte Temperatur zu erreichen. Dementsprechend wurden für die Kampagnen ein separater Durchlauferhitzer angemietet und 80 °C heißes Wasser durch die Rohre zur Nachbildung der Erdwärmesonden durchgepumpt. Dies bringt eine ausreichende Heizleistung um sowohl die Verfestigung des Verfüllbaustoffs zu beschleunigen als auch die an der Halbschaleninnenseite aufgetragene Wachsschicht teilweise zu schmelzen.

Nach Erhärtung der Bohrlochfüllung wurde eine Analyse der Systemdichtigkeit durchgeführt. An einem Grundwasserleiter wurde sukzessive der Druck bis zu einem Leitungsdruck von etwa vier bar erhöht und so die Dichtigkeit bestimmt. Hierfür musste zuerst der Wasserfluss adaptiert werden, um den größtmöglichen Druck an den unteren Grundwasserleiter anbringen zu können. Nach der Druckaufbringung an dem untersten Grundwasserleiter wurde dieser auch auf die weiteren Grundwasserleiter aufgebracht und die Dichtigkeit des Systems überprüft.

Abbau des Bohrlochsimulators

Im Anschluss an die Aushärtung des Verfüllbaustoffs wurde mit dem Abbau der Bohrlöcher begonnen. Hierbei wurden zuerst alle vorhandenen Wasserzuläufe sowie stromführenden Leitungen abgebaut. Im Anschluss daran wurde die Fixierung am Bohrlochkopf des ersten Bohrloches und die oberste Halbschale gelöst. Diese war hierbei kraftschlüssig mit dem Portalkran zu verbinden. In Abbildung 6-100 ist der Abbau des ersten Segmentes des Bohrlochsimulators nach der Entfernung der Kopfplatte dargestellt.



Abbildung 6-100: Abbau des ersten Halbschalenelementes eines Bohrlochsimulators nach Entfernung des Kopfplattenelementes, rechts Aufhängung des Portalkrans an das Halbschalenelement

Nach der Entfernung des Halbschalenpaars konnte, im Idealfall, ein freistehender Verfüllkörper gewonnen werden, wie beispielsweise in Abbildung 6-101 dargestellt. Dieser wurde im Anschluss daran mit einer Säge vom unteren Abschnitt getrennt und durch eine Befestigung an den Kran mittels Schlaufen abtransportiert.



Abbildung 6-101: Beispielhafter Verfüllkörper nach Entfernung der Halbschalenelemente mit unterschiedlicher Profilierung

Nach der Entfernung des Halbschalenpaars wurden dann sukzessive die weiteren Halbschalenpaare bzw. Grundwasserleiter entfernt. Während des gesamten Abbaus war durchgehend auf eine Gewährleistung der Sicherheit zu achten, da neben der erhöhten Gefahr durch Höhenarbeit auch die schwebenden Lasten zu berücksichtigen waren.

In dem überwiegenden Teil der Versuche konnte jedoch der Verfüllkörper nicht zusammenhängend (Abbildung 6-101) gewonnen werden. Hierbei hat der Verfüllkörper die Schalung vollständig aufgefüllt, doch trotz Aufbringung einer schmelzenden Wachsschicht konnte die Schalung nicht vom Verfüllkörper getrennt werden. Durch die Entfernung der Halbschale hat sich ein Bruch im Verfüllkörper ergeben und der Verfüllkörper war jeweils in den Halbschalen zurückgeblieben. In Abbildung 6-102 ist beispielhaft das Bruchbild eines Verfüllkörpers bei der Entfernung des Halbschalenelementes zu erkennen. Hierbei wurde deutlich, dass der Verfüllkörper nicht von dem Halbschalenelement zu trennen war. Diese Erkenntnis führt jedoch auch zu einer schwierigeren Beurteilung der Fehlstellenbildung.

In Abbildung 6-103 sind die gewonnenen Halbschalenelemente und Verfüllkörper nach Abbau eines Bohrlochsimulators in der Übersicht dargestellt.



Abbildung 6-102: Regelzustand der Verfüllkörper nach Entfernung des Halbschalenelementes, links nach dem Abbau des ersten Halbschalenelementes, rechts nach Abbau des zweiten Halbschalenelementes und Positionierung auf der Lagerungspalette



Abbildung 6-103: Halbschalenelemente sowie Verfüllkörper nach dem Abbau eines Bohrlochsimulators nach einem Verfüllversuch

6.5.4. Ergebnisse der Bohrlochsimulatorversuche

Ergebnisse aus den Laborversuchen

Zur Qualitätskontrolle wurden aus dem Mischprozess zwei Proben und eine weitere Probe vor der Verpressung entnommen. Von diesen Proben wurde jeweils ein Setzmaß mit Hilfe des Hägermann-Trichters ermittelt, welches mit den Laborwerten verglichen wurde. Die Laborwerte dienten hierbei als Freigabekriterium, anhand dessen die korrekte Einwaage und Mischung sowie die gewünschten Eigenschaften des Baustoffes vor dem Verfüllen sichergestellt wurden. Auch eine Bewertung der verschiedenen Chargen im Kolloidalmischer wurde hiermit ermöglicht. Der Vergleich der Setzmaße in Abbildung 6-104 zeigt übereinstimmende Werte zwischen Labormischung und Kolloidalmischer, was für die korrekte Mischung der Ausgangsstoffe spricht. Des Weiteren wurde deutlich, dass mit der vorhandenen Einrichtung die Verfüllbaustoffe auch zielsicher und reproduzierbar herstellbar sind, was maßgeblich für die Qualitätssicherung während der Bohrlochverfüllung ist.

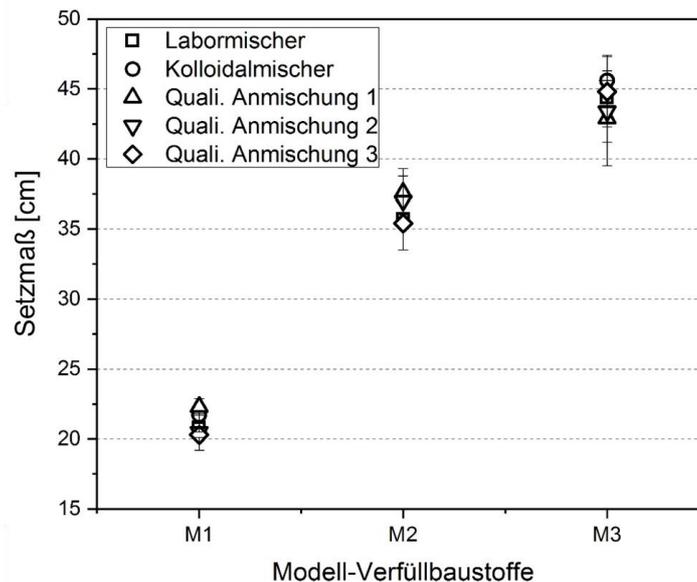


Abbildung 6-104: Vergleich der ermittelten Ausbreitmaße nach der Labormischung, der Mischung mittels Kolloidalmischer, sowie die Qualitätskontrollen der Chargen des Kolloidalmischers der Kampagnen K1 bis K3.

Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen

Begleitend zu den in Kapitel 6.5.3 beschriebenen Verfüllversuchen wurden bei jeder der vier Kampagnen Prismen (Nennmaß $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ in Anlehnung an DIN EN 196-1:2016) hergestellt. Diese wurden im Alter von 2, 7 und 28 Tagen geprüft und die Biegezugfestigkeit (3-Punkt-Biegeversuch) und Druckfestigkeit bestimmt.

Aufgrund der zu erwartenden geringen Druckfestigkeit des Verfüllbaustoffs wurden die Prüfkörper nicht nach DIN EN 196-1:2016-11, sondern nach DIN EN 1015-10:2007-05 geprüft, womit eine zielsichere Bestimmung der Festigkeitswerte möglich war. Die Durchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN 1015-10:2007-05 erlaubte eine Veränderung der Prüfgeschwindigkeit, wodurch das Versagen der Proben zwischen 30 und 90 Sekunden nach Prüfbeginn eintrat. Hierbei wurde für die Biegezugfestigkeit eine Belastungsgeschwindigkeit von 10 N/s eingestellt. Zur Prüfung der Druckfestigkeit wurde im Alter von 2 und 7 Tagen eine Prüfgeschwindigkeit von 100 N/s, im Alter von 28 Tagen eine Prüfgeschwindigkeit von 200 bzw. 400 N/s eingestellt. Die Proben des Verfüllbaustoffs M2 im Alter von 2 und 7 Tagen nicht geprüft werden, da die Proben eine erhöhte Sedimentationserscheinung aufwiesen. In Abbildung 6-105 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung, in Abbildung 6-106 die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung im Alter von 2, 7 und 28 Tagen dargestellt.

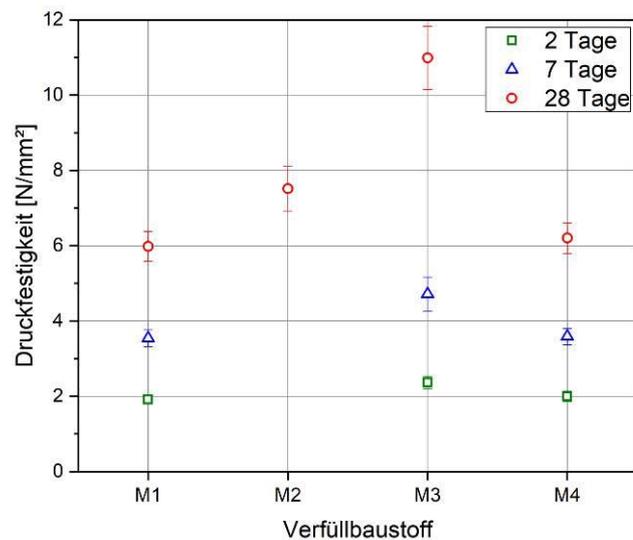


Abbildung 6-105: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach DIN EN 1015-10:2007-05 der vier Verfüllbaustoffe im Alter von 2, 7 und 28 Tagen

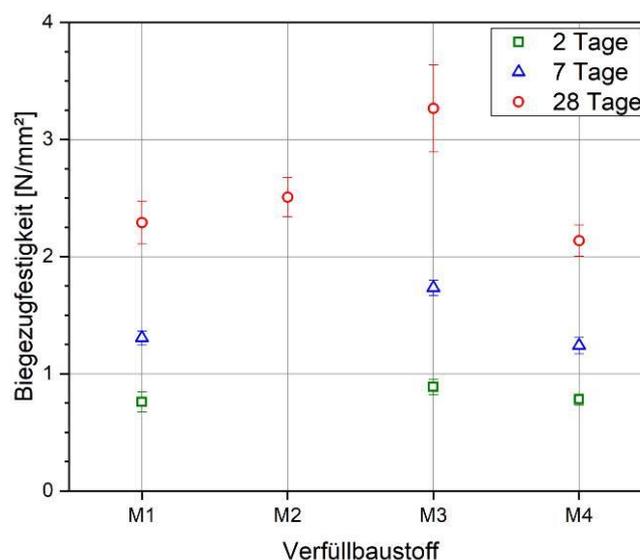


Abbildung 6-106: Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung nach DIN EN 1015-10:2007-05 der vier Verfüllbaustoffe im Alter von 2, 7 und 28 Tagen

Wie zu erkennen ist besitzt Mischung M3 im Alter von 28 Tagen stets die höchsten Werte der Druck- und Biegezugfestigkeit. M1 und M4 weisen durchgehend annähernd gleiche, aber geringe Festigkeitswerte. Es wird zudem an der Druckfestigkeit deutlich, dass Mischung M3 eine deutlich stärkere Nacherhärtung ab einem Alter von 7 Tagen besitzt als die Mischungen M1 und M4.

Das Verhältnis der Biegezug- zur Druckfestigkeit der Verfüllbaustoffe liegt durchgehend zwischen 0,30 und 0,40. Dies überschreitet deutlich die für Konstruktionsbetone üblichen Verhältnisse von 0,10 bis 0,20, ist jedoch im Rahmen der üblichen Betontechnologie zu erklären, wo das Zug-/Druckfestigkeitsverhältnis von Betonen mit sinkender Druckfestigkeit zunimmt. Die verhältnismäßig hohe Biegezugfestigkeit wirkt sich ebenfalls positiv auf die Festbetoneigenschaften des

Verfüllbaustoffs aus. Aus Abbildung 6-105 bzw. Abbildung 6-106 wird ebenfalls deutlich, dass eine direkte Korrelation zwischen der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit der Verfüllbaustoffe existiert. Je höher die Druckfestigkeit, desto größer fallen die Werte der Biegezugfestigkeit aus.

Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfung und Fehlstellenbildung

Wie bereits in vorangehend beschrieben, wurden im Anschluss an die Erhärtung des Verfüllbaustoffs Systemdichtigkeitsprüfung der Bohrlöcher durchgeführt. Hierbei wurde über den Grundwasserleiter der Wasserdruck sukzessive auf bis zu 4 bar erhöht. Im Rahmen der vier Kampagnen wurde festgestellt, dass lediglich der Verfüllbaustoff M1 nicht ausreichend dicht war und bei einem Druck zwischen 1,5 bar und 3,0 bar undichte Stellen eintraten. Diese Wasserläufigkeiten waren jedoch überwiegend auf den Ringraum zwischen Verfüllkörper und Bohrlochwandung zurückzuführen.

Ursprünglich wurde die Quantifizierung der Fehlstellenbildung in Abhängigkeit des eingebauten Verfüllbaustoffs angestrebt. Als Grundlage hierfür dienten die Erkenntnisse aus einem vorangegangenen Projekt. Hier waren bei der Verdrängung einer Bentonit-Suspension eindeutige Fehlstellen zu erkennen. Im Vorfeld auf die Durchführung der Verfüllversuche wurde eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) des KIT angestrebt, um eine mögliche schnelle und kontaktlose Vermessungsmöglichkeit der Prüfkörper zu finden, mit denen systematisch die gewonnen Verfüllkörper vermessen werden könnten. Hierbei kamen verschiedene Lösungen in Betracht, wobei einer Vermessung mittels handgehaltenem 2D-Laserscanner der Vorzug gegeben wurde, da komplexe Geometrien schnell und zuverlässig einzumessen wären. Die einfache Handhabung geht zwar zu Lasten der Genauigkeit, da nur eine sub-Zentimeter- statt sub-Millimeter-Genauigkeit erreicht werden kann, was aber nach Ansicht der Projektpartner bei der aktuellen Fragestellung ausreichend gewesen wäre.

Im Rahmen der vorliegenden Verfüllversuche zeigte sich jedoch, dass, gegenüber den vorangegangenen Versuchen mit einer Bentonit-Suspension, eine Verdrängung des Grundwassers durch den Verfüllbaustoff bei alle vier Verfüllbaustoffen fehlerfrei möglich war. Dies führte ebenfalls dazu, dass die Verfüllkörper überwiegend nicht zurückgewonnen werden konnten, da die Haftung zwischen Verfüllkörper und Halbschalenwandung, trotz aufgebrachter Wachsschicht, zu hoch war und die Verfüllkörper beim Abbau beschädigt wurden. In Abbildung 6-107 ist beispielhaft ein Halbschalenelement aus der Kampagne K1 nach dem Abbau dargestellt. Hierbei ist eindeutig zu erkennen, dass keine Hohlräume zwischen dem Verfüllkörper und der Halbschalenwandung entstanden waren. In Abbildung 6-108 ist eine Detailaufnahme des Verfüllkörpers dargestellt, bei dem das Halbschalenelement vom Verfüllkörper separiert werden konnte. Hierbei wurde deutlich, dass die Wachsschicht nicht durchgehend verschmolzen war und daher sich auch nicht vom Verfüllkörper gelöst hat.



Abbildung 6-107: Beispielhaftes Halbschalenelement der Kampagne K1 nach Verfüllung und Abbau



Abbildung 6-108: Detailaufnahme eines Verfüllkörpers während des Abbaus der Kampagne K1

Es ist zudem zu erkennen, dass die Halbschalenelemente mit einem großen h/d -Verhältnis tendenziell einfacher entfernt werden konnten im Vergleich zu denen mit einem geringen h/d -Verhältnis. Durchgehend zeigt sich jedoch, dass unabhängig von der gewählten Geometrie des Halbschalenelementes bzw. der künstlichen Gesteinsformation keine signifikanten Fehlstellen entstanden sind. Vor dem Hintergrund der entwickelten Mischung wird deutlich, dass innerhalb der in AP A3 definierten rheologischen Eigenschaften der Mischungen alle Mischungen geeignet waren, um das anstehende Wasser zu verdrängen und der Grundwasserströmung entgegenzuwirken.

6.6. Ergebnisse der Magnetischen Suszeptibilitätsmessungen (AP. C)

Die folgende Tabelle zeigt das Untersuchungsprogramm, das an kommerziellen und Referenzverfüllbaustoffen mit unterschiedlichen Bartington Sensoren und dem CemTrakker (CT) an verschiedenen Probenarten durchgeführt wurde.

Tabelle 6-25: Untersuchungsprogramm

Untersuchung	Verfüllbaustoff Nr.						Messtechnik			
	07d	13+d	M1	M2	M3	M4	Bartington MS2...			Sensys
							B	C	H	CT
Suszeptibilitätsbestimmung ^P	X	X	X	X	X	X	X			
Bestimmung der optimalen Probenlänge ^K	X	X						X		
Statistik zu Mess- und Herstellungsfehlern ^K	X	X						X		
Langzeitstabilität des magnetischen Signals ^K	X	X						X		
Qualitätsunterschiede bei variablen Anmischbedingungen und Chargen ^{K,S,*}	X	X	X	X	X	X		X		
Einfluss von Sondenrohren auf das Messsignal ^{K,S}	X	X				X		X	X	X
Einfluss unterschiedlicher W/F auf das Messsignal ^{K,S,*}	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Einfluss der Geologie auf das Messsignal ^{K,G}								X	X	X
Sensoreindringtiefe ^K	X	X							X	X
Fehlstellenuntersuchungen ^K	X	X				X			X	X
Einfluss von Hilfsverrohrungen auf das Messsignal ^K	X	X							X	X
Einfluss von Abstandshaltern auf das Messsignal ^K	X	X							X	X
Korrelation der Messsysteme bei unterschiedlicher Dotierung ^K						X		X	X	X

* Bestimmung von Suspensionsdichte, Absetzmaß und Marshzeit; ** = * ohne Marshzeit; Probenart: K = Kern, P = Pulver, S = Suspension, G = Gestein

6.6.1. Untersuchung der mit Magnetit dotierten Verfüllbaustoffe 07d, 13+d, und der Suszeptibilitätsmesssysteme

6.6.1.1. Suszeptibilitätsbestimmung an Verfüllbaustoffpulvern mit dem MS2B

In einem ersten Schritt wurden die beiden Verfüllbaustoffe als Pulver mit dem MS2B Sensor vermessen, um einen ersten Eindruck über deren Signalstärke im Rohzustand zu erhalten (Tabelle 6-26). Es wurden von jedem Material 6 Säcke vermessen, insgesamt also 12. Es wurde für jeden Sack eine A und B Probe hergestellt, um die Reproduzierbarkeit zu zeigen. Außerdem wurden auch 3 unterschiedliche Chargen betrachtet, dabei waren jeweils 2 Säcke eines Materials von einer Charge. Der Begriff „Charge“ meint in diesem Zusammenhang eine Trockenverfüllbaustoffabfüllung, bestehend aus einer unbekanntem Anzahl an 25 kg Säcken gleichen Abfüll- bzw. Herstellungsdatums. Zum Vergleich wurde für beide Verfüllbaustoffe jeweils ein Sack des undotierten Basismaterials (07 und 13+) vermessen.

Tabelle 6-26: Volumenssuszeptibilitäten (K) für Verfüllbaustoff (BS)-Pulver 07d,13+d, 07 und 13+

BS	Charge	Sack	Probe	K [-]	BS	Charge	Sack	Probe	K [-]
07d	20.09.16	1	A	2,17E-02	13+d	14.12.16	1	A	1,50E-02
			B	2,18E-02				B	1,55E-02
		2	A	1,87E-02			2	A	1,31E-02
			B	1,85E-02				B	1,32E-02
07d	20.03.17	1	A	1,47E-02	13+d	21.03.17	1	A	1,37E-02
			B	1,40E-02				B	1,44E-02
		2	A	1,47E-02			2	A	1,36E-02
			B	1,35E-02				B	1,35E-02
07d	02.08.17	1	A	2,15E-02	13+d	11.09.17	1	A	2,06E-02
			B	2,13E-02				B	2,05E-02
		2	A	2,18E-02			2	A	2,04E-02
			B	2,17E-02				B	2,02E-02
07	27.10.16	1	A	1,43E-03	13+	13.09.17	1	A	4,03E-04
			B	1,43E-03				B	3,70E-04

Die Analyse der Proben zeigt, dass 07d und 13+d generell nahe beieinander liegen mit einer leichten Tendenz zu kleiner Werten bei 13+d, aber auch abhängig davon welche Chargen man miteinander vergleicht. Im Durchschnitt liegt 07d bei 1,87E-02 und 13+d bei 1,61E-02. A & B Probe für jeden Sack sind gut reproduzierbar. Es treten z.T. Signalunterschiede bei unterschiedlichen Chargen eines Baustoffs auf. Das kann z.B. auf Rezeptanpassungen von Seiten der Hersteller bei den einzelnen Chargenherstellungen hindeuten. Die undotierten Verfüllbaustoffe liegen beim Signal 1-2 Zehnerpotenzen unter den dotierten Verfüllbaustoffen.

6.6.1.2. Bestimmung der optimalen Probenkernlänge für MS2C Messungen

Zur Untersuchung von ausgehärteten Verfüllbaustoffproben mit dem MS2C Sensor wurden zunächst Voruntersuchungen durchgeführt um die Grenzen und die Auflösung der Messtechnik besser zu verstehen. In erster Linie war es wichtig zu erfahren, wie lang Kernproben sein müssen um materialspezifische K messen zu können. Laut Hersteller Bartington sind die Ringsensoren in der Lage in einem Radius von einem Ringsensordurchmesser zu messen. Bei einem 120 mm Sensor, wie er für die Ø110 Probenkörper nötig ist, würde man materialspezifische Werte also ab einer Probenlänge von ≥ 240 mm erhalten. So lang müsste eine Kernprobe mind. sein, um exakt in der Probenmitte einen materialspezifischen Wert der Suszeptibilität messen zu können (vorausgesetzt der Magnetit ist homogen verteilt). Ist die Probe < 240 mm, so misst der Sensor Luft an den Kernrändern, sogenannte Randeffekte, sodass der abgelesene Messwert in der Mitte nicht mehr als materialspezifisch anzusehen ist.

Zur Überprüfung der Herstellerangaben wurden von den beiden dotierten Verfüllbaustoffen 07d und 13+d jeweils Proben in den Längen 20, 30 und 50 cm aus einer Charge hergestellt.

Abbildung 6-109 zeigt die Ergebnisse des magnetischen Signals für 07d und 13+d mit jeweils A & B Probe für jede Länge, außerdem wurden noch Proben der undotierten Verfüllbaustoffe 07 und 13+ in 30 cm Länge hergestellt und als Referenz gemessen. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- A & B Proben stimmen immer gut überein.
- Auffällig ist das Ausbilden eines Plateaus bei den 50 cm Proben, was die homogene Verteilung des Magnetits über die Probenlänge andeutet.
- Auffällig ist auch, dass die 30 cm Proben den Plateaubereich der 50 cm Proben deutlich schneiden bzw. selbst einen kleineren Plateaubereich mit mehreren Messpunkten aufweisen.
- Die 20 cm Proben hingegen liegen bereits leicht unterhalb dieses Plateaubereichs. Das deutet darauf hin, dass sich die Grenze, bei der Randeffekte einsetzen, unterhalb 30 cm Probenlänge liegt; abgeschätzt anhand der Messplateaus bei etwa 25 cm. Das stimmt auch in etwa mit den Angaben des Herstellers Bartington (ca. 24 cm) überein.
- Ein trotz fehlendem Magnetits auftretendes schwaches Signal bei 07 und 13+ ist wohl auf geringe Anteile ferri-ferromagnetischer Bestandteile im Verfüllbaustoff zurückzuführen.

Die Fehlerbalken im Diagramm entstammen einer statistischen Fehleranalyse, die in den folgenden Kapiteln (6.6.1.3 & 6.6.1.4) noch näher erläutert wird.

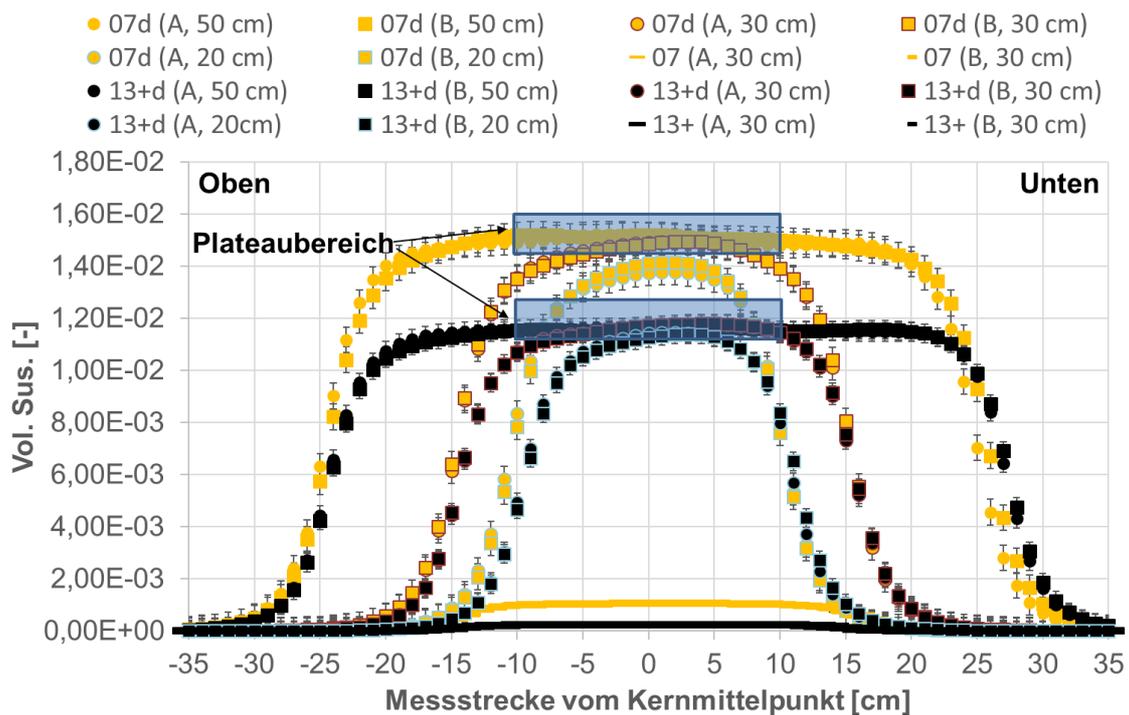


Abbildung 6-109: Einfluss der Probenlänge auf die Messkurve (MS2C) bei 07d und 13+d

Anhand dieser Ergebnisse wurde entschieden, für die weiteren Arbeiten Proben mit mind. 30 cm Länge herzustellen, da diese auf jeden Fall materialspezifische Werte für K im Plateaubereich um den Kernmittelpunkt angeben. Kürzere Kerne (um mind. 5 cm) sind als kritisch anzusehen, vor allem, wenn man materialspezifische Werte miteinander vergleichen möchte. Für Untersuchungen in denen hohe Absetzmaße zu erwarten sind, würden deshalb auch 50 cm lange Proben in Betracht gezogen. Ein Vergleich von material-unspezifischen Werten bei kleineren Proben ist dennoch möglich, vorausgesetzt die Längen aller zu vergleichenden Proben sind gleich.

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass bei den Untersuchungen 13+d ein schwächeres materialspezifisches K aufweist als 07d. Das liegt an den deutlichen Signalunterschieden der beiden verwendeten Chargen (20.09.16 für 07d und 14.12.16 für 13+d, siehe auch Kap. 6.6.1.1).

6.6.1.3. Messfehleruntersuchungen für MS2C Messungen

Zur Untersuchung von Fehlern, die rein auf der Messung mit dem MS2C in Verbindung mit dem ASC Core Track basieren, wurden die beiden 30 cm Proben von 07d und 13+d aus dem vorherigen Kapitel verwendet. Abbildung 6-110 zeigt die Wiederholungsmessung der Kernprobe über den Zeitraum von 1000d. Die Abbildung zeigt Mittelwerte die jeweils aus den gemessenen Plateaubereichen (siehe vorheriges Kapitel) errechnete wurden. Hierzu wurden immer 5 Messwerte entlang der x-Achse (Messstrecke vom Kernmittelpunkt) von $x=-2$ bis $x=2$ zur identischen Berechnung bei allen Proben verwendet. Exemplarisch sind Messungen nur nach jeweils 200 Tagen dargestellt. Die Messungen wurden aber gerade in der Anfangszeit wöchentlich wiederholt, um eine robuste Statistik zu erhalten und ggf. Messabweichungen durch eine mögliche Magnetitin-

stabilität auszuschließen. Die Wiederholungsmessungen sind aber auch nach 1000d nahezu deckungsgleich. In der Folge ist auch von einem verschwindend geringen Messfehler für die materialspezifischen K auszugehen. Rechnerisch ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit (2σ) von nur $\pm 3,19E-5$ für 07d und $\pm 2,74E-5$ für 13+d. Es wurde darauf verzichtet diese Fehler in der Abbildung als Fehlerbalken darzustellen, da sie wegen des relativ kleinen Betrags nicht sichtbar wären.

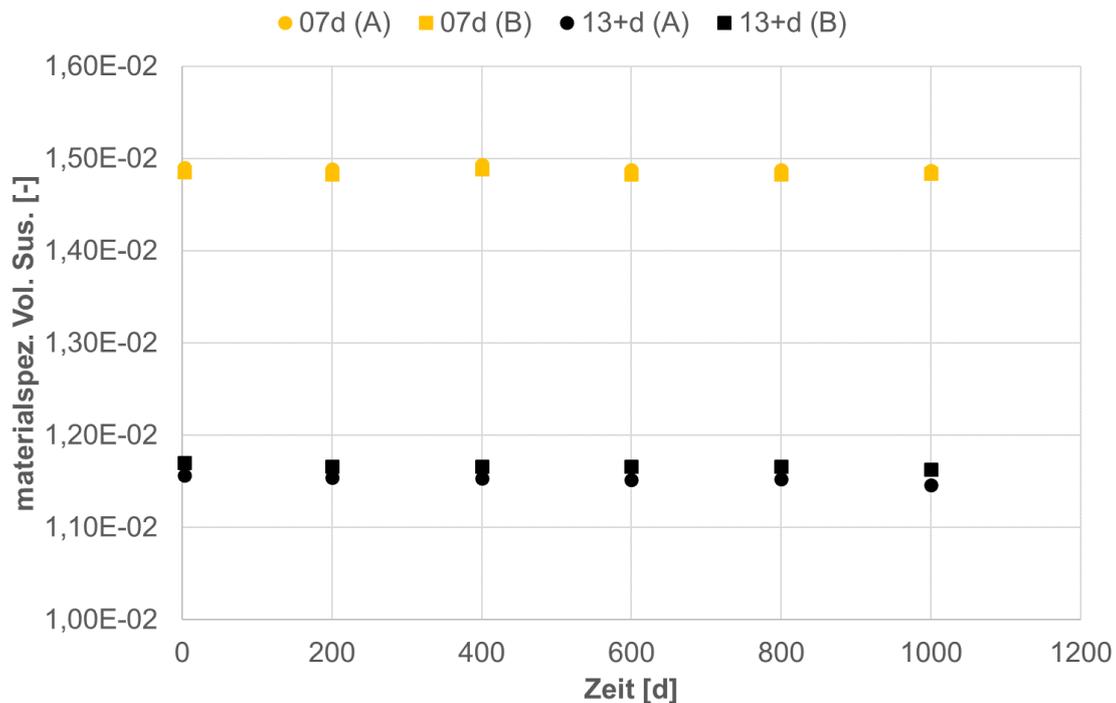


Abbildung 6-110: Wiederholungsmessung materialspezifischer K zweier 07d und 13+d Kernproben (30 cm Länge, $\varnothing 110$ mm)

6.6.1.4. Herstellungsfehleruntersuchungen mittels MS2C Messungen

Zur Ermittlung des statistischen Fehlers, resultierend aus dem Herstellungsprozess, wurden 10 Proben von 07d und 13+d jeweils aus einer Charge hergestellt, mit dem MS2C Sensor vermessen und materialspezifische K aus dem Plateaubereich errechnet (siehe Abbildung 6-111). Es zeigen sich nur sehr geringe Schwankungen der materialspezifischen K. Die daraus rechnerisch ermittelte erweiterte Messunsicherheit (2σ) beträgt $\pm 4,56E-04$ für 07d. Für 13+d ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit (2σ) von $\pm 3,26E-04$.

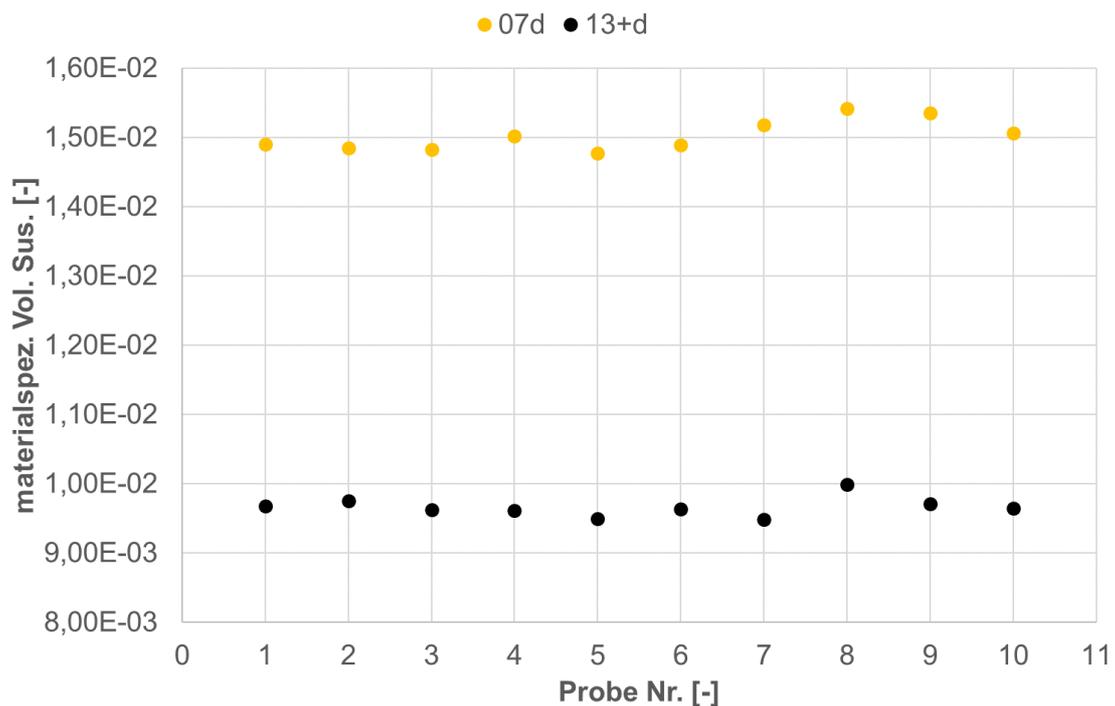


Abbildung 6-111: Materialspezifische K von 10 x 07d Proben und 10 x 13+d Proben (30 cm Länge, Ø110 mm)

6.6.1.5. Untersuchung der Langzeitstabilität des Messsignals mittels MS2C Messungen

Aus den Ergebnisse des Kap. 6.6.1.3 lässt sich neben der Aussage über den Messfehler auch eine Aussage über die Langzeitstabilität der Messsignale für 07d und 13+d machen, bzw. über die chemische Stabilität des Magnetit im geschlossenen, ausgehärteten Verfüllbaustoffsystem. Die Messsignale sind für beide Verfüllbaustoffe über den Zeitraum von 1000d stabil geblieben und somit auch im Realfall auf der Baustelle in diesem Zeitraum für eventuelle Wiederholungsmessungen verfügbar. Mögliche Fehlstellen z.B. durch Abtragungen des Verfüllbaustoffkörpers durch Grundwasser, eingeschlossene Gas- oder Fluidblasen etc. wären somit im Rahmen der Reichweite und Sensitivität des eingesetzten Messensors innerhalb dieses Zeitraums erkennbar. Zur Reichweite und Sensitivität der Messsensoren CemTrakker und MS2H folgen im Kap. 6.6.1.10 noch vertiefende Untersuchungen.

Abbildung 6-112 zeigt zusätzlich die Stabilitätsbereiche von Magnetit in EH-pH Diagrammen. Aus Batchversuchen, die im Rahmen des Arbeitspakets D durchgeführt wurden, können pH-Werte für 07d von 12,48 bis 12,95 und Eh-Werte von -0,047 bis -0,085 Volt, sowie für 13+d pH-Werte von 12,31 bis 12,7 und Eh Werte von -0,557 bis 0,456 Volt, in Leitungswasser angegeben werden. Das sollte annähernd dem Porenwasser Eh-pH Werten im geschlossenen Verfüllbaustoffsystem entsprechen. Für 13+d liegt man somit im Stabilitätsbereich des Magnetits, so dass keine Umwandlung zu erwarten ist. 07d befindet sich hingegen im Stabilitätsbereich von Hämatit (Fe_2O_3), so dass eine Umwandlung von Magnetit in Hämatit möglich ist. Hämatit gilt als antiferromagnetisch mit Suszeptibilitäten im paramagnetischen Bereich. Es müsste bei einer tatsächlichen Umwandlung also zu deutlichen Signalschwächungen kommen. Unklar ist auch, wie schnell sich so

eine Umwandlung ggf. vollzieht, und in welchem Ausmaß Magnetitpartikel im ausgehärteten Verfüllbaustoffsystem tatsächlich von Porenwasser umgeben sind. Im Laborversuch bis 1000d konnte zumindest keine Änderung des magnetischen Signals festgestellt werden, was gegen eine Umwandlung spricht.

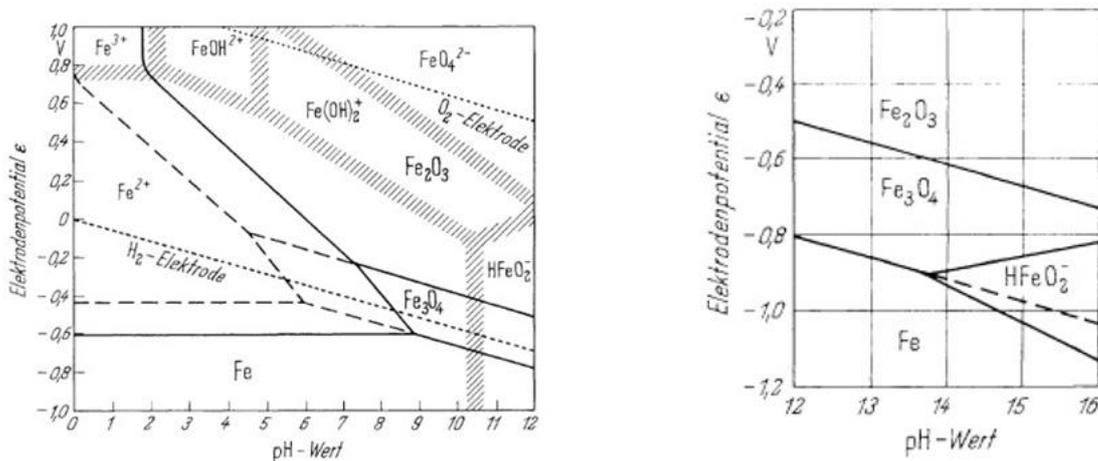


Abbildung 6-112: Stabilitätsbereiche von Magnetit (Fe_3O_4) (aus Kaesche 2011)

6.6.1.6. Untersuchung von Qualitätsunterschieden bei unterschiedlichen Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min) und Chargen mittels MS2C Messungen

Je nach Verfüllbaustoff werden von den Herstellern unterschiedliche Anmischtechniken empfohlen, um optimale Verfüllbaustoffeigenschaften, sowohl im Labor, als auch im Feld zu erhalten. Ein wichtiger Faktor ist dabei auch die Mischgeschwindigkeit, wie es sich im Folgenden noch zeigen wird.

In diesem Kapitel wird sowohl auf den Einfluss der Rührgeschwindigkeit, als auch auf den Einfluss unterschiedlicher Chargen auf die Stärke und Ausbildung des magnetischen Suszeptibilitätssignals und der Suspensionseigenschaften eingegangen. Hierzu wurden von 07d und 13+d aus insgesamt drei während der Projektlaufzeit verwendeten Chargen (siehe zum Vergleich auch Kap. 6.6.1.1) jeweils zwei Proben sowohl bei 650 als auch bei 2000 U/min und Standard W/F (=0,3 für 07d und 0,8 für 13+d) hergestellt und mit dem MS2C Sensor gemessen (Abbildung 6-113). Ein materialspezifisches K wurde wie in den vorherigen Kapiteln berechnet.

Die Unterschiede des magnetischen Messsignals bei unterschiedlichen Umdrehungszahlen sind unwesentlich, und z.T. im Bereich der Messgenauigkeit. Es lässt sich nichts darüber sagen, ob bestimmte Anmischbedingungen ein höheres oder niederes Signal begünstigen. Beim Vergleich der Chargen ist die vom 20.03.17 vom Signal her niedriger als die anderen, was sich gut mit den Ergebnissen der Pulvermessungen aus

Tabelle 6-26 deckt. Dieser Unterschied kann wie gesagt z.B. aus Rezeptanpassungen von Seiten der Hersteller herrühren. Insgesamt erscheint 07d hinsichtlich des magnetischen Signals recht robust bei variierenden Anmischbedingungen. Dies ist im Wesentlichen auch bei den Suspensionseigenschaften der Fall (Tabelle 6-27). Die Tabelle zeigt Durchschnittswerte und Spannweiten der Suspensionsdichte, Marshzeit und des Absetzmaßes für die jeweilige Charge bei unterschiedlichen Anmischgeschwindigkeiten. Hierzu wurde standardmäßig im Verlauf des gesamten

Projekts, von vielen im Labor verwendeten Verfüllbaustoffsäcken einer Charge, eine entsprechende Charakterisierung zur Qualitätsüberprüfung vorgenommen. Die Suspensionsdichte ist durchweg bei allen Chargen und Anmischbedingungen auf gleichem Niveau, betrachtet man die Mittelwerte (1,94-1,95 g/cm³), was auch den Herstellerdaten entspricht. Auch das Absetzmaß befindet sich im moderaten Bereich (bis max. 2 Vol.%), bis auf die Charge vom 20.09.16 bei 650 U/min mit 3,6 Vol.%. Auch die Marshzeit ist unauffällig bis auf die Charge vom 20.03.17 bei 650 U/min, die leicht über der nach LQS-EWS geforderten 50-100 s liegt. Bei den Suspensionscharakteristika zeigt sich also eine tendenziell bessere Suspensionsqualität bei höheren Anmischbedingungen.

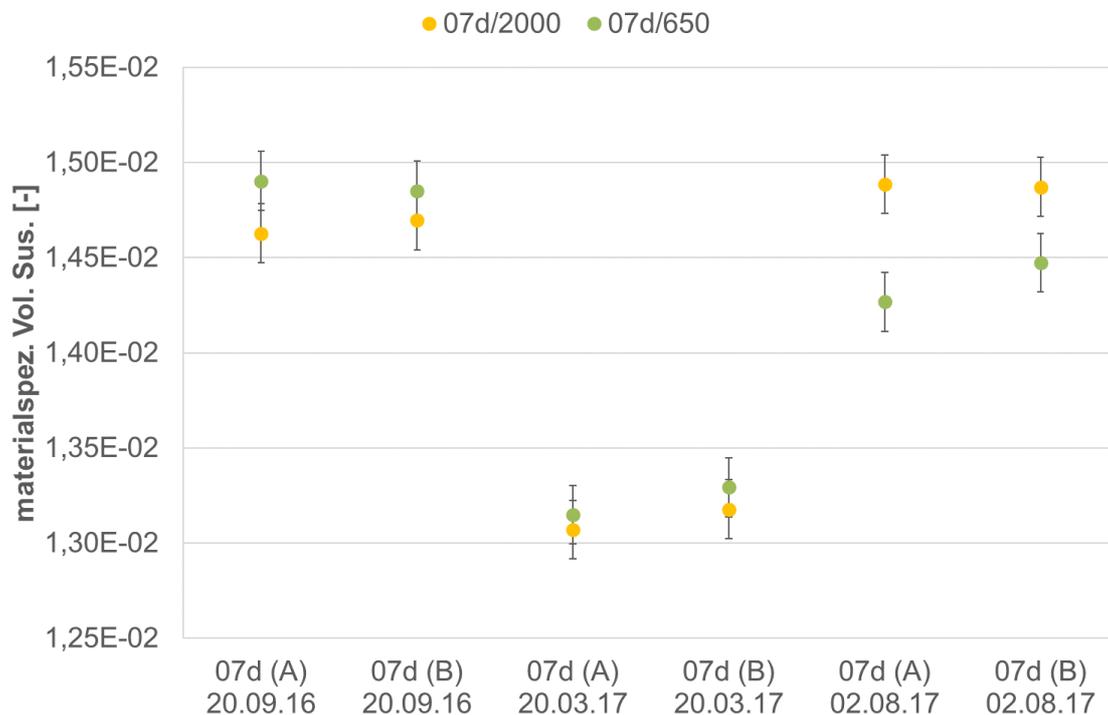


Abbildung 6-113: Vergleich materialspezifischer K dreier Chargen von 07d bei 2000 und 650 U/min

Tabelle 6-27: Mittelwerte und Spannweiten der Suspensionseigenschaften für 07d für unterschiedliche Chargen und Anmischgeschwindigkeiten (V_m)

07d						
V_m [U/min]	650			2000		
Charge	D [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]	D [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]
20.09.16	Ø1,95/ (1,94-1,98)	Ø3,6/ (3,2-4)	Ø70,4/ (65-74)	Ø1,94/ (1,94-1,95)	Ø0,9/ (0,8-1)	Ø66,0/ (62-70)
20.03.17	Ø1,94/ (1,93-1,94)	Ø0,4/ (0-0,8)	Ø117,6/ (99-141)	Ø1,94/ (1,93-1,95)	Ø0,2/ (0-0,4)	Ø82,5/ (82-83)
02.08.17	Ø1,95/ (1,95-1,96)	Ø1,2/ (0,8-1,6)	Ø64,5/ (64-65)	Ø1,95/ (1,95-1,96)	Ø0,3/ (0-0,8)	Ø64,4/ (63-67)

D = Suspensionsdichte, AM = Absetzmaß, MZ = Marshzeit

Abbildung 6-114 zeigt die gleichen Ergebnisse für 13+d. Die Unterschiede des magnetischen Messsignals bei unterschiedlichen Umdrehungszahlen sind gering und es lässt sich nichts darüber sagen, ob bestimmte Anmischbedingungen ein höheres oder niederes Signal begünstigen. Es gibt nur einen Ausreißer bei der Charge vom 11.09.17 bei 650 U/min. Dieser ist mit der Instabilität des Verfüllbaustoffs bei 650 U/min zu erklären (siehe Abbildung 6-115). Die Signalkurve ist deutlich asymmetrisch und schmäler als bei 2000 U/min. Letzteres hängt mit dem größeren Absetzmaß zusammen (siehe Tabelle 6-28). Die effektive Probenlänge ist durch das Absetzmaß verringert und somit setzen Randeffekte früher an den Kernrändern an, so dass der Signalpeak schmaler wird. Damit einhergehend ist eine Volumenabnahme der Probe bei gleicher Feststoffmasse, die folglich mit einer Dichtezunahme in dem Bereich und somit auch mit einer Signalerhöhung einhergeht. Die Asymmetrie der Kurve mit etwas höheren Werten im oberen Bereich, erscheint ungewöhnlich, kann aber damit erklärt werden, dass bereits während des Anmischens Magnetit im Mischeimer absinkt und dieser Absatz dann zum Schluss in die obersten Zentimeter der Proben eingegossen wird (dieser Effekt wird auch in späteren Untersuchungen mit den Referenzverfüllbaustoffen beobachtet). Hinzu kommt die Beobachtung einer sehr schnellen Zunahme der Viskosität schon während dem Verarbeiten, die vermutlich zu einer Konservierung dieser heterogenen Magnetitverteilung in der Probe führt.

Bei höheren Umdrehungszahlen (2000 U/min) verbessern sich die magnetischen Eigenschaften bzw. das Absetzmaß dieser Charge deutlich bzw. gleichen sich den übrigen Chargen an. Allerdings kommt es auch zu einer Veränderung der Dichte, die laut Hersteller bei 1,48 g/cm³ liegen sollte. Generell kommt es auch bei den anderen Chargen zu einer Dichteänderung. Faktisch dürfte sich die Dichte aber bei gleicher Charge und W/F nicht ändern. Diese Unterschiede sind vermutlich u.a. auf das unterschiedliche Aufschlussverhalten des Verfüllbaustoffs bei variablen Anmischbedingungen zurückzuführen, wie es sich bereits beim Absetzmaß andeutet. Gerade bei geringeren Anmischgeschwindigkeiten ist z.B. die Bildung von Klümpchen und eine insgesamt weniger homogene Durchmischung des Verfüllbaustoffs denkbar. Durch solche Heterogenitäten innerhalb der Mischung können keine repräsentativen Dichtewerte mehr ermittelt werden, was Schwankungen, sowohl nach oben als auch nach unten, erklären kann. Mit einer Rolle spielen

sicherliche auch Messabweichungen die anhand der Spannweiten innerhalb einzelner Chargen (auch bei 07d, Tabelle 6-27) sichtbar werden.

Dichtevariationen kommen aber auch bei identischen Anmischbedingungen und variablen Chargen vor. Die Messabweichungen spielen auch in diesem Fall eine Rolle. Als zusätzliche Einflussfaktoren nicht auszuschließen sind aber z.B. auch Alterungserscheinung, die durch Messungen nach unterschiedlichen Lagerungszeit (innerhalb der angegebenen 6-monatigen Haltbarkeit) erfolgten. Auch leichte Rezeptanpassungen von Seiten der Hersteller sind möglich, so waren bei einer Charge (11.09.17) beispielsweise Änderungen der Inhaltsstoffe bereits rein visuel in Form von Partikeln der Grobsand-Feinkies Fraktion auszumachen, die sich im Mischbehältnis sowie Marshtrichter-Sieb absetzten. Bei den anderen Chargen war dies nicht der Fall.

Der Verfüllbaustoff 13+d stellt sich hinsichtlich der Suspensionseigenschaften insgesamt weniger robust dar im Vergleich zu 07d.

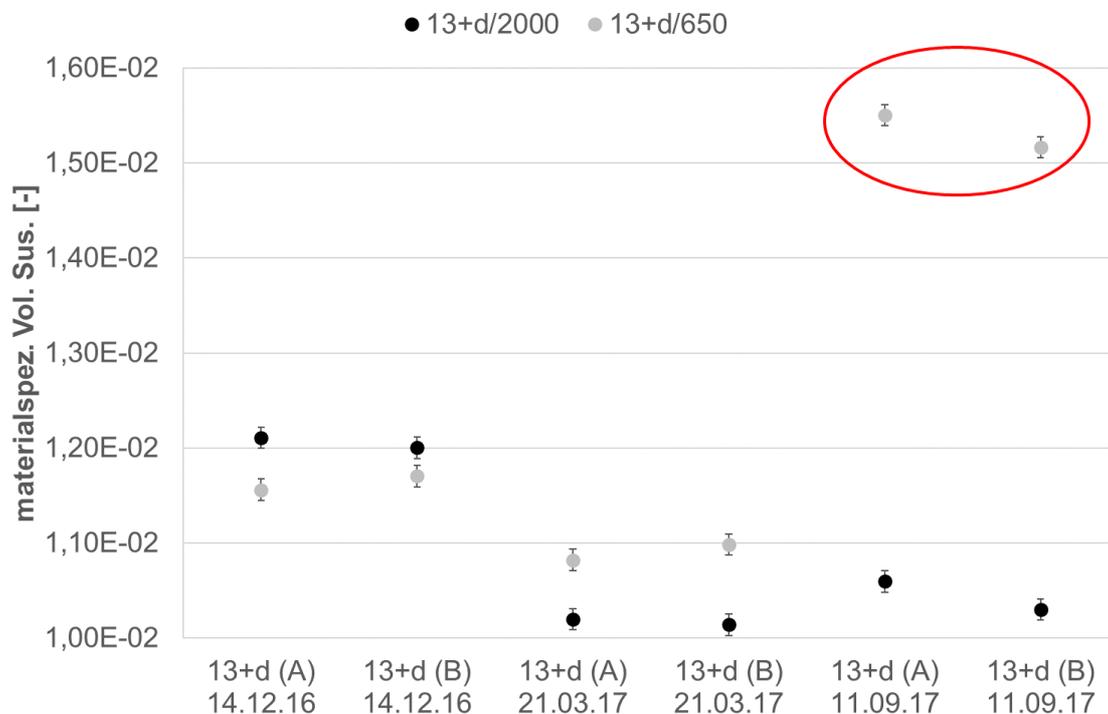


Abbildung 6-114: Vergleich materialspezifischer K dreier Chargen von 13+d bei 2000 und 650 U/min. Der rote Kreis markiert Ausreißer

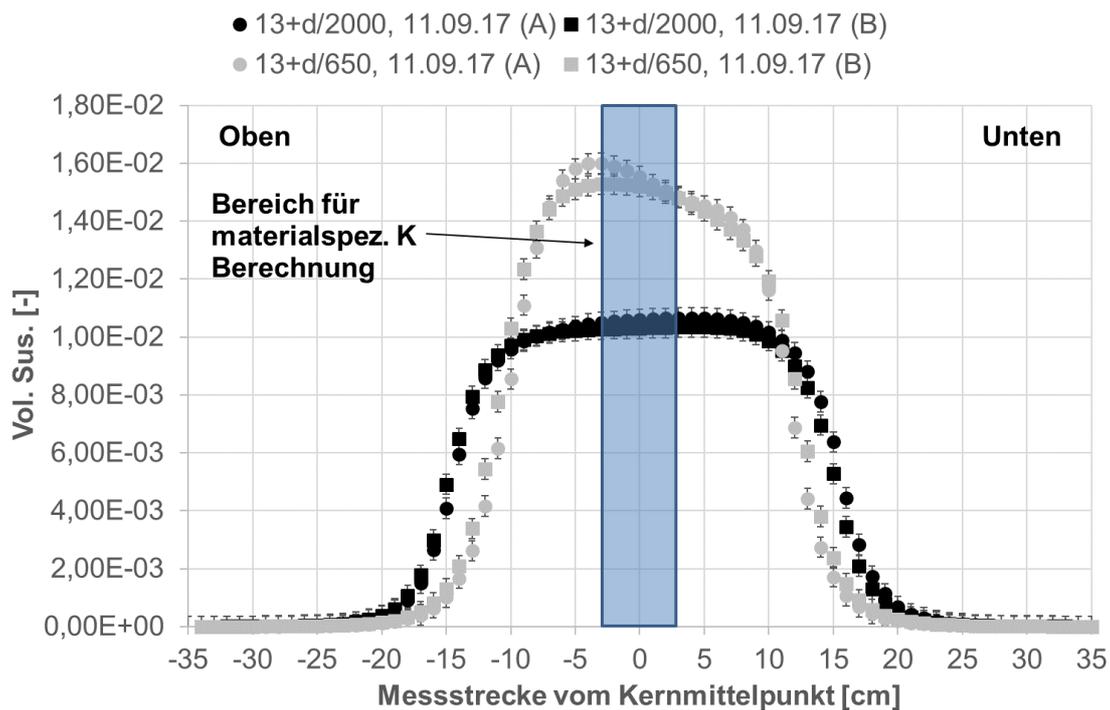


Abbildung 6-115: Vergleich der Messkurven 11.09.17 bei 2000 und 650 U/min

Tabelle 6-28: Mittelwerte und Spannweiten der Suspensionseigenschaften für 13+d für unterschiedliche Chargen und Anmischgeschwindigkeiten (V_m)

13+d						
V_m [U/min]	650			2000		
Charge	D [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]	D [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]
14.12.16	Ø1,45/ (1,43-1,46)	Ø3,8/ (3,3-4,3)	Ø77,5/ (75-80)	Ø1,51/ (1,5-1,52)	Ø2,8/ (2-3,6)	Ø113/ (108-118)
21.03.17	Ø1,48/ (1,48)	Ø1,9/ (1,8-2)	Ø50,5/ (50-51)	Ø1,40/ (1,4)	Ø1,2/ (0-2,4)	Ø51,0/ (50-52)
11.09.17	Ø1,52/ (1,52)	Ø12,0/ (11,2-12,8)	Ø42,0/ (42,0)	Ø1,33/ (1,33)	Ø0,8/ (0,8)	Ø48,5/ (48-49)

D=Suspensionsdichte, AM=Absetzmaß, MZ= Marshzeit

Insgesamt zeigen diese Untersuchungen, dass die magnetischen Signale beider Verfüllbaustoffe für fast alle Chargen und alle Anmischbedingungen (mit nur der einen Ausnahme 13+d vom 11.09.17 bei 650 U/min) stabil und nahezu identisch sind bei unterschiedlichen Chargen. Bei den übrigen Charakteristika (v.a. aber beim Absetzmaß) zeigt sich eine leichte Tendenz hin zu besseren Eigenschaften bei höheren Umdrehungszahlen (2000 U/min). Das hängt vermutlich mit dem schlechteren Aufschluss der Verfüllbaustoffbestandteile bei geringeren Anmischgeschwindigkeiten zusammen. Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass die Abtrennung von Magnetit

im Verfüllbaustoff und das Absetzmaß des Verfüllbaustoffs getrennt voneinander betrachtet werden müssen (siehe auch späteres Kap. 6.6.1.8). Kritische Absetzmaße $> 2\%$ werden erreicht (z.B. 07d vom 20.09.16 bei 650 U/min und 13+d vom 14.12.16 bei 650 und 2000 U/min), während der Magnetit im Verfüllbaustoff noch homogen verteilt ist.

6.6.1.7. Untersuchung des Einflusses von Sondenrohren auf das Messsignal mittels MS2C Messungen

Im nächsten Untersuchungsschritt wurden Probekörper mit einem 32er Sondenrohr hergestellt, um später auch mit CemTrakker und MS2H Bohrlochsensor befahren werden zu können. In diesem Kapitel wird kurz der Einfluss des Sondenrohrs auf das Messsignal beschrieben. Erwartungsgemäß resultiert aus dem Sondenrohr (+R) eine Verringerung des Messsignals, da das Volumen an Verfüllbaustoff in der Probe dadurch verringert wird (Abbildung 6-116). Die Verringerung ist jedoch gering mit 5,7% bei 07d und 3,2 % bei 13+d. Rein rechnerisch sollte die Abnahme ca. 4,4 % betragen (bei einem 152 mm Probendurchmesser). Die geringen Abweichungen zu diesem Wert sind auf Heterogenitäten bei der Probenherstellung und Messabweichungen zurückzuführen. Bei mehreren Rohren (Einfach- oder Doppel-U Rohr) würde die Abnahme natürlich entsprechend stärker ausfallen.

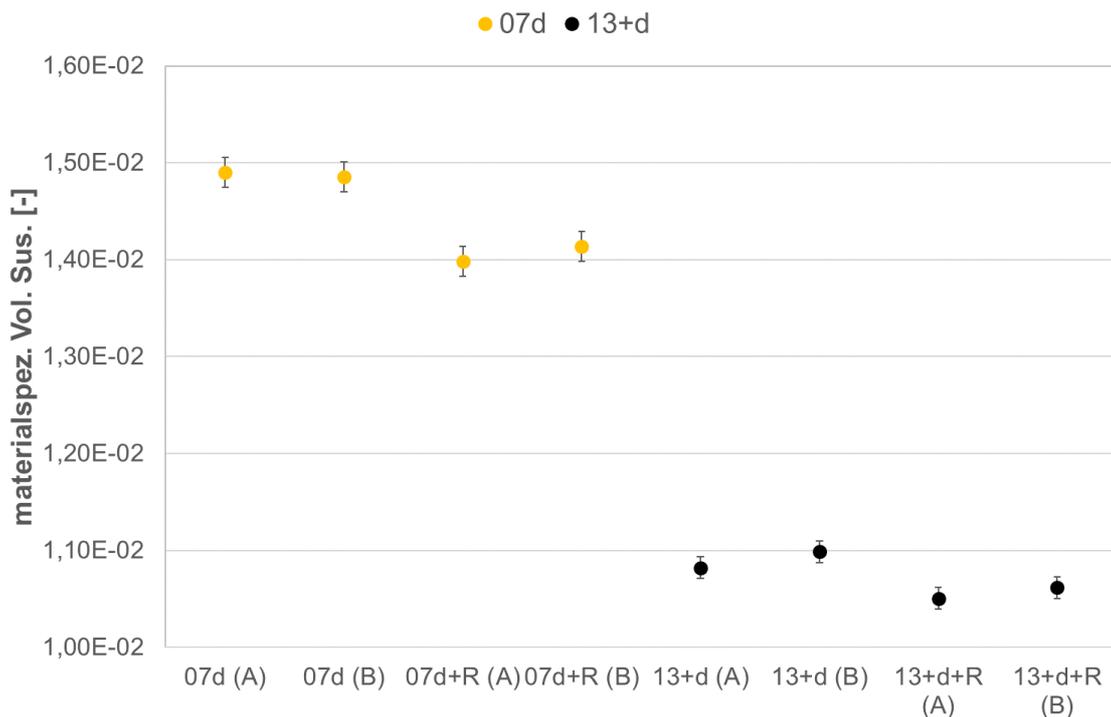


Abbildung 6-116: Vergleich der materialspezifischen K zweier Probe A & B mit Sondenrohr (+R) und ohne für 07d und 13+d

6.6.1.8. Untersuchung des Einflusses steigender W/F Verhältnisse auf das Messsignal mittels MS2C Messungen

Im Zuge dieser Arbeit wurde auch die Auswirkung von W/F-Änderungen auf das Messsignal untersucht. Prinzipiell sollten Abweichungen von Herstellerangaben beim Anmischen vermieden werden, da diese zu Qualitätsminderungen der Suspension und des schließlich ausgehärteten Verfüllbaustoffs führen können. Fehler beim Anmischprozess oder natürliche Wasserzutritte in die Bohrung können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Ziel ist es in diesem Kapitel, die Stabilitätsgrenzen der Verfüllbaustoffe zu ermitteln, dabei wird ausschließlich eine Erhöhung des W/F Verhältnisses betrachtet. Da bei diesen Untersuchungen auch wieder die Anmischgeschwindigkeit eine Rolle spielen kann, wurden alle Proben sowohl bei 650 U/min als auch bei 2000 U/min untersucht.

Abbildung 6-117 zeigt die materialspezifischen K bei unterschiedlichen W/F für den Verfüllbaustoff 07d bei 650 und 2000 U/min. Für die Untersuchungen wurden 50 cm Proben hergestellt, da bei Erhöhung des W/F auch von einem zunehmenden Absetzmaß auszugehen ist, was die effektive Probenlänge verkürzt und so zu Randeffekten bei der Suszeptibilitätsmessung führen kann (siehe Kap. 6.6.1.2). Die 50 cm Proben haben dahingehend genügend Längenspuffer. Die materialspezifischen K wurden wie in den vorherigen Kapiteln aus 5 Messwerte entlang der x-Achse von $x = -2$ bis $x = 2$ errechnet (siehe Abbildung 6-118). In Abbildung 6-119 sind zusätzlich die Suspensionsdichten der Mischungen bei den unterschiedlichen W/F aufgetragen. Das Standard W/F, sowie die Standard Dichte laut Hersteller sind blau markiert. In Abbildung 6-120 ist das Absetzmaß der Proben gegen W/F aufgetragen. Das kritische Absetzmaß ist als roter Strich markiert. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Das materialspezifische K nimmt mit steigendem W/F ab, gleichzeitig nimmt auch die Suspensionsdichte ab und das Absetzmaß steigt.
- Die Dichteabnahme bei W/F Erhöhung erscheint bei 650 U/min steiler, als bei 2000 U/min. Faktisch müsste die Dichte identisch sein bei 650 und 2000 U/min. Vermutlich ist dieser Effekt auf eine weniger homogene Dichteverteilung bei 650 U/min gegenüber 2000 U/min zurückzuführen, hervorgerufen durch ein schlechteres Aufschließen des Verfüllbaustoffs.
- Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen des materialspezifischen K. Bei 650 U/min trennt sich der Magnetit im Verfüllbaustoff bereits bei $W/F > 0,39$ ab, bei 2000 U/min erst bei $W/F > 0,42$. Die „materialspezifischen“ K stellen sich entsprechend als Ausreißer dar (rot umkreist). Wie diese Anomalien rechnerisch zustande kommen ist in Abbildung 6-117 exemplarisch dargestellt. Das materialspezifische K wird immer aus demselben x-Achsenabschnitt als Mittelwert errechnet. Wirklich materialspezifisch ist es jedoch nur bei Proben mit homogen verteiltem Magnetit bzw. einem Plateau. Dies war bei 650 U/min bis $W/F = 0,39$, und bei 2000 U/min bis $W/F = 0,42$ der Fall.
- Auch die Absetzmaße der Proben (Abbildung 6-120) bestätigen eine bessere Qualität bei höherer Mischgeschwindigkeit. So zeichnet sich bei 2000 U/min ein langsames, stetig zunehmendes Absetzmaß bei steigendem W/F ab, während bei 650 U/min das Absetzmaß ausgehend vom bereits kritischen Ausgangswert (bei $W/F = 0,3$) schlagartig einen hohen Wert annimmt und sich danach nur noch geringfügig verändert.

- Bei 650 U/min liegt das Absetzmaß schon beim Standard W/F von 0,3 oberhalb der laut LQS-EWS kritischen Grenze von 2 Vol. %. Bei 2000 U/min erst bei einem W/F von >0.36.
- Das kritische Absetzmaß des Verfüllbaustoffs wird erreicht, während jedoch der Magnetit im Verfüllbaustoff noch homogen verteilt ist. Das bedeutet, dass das Absetzmaß des Verfüllbaustoffs und das Absetzen des Magnetits im Verfüllbaustoff als voneinander entkoppelte Qualitätskriterien zu betrachten sind.

Zu erwähnen ist noch, dass die Suspensionsdichten bei 650 U/min und W/F von 0,42, sowie bei 2000 U/min und W/F von 0,45 als Ausreißer (rot markiert) betrachtet wurden. Es liegt nahe, dass die starke Verdünnung der Verfüllbaustoff suspension, bereits beim Anmischen und während des (wenn auch nur sehr kurzem) Stillstandes der Suspension nach abstellen des Rührers, zu einer bereits deutlichen Fraktionierung der Verfüllbaustoffbestandteile (v.a. dem Magnetit) im Mischbehälter führt. Somit können die Messwerte der Suspensionsdichte im kritischen W/F-Bereich nicht mehr als repräsentativ angesehen werden. Bei 650 U/min ist dies wie bereits erwähnt, vermutlich auch schon bei geringeren W/F der Fall durch das schlechtere Aufschließen der übrigen Bestandteile.

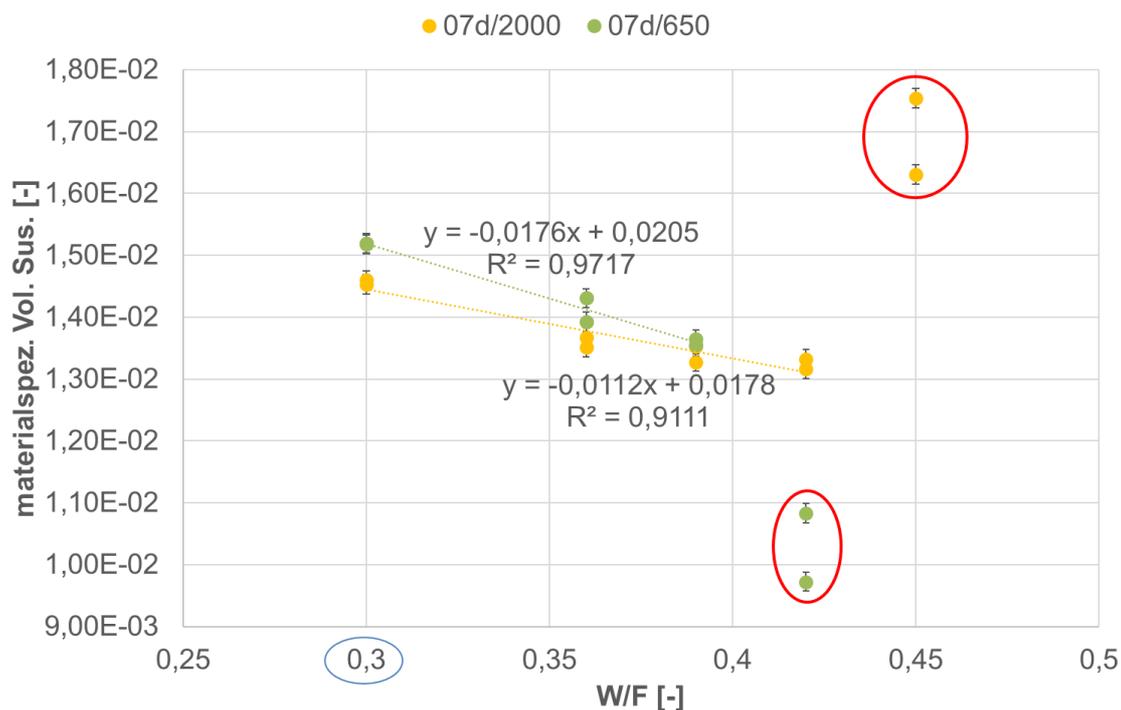


Abbildung 6-117: Einfluss steigender W/F auf die spezifische K für 07d und variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, die roten Kreise markieren Ausreißer

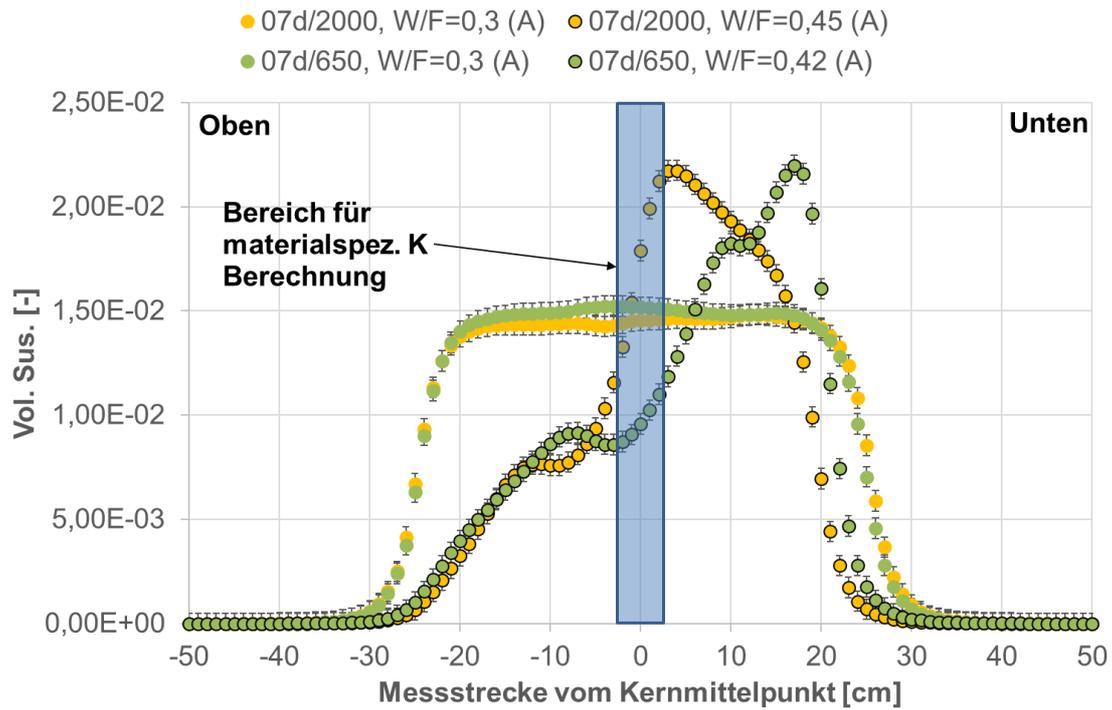


Abbildung 6-118: Berechnung des materialspezifischen K

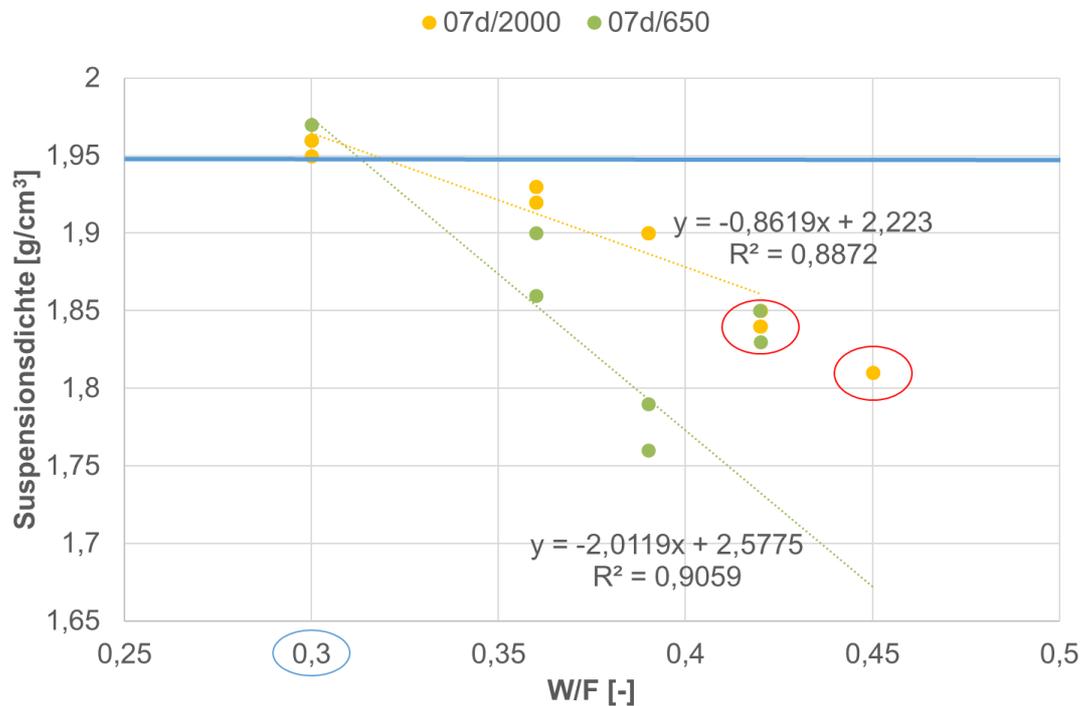


Abbildung 6-119: Einfluss steigender W/F auf die Suspensionsdichte für 07d bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, die roten Kreise markieren Ausreißer

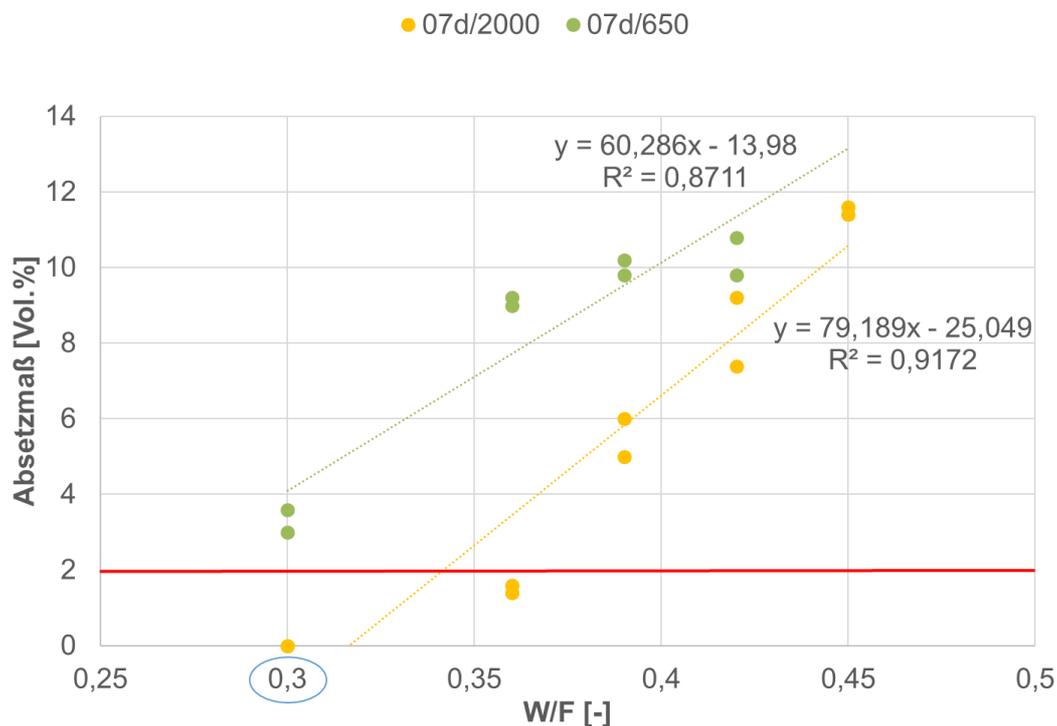


Abbildung 6-120: Einfluss steigender W/F auf das Absetzmaß für 07d bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F

Abbildung 6-121 zeigt das materialspezifische K bei unterschiedlichen W/F für den Verfüllbaustoff 13+d bei 650 U/min und 2000 U/min. Abbildung 6-122 zeigt die Berechnungsgrundlage von K und Abbildung 6-123 das Absetzmaße der einzelnen Proben. Die Suspensionsdichte wird in diesem Fall nicht gezeigt, da es bei der Messung vermutlich zu Fehlern gekommen ist, die auf die vermehrte Bildung von Schaum beim Anmischen zurückzuführen sind. Ein steigendes W/F bei einem Verfüllbaustoff mit ohnehin initialem hohem W/F scheint dies zu begünstigen.

Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Bei 650 U/min reagiert der Verfüllbaustoff 13+d sehr empfindlich gegenüber einer Erhöhung des W/F. Bereits 10% Erhöhung (auf W/F=0,88) führen zu einer starken Abtrennung des Magnetits im Verfüllbaustoff (siehe Abbildung 6-122). Das Absetzmaß ist bereits bei W/F=0,8 kritisch.
- Bei 2000 U/min stellt sich der Verfüllbaustoff wesentlich robuster dar. Die kritische Destabilisierung des Verfüllbaustoffs erfolgt erst ab einem W/F > 0,96 (Absetzmaß > 2 Vol.%), das abtrennen des Magnetits ab einem W/F > 1,04.

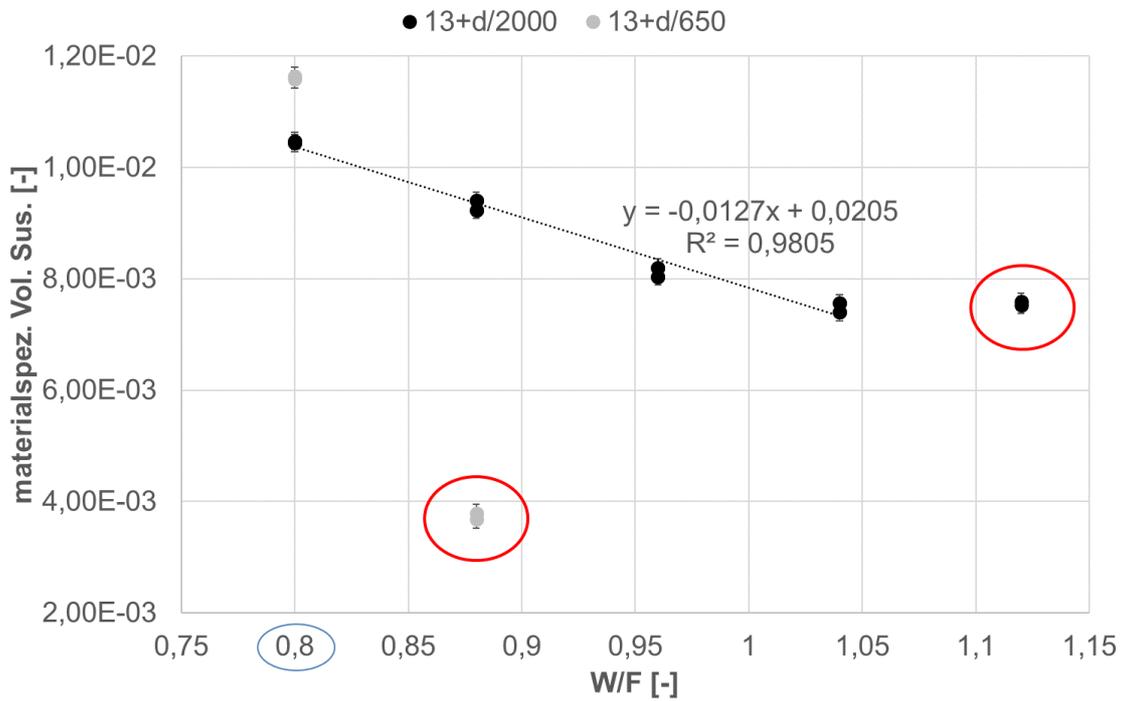


Abbildung 6-121: Einfluss steigender W/F auf die spezifische K für 13+d und variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, die roten Kreise markieren Ausreißer

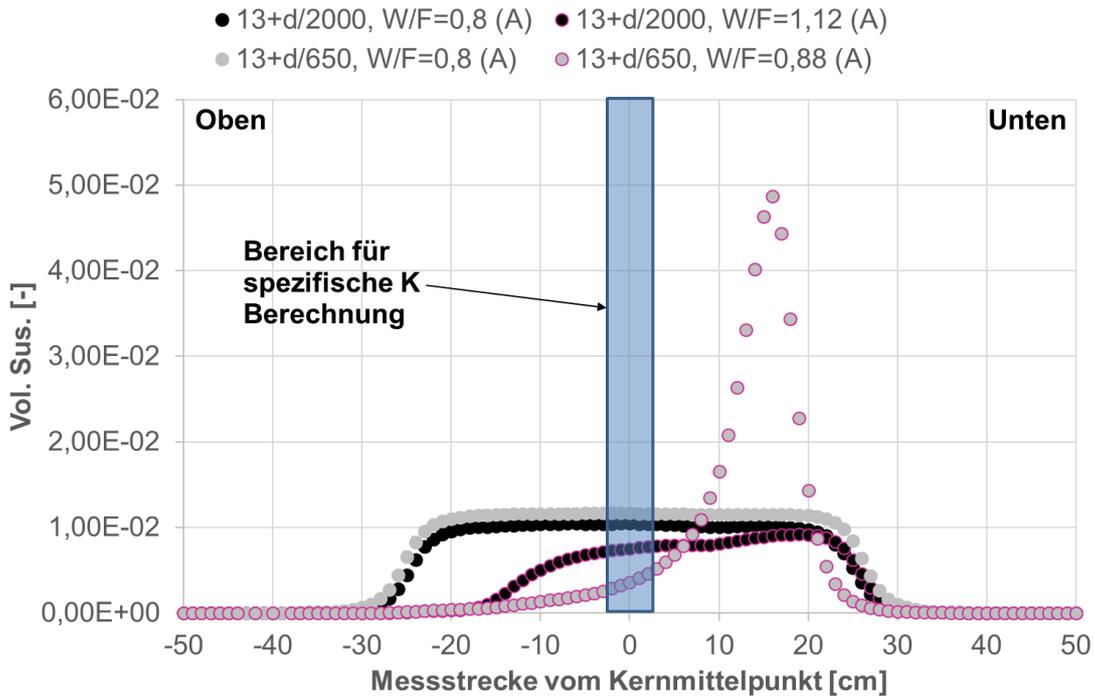


Abbildung 6-122: Berechnung des materialspezifischen K

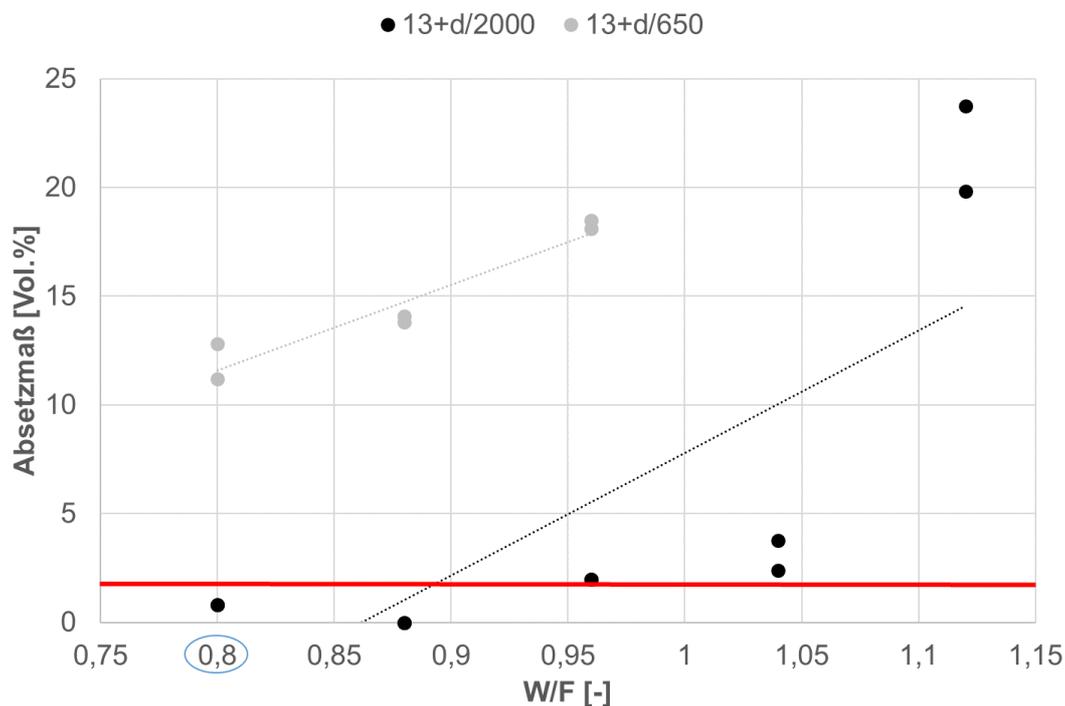


Abbildung 6-123: Einfluss steigender W/F auf das Absetzmaß für 13+d bei variablen Anmischbedingungen. Der rote Strich markiert das kritische Absetzmaß nach LQS-EWS

Ganz allgemein lässt sich sagen, dass sich beide Verfüllbaustoffe bei höheren Anmischgeschwindigkeiten robuster darstellen. Das deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus Kap. 6.6.1.6. Eine wichtige Erkenntnis ist auch, dass das kritische Absetzmaß bei W/F Erhöhungen bei beiden Verfüllbaustoffen früher erreicht ist, als das deutliche Absetzen des Magnetits im Verfüllbaustoff. Somit ist das Absetzmaß zumindest für diese beiden Verfüllbaustoffe der übergeordnete Qualitätsparameter von beiden. Die Frage ist, wie sich das bei anderen kommerziellen Verfüllbaustoffen darstellt.

6.6.1.9. Untersuchung des Einflusses geologischer Gegebenheiten auf das Messsignal mittels MS2C Messungen

Es gilt zu beachten, dass das Messsignal von Magnetit dotierten Verfüllbaustoffen u.U. auch von der umgebenden Geologie beeinflusst werden kann. Der Einfluss ist stark abhängig von den Gesteinen bzw. den gesteinsbildenden Mineralen, die an einem bestimmten Standort anzutreffen sind. Die meisten gesteinsbildenden Mineralien sind nur schwach, und zwar para- und diamagnetisch (Schreiner & Kreysing 1998) und somit unproblematisch; d.h. es sind bei Gesteinen, die aus solchen Mineralen aufgebaut sind, keine Störsignale zu erwarten.

Nur einige wenige Eisenminerale sind ferri-ferromagnetisch. Es sind dies gewisse Fe-Minerale, die in der Spinell-Struktur kristallisieren, Magnetit, Maghemit, Franklinit, Chromit, Jakobsit, ferner Magnetkies (Pyrrhotin), Illmenit und Hämatit (Niggli 1948, Schreiner & Kreysing 1998). Wie stark

deren Signal ausgebildet ist, hängt von einigen Faktoren ab, wie z.B. der Fe-Einbau in die Minerale, sowie der %-Anteil der Minerale im Gestein. Das führt zu z.T. großen Schwankungen der magnetischen Suszeptibilität auch bei der gleichen Gesteinsart (Abbildung 6-124).

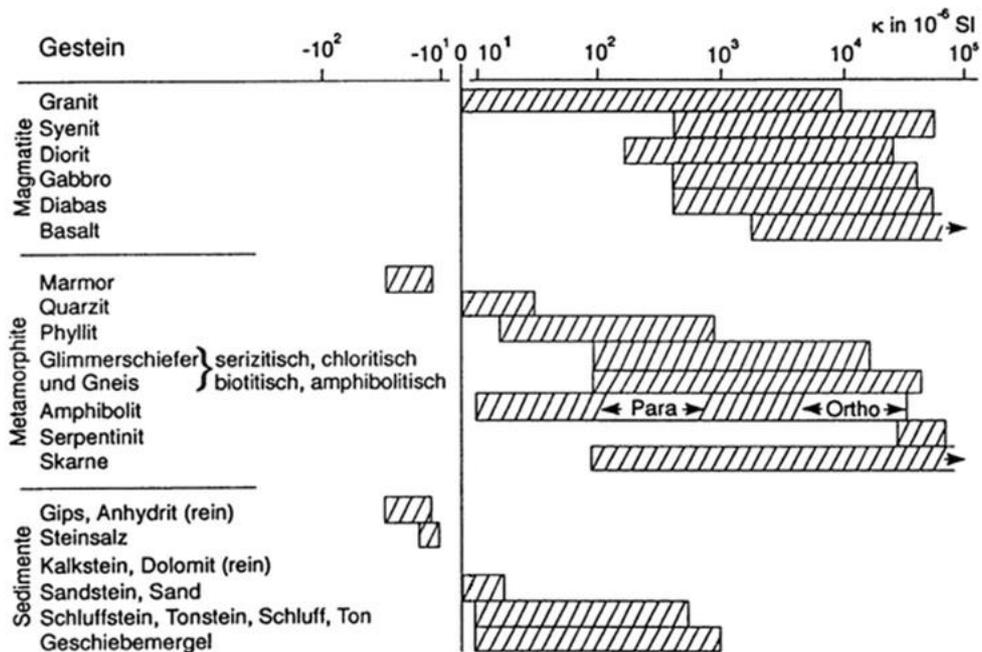


Abbildung 6-124: Wertebereich der magnetischen Suszeptibilitäten verschiedener Gesteine (aus Schön 1983)

Im Hinblick auf unsere Region sind vor allem Sedimente (Sand, Kies, Schluff und Ton in der Rheinebene), sowie typische Gesteine der Rheingraben-schultern wie z.B. Granit, Gneis, Buntsandstein und Muschelkalk zu betrachten. Sedimente haben nach Schön (1983) die niedrigsten Suszeptibilitäten, wobei es da sicherlich auch Ausnahmen gibt wie z.B. Eisenoolithe (Jura). Betrachtet man die Maximalwerte die laut Abbildung 6-124 von Ton- und Schluffsteinen gebildet werden, so sind diese mit max. 1E-03 SI als unproblematisch zu bewerten. Dies bedeutet, dass hier kein wesentlicher Störeinfluss im Hinblick auf die Messung der dotierten Verfüllbaustoffe (1,2-1,5E-02 SI für 07d und 13+d) zu erwarten ist. Dies wurde auch mit Laboruntersuchungen bestätigt (Abbildung 6-125). Hierzu wurden Ø110 mm Proben in 30 cm Länge mit jeweils Sand und Ton gefüllt hergestellt und sowohl trocken (tr.) als auch gesättigt (ges.) mit dem MS2C gemessen.

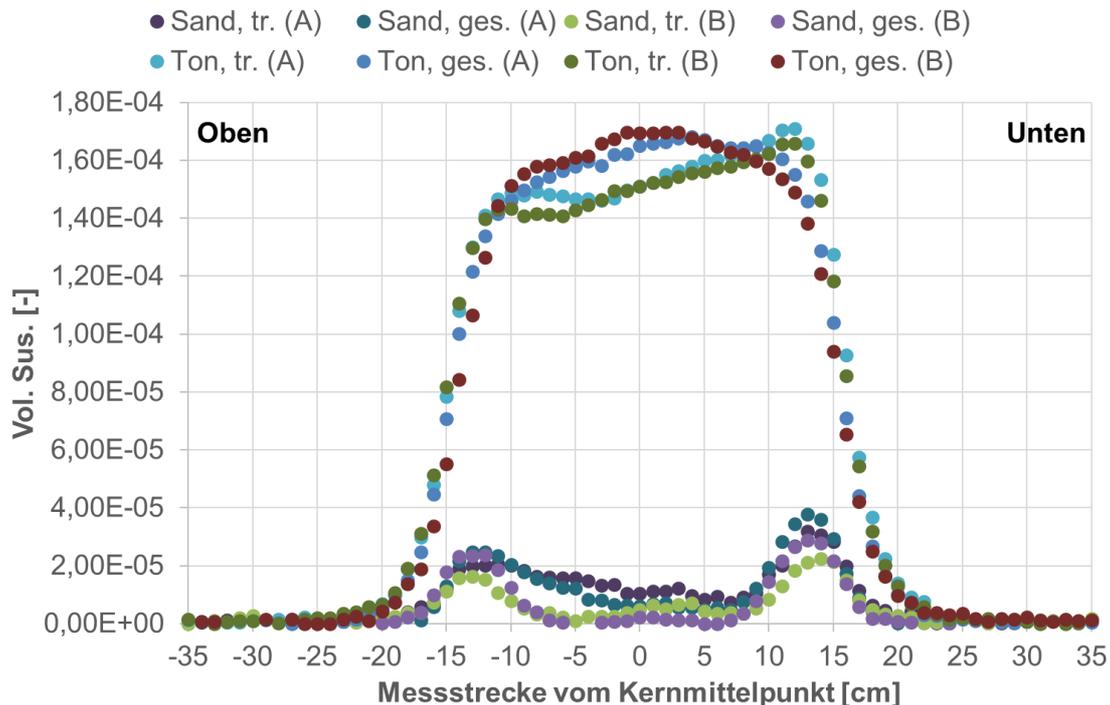


Abbildung 6-125: Sand und Ton (trocken, gesättigt, 30 cm Länge, Ø110 mm)

Auf den ersten Blick können die Differenzierungen und Wertebereiche für Sedimente aus Schön (1983) bestätigt werden. Das Signal des Sandes ist schwächer als das des Tons. Ein Einfluss von Wasser auf das Messsignal ist beim Sand nicht zu erkennen. Eine interessante Beobachtung gibt es beim Ton. Im trockenen Zustand erkennt man, dass das Signal zur Unterseite hin zunimmt, was mit einer Verdichtung des Tons im unteren Bereich durch die Schwerkraft und das Eigengewicht der Probensäule erklärt werden kann (ähnliches ist auch beim Sand zu erkennen). Gibt man nun Wasser zum Ton hinzu, so wird das Signal homogen (parabelförmig). Dies kann damit erklärt werden, dass der hier verwendete Bentonit durch Zugabe von Wasser aufquillt und so die Probe mit der Zeit komplett und homogen ausfüllt.

Weitere Untersuchungen auch an Festgesteinen wurden direkt mit dem CemTrakker und MS2H durchgeführt. Diese werden im Kap. 6.6.1.16 erläutert.

6.6.1.10. Untersuchung der Eindringtiefe des CemTrakker und MS2H-Sensors

Im Rahmen der CemTrakker Untersuchungen wurde gleich zu Beginn eine Versuchsreihe zur Bewertung der Eindringtiefe des Sensors gestartet. Hierzu wurden neben dem bisher verwendeten Standarddurchmesser für Proben von Ø110 mm, weitere Proben mit 32er Sondenrohr hergestellt in den Maßen Ø40 mm, 50 mm, 75 mm und 125 mm. Die Wahl dieser Durchmesser war von den im Baumarkt erhältlichen KG-Rohr Durchmessern vorgegeben. Abbildung 6-126 zeigt exemplarisch die Messung von zwei Ø110 mm Proben jeweils für 07d und 13+d. Wie auch bei den MS2C Messungen bildet sich bei Proben mit homogen verteiltem Magnetit ein Plateaubereich aus, aus dem man einen materialspezifischen Messwert als Mittelwert ermitteln kann. Eine entsprechende Auswertung für beide Verfüllbaustoffe und alle Durchmesser ist in Abbildung

6-127 dargestellt. Die Mächtigkeit des Verfüllbaustoffs um das 32er Sondenrohr in Abhängigkeit vom Probendurchmesser ist in Tabelle 6-29 abzulesen.

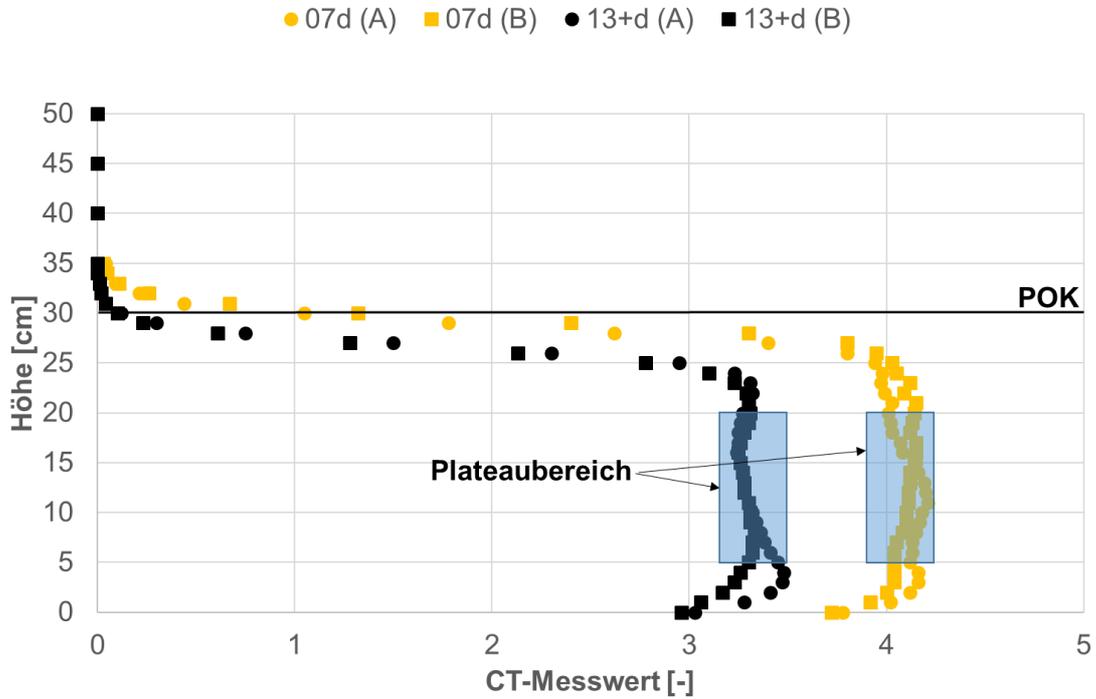


Abbildung 6-126: Exemplarische CemTrakker (CT) Messung mit 07d und 13+d (30 cm Länge, Ø110 mm, POK = Probenoberkante)

Tabelle 6-29: Zusammenhang zwischen Probendurchmesser und Verfüllbaustoffmächtigkeit um das Sondenrohr

Probendurchmesser [mm]	Verfüllbaustoffmächtigkeit um Sondenrohr [mm]
40	2.2
50	7.2
75	19.6
110	35.8
125	43.3

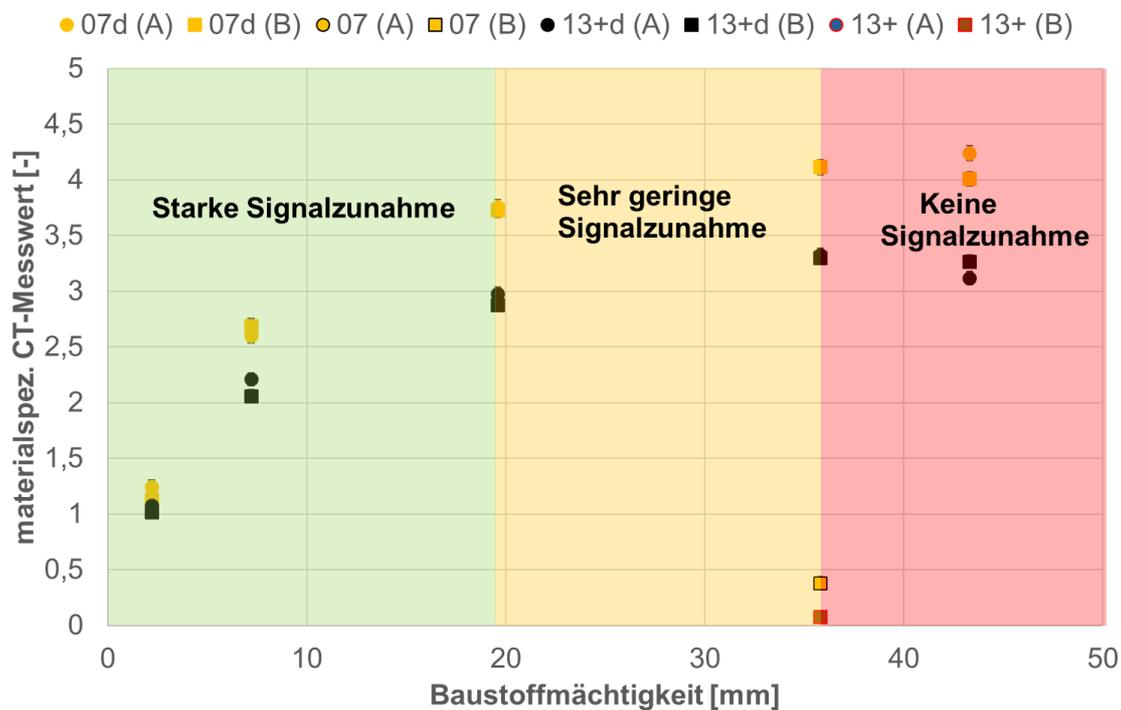


Abbildung 6-127: Untersuchung der Eindringtiefe des CemTrakker (CT) mit 07d & 13+d (30 cm Länge; variabler Durchmesser)

Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Ein Anstieg des Messsignals von 2,2 zu 35,8 mm Verfüllbaustoffmächtigkeit.
- Das Messsignal bei 43,3 mm überschneidet sich bereits mit dem Signal bei 35,8 mm Mächtigkeit.
- Der Anstieg des Messsignals von 19,6 zu 35,8 ist nur noch geringfügig, die größte Sensitivität des Sensors liegt also im Bereich bis 20 mm Verfüllbaustoffmächtigkeit, was der sensorspezifischen Eindringtiefe entspricht.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse lässt sich also bereits feststellen, dass der CemTrakker prinzipiell weniger geeignet ist, den gesamten Verfüllbaustoffkörper einer EWS-Bohrung zu erfassen, welche nach VDI 4640 im Schnitt $\varnothing 150$ mm beträgt (Variationen nach oben und unten sind je nach Einzelfall möglich). Für Messungen nach dem Verfüllvorgang ist das als kritisch zu sehen, da z.B. Fehlstellen in Form von Luft- und Wasserblasen oder Kanälen die außerhalb der Reichweite liegen, nicht erfasst werden können. Selbst beim Befahren mehrerer Sondenrohre könnte man den Nachweis von Fehlstellen nicht zweifelsfrei durchführen, da der Verlauf der Sondenrohre in der Bohrung generell nicht bekannt ist. Ein weiteres damit zusammenhängendes Problem ist die Möglichkeit von z.B. zwei oder mehreren aneinander liegenden Rohren. Somit würde beim Befahren des einen Rohres, das/die andere/n Rohr/e als Fehlstelle/n gemessen werden. Um die Eindringtiefe zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 6-128 eine maßstabsgetreue Darstellung einer Standard $\varnothing 150$ mm Bohrung mit 32er Duplex-Sonde + Verfüllrohr und der CemTrakker Reichweite (blauer Ring) um ein EWS-Rohr.

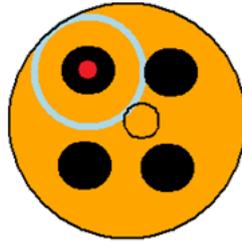


Abbildung 6-128: Maßstabsgetreue Eindringtiefe (hellblauer Ring) des CemTrakker (roter Punkt) in einer Ø150 mm Bohrung und 32er-Duplex-EWS

Im Weiteren wurde die Eindringtiefe des MS2H Bohrlochensors untersucht. Hierzu wurden, auch zum direkten Vergleich, die gleichen Proben gemessen und auch auf gleiche Weise ausgewertet wie zuvor beim CemTrakker. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 6-129 gezeigt.

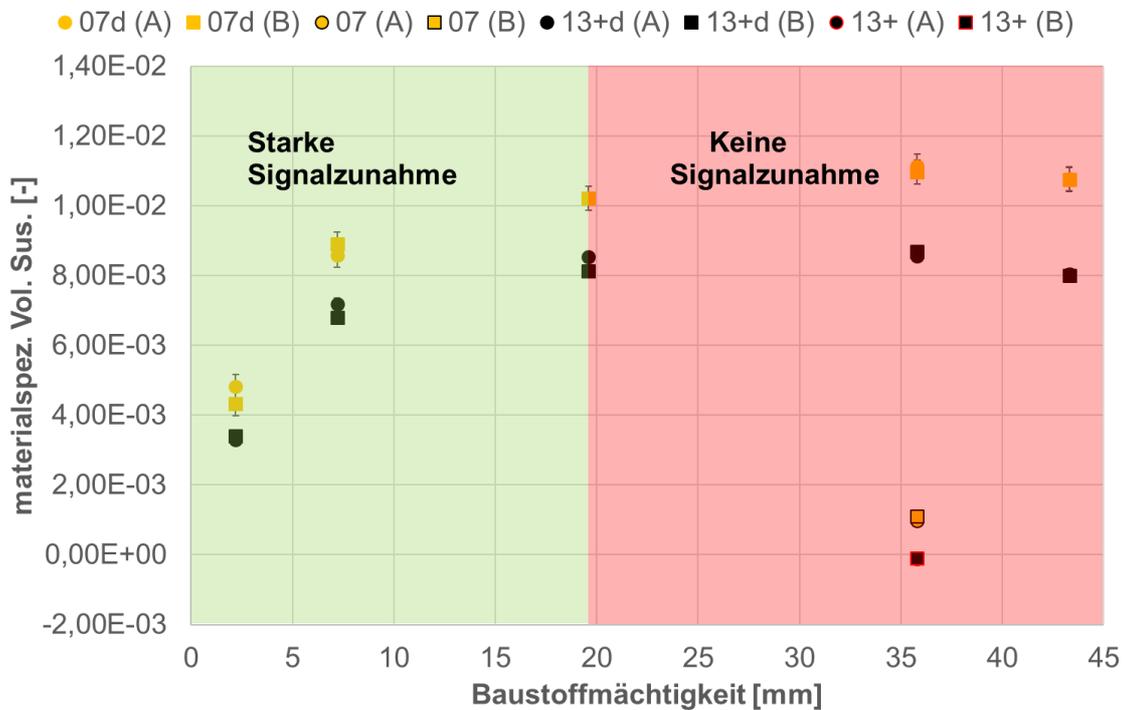


Abbildung 6-129: Untersuchung der Eindringtiefe des MS2H mit 07d & 13+d (30 cm Länge; variabler Durchmesser)

Folgenden Beobachtungen können gemacht werden:

- Ein Anstieg des Messsignals von 2,2 zu 19,6 mm Verfüllbaustoffmächtigkeit.
- Ab 19,6 mm Verfüllbaustoffmächtigkeit erscheinen die Messwerte stabil (Plateau).
- Beim Vergleich mit den CemTrakker Messungen können Rückschlüsse auf den Ursprung der bisher noch unklaren CemTrakker Messwerte gezogen werden. Die CemTrakker Messung entspricht grob einem Faktor 340-350 der MS2H-Messung. Dies wurde iterativ,

durch Anpassung aller „MS2H/Verfüllbaustoffmächtigkeit“-Wertepaare an die „CemTrakker/Verfüllbaustoffmächtigkeit“-Wertepaare, abgeschätzt (Abbildung 6-130).

- Eine solche Vereinfachung der ursprünglichen magnetischen Suszeptibilitätswerte macht Sinn, da die CemTrakker Messtechnik speziell auf EWS-Baustellen zum Einsatz kommt. Der Verpressvorgang läuft in der Regel recht zügig ab, weshalb es sinnvoll ist, es dem Geräteführer möglichst einfach zu machen, was die Bedienbarkeit und Interpretation der angezeigten Daten angeht. Dafür sind ganze Zahlen wie sie vom CemTrakker ausgegeben werden natürlich wesentlich einfacher und schneller zu erfassen und zu bewerten, als die SI-Einheiten des Bartington Messsystems.
- Der MS2H zeigt im Wesentlichen auch ähnliche Ergebnisse bzgl. der Eindringtiefe mit ca. 20 mm.

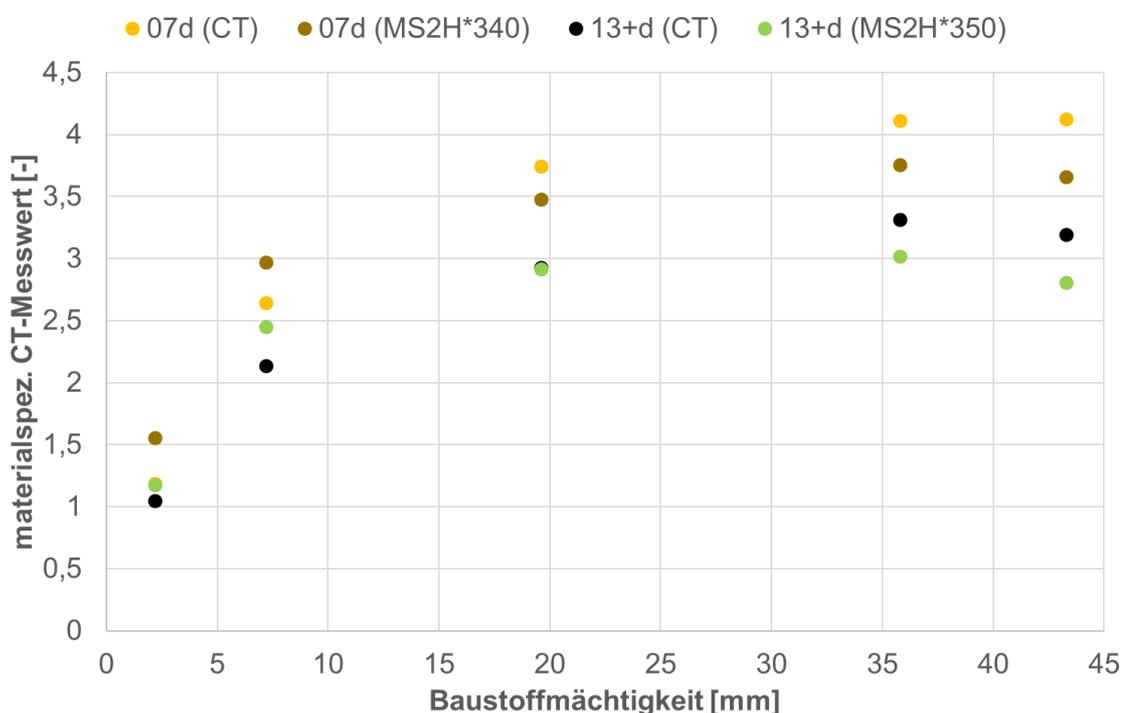


Abbildung 6-130: Iteration zur Abschätzung des Umrechnungsfaktors von MS2H zu CemTrakker (CT)

6.6.1.11. Fehlstellenuntersuchungen mittels CemTrakker und MS2H-Sensor

Abbildung 6-131 zeigt exemplarische Ergebnisse von Fehlstellenmessungen mit dem CemTrakker im Messstand aus Kap. 5.15. Als Fehlstellen wurden Holzkugeln unterschiedlicher Durchmesser ($\varnothing 10$ -40 mm) verwendet. Diese wurden mittig an die 32er Sondenrohre mit Klebeband befestigt, in die Probenrohre eingelassen und verfüllt.

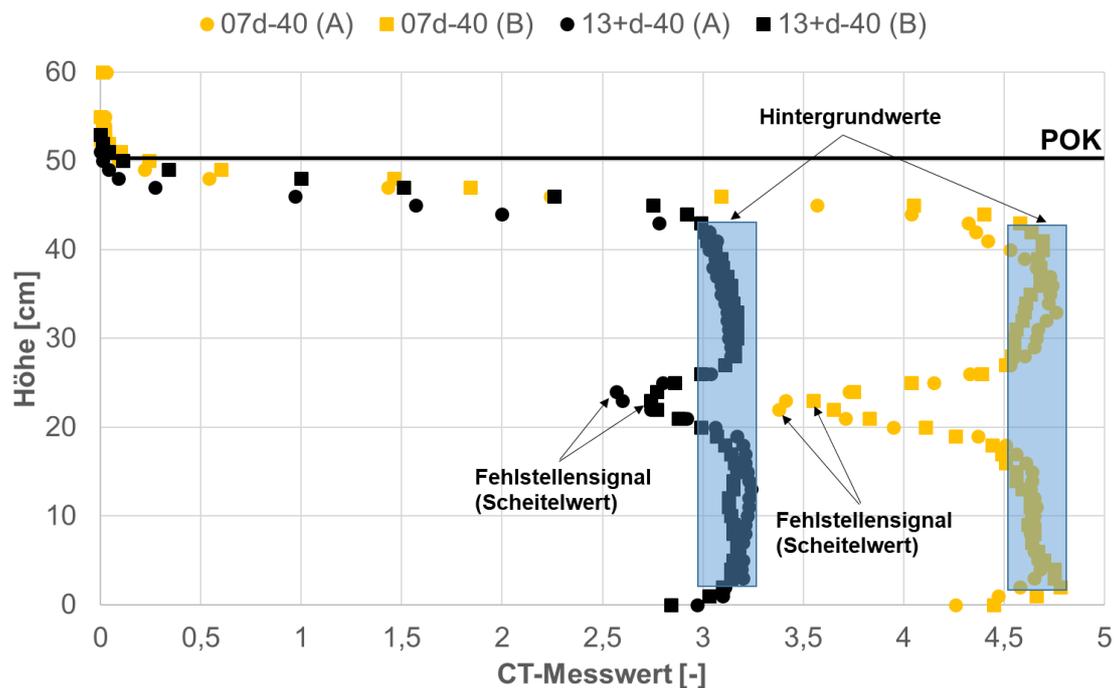


Abbildung 6-131: Untersuchung blasenförmige Fehlstellen ($\varnothing 40$ mm) direkt am Sondenrohr in 07d und 13+d (50 cm Länge; $\varnothing 110$ mm, POK = Probenoberkante) mit dem CemTrakker (CT)

Da für jede Probe jeweils eine Verfüllbaustoffmischung hergestellt werden musste, lassen sich die Proben wegen des bestehenden Herstellungsfehlers (erkennbar an der Streuung der Hintergrundwerte und Fehlstellensignale) nicht miteinander vergleichen. Um eine korrekte Bewertung der Fehlstellendetektion machen zu können, wurde somit für jede Probe Δm ermittelt. Dies entspricht der Differenz des Scheitelwerts der Fehlstellenanomalie und dem durchschnittlichen Hintergrundsignal der betrachteten Probe. Die Ergebnisse dieser Betrachtung für alle Fehlstellendurchmesser sind in Abbildung 6-132 dargestellt. Außerdem wurde die maximal beobachtete Spannweite bei den Hintergrundwerten ($=0,4$ für 07d und $0,2$ für 13+d) als Linie eingezeichnet. Ist Δm bei einer Probe unterhalb dieser Linie, gilt die Fehlstelle als nicht detektierbar, da sie im Streubereich der Hintergrundwerte liegt.

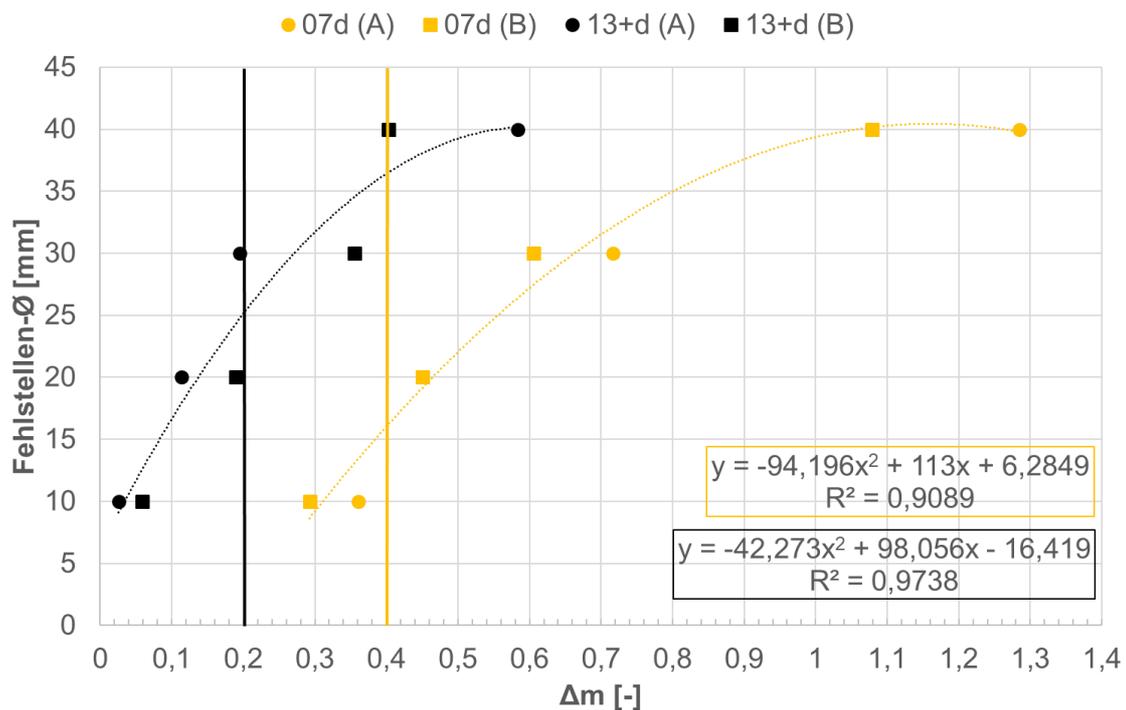


Abbildung 6-132: Auflösbarkeit von Fehlstellen direkt am Sondenrohr (Ø10-40 mm) mit dem CemTrakker

Anhand der Ergebnisse kann man folgendes ableiten:

- Ab Ø20-30 mm können kugelförmige Fehlstellen direkt am Rohr aufgelöst werden.
- Das Δm der Ø10 mm Fehlstellenproben für 07d und der Ø10-20 mm Fehlstellenproben für 13+d liegt im Bereich der Hintergrundschwankungen und kann somit nicht mehr aufgelöst werden.
- Die z.T. auftretenden Schwankungen zwischen A & B Proben können auf Abweichungen der Sensorlage im Sondenrohr zurückgeführt werden. Der Sensor hat 16 mm außen-Ø während das Sondenrohr 26 mm innen-Ø hat, so dass ein leichtes Schlackern innerhalb eine 4,5 mm breiten Ringraums möglich ist. Das kann sich u.U. deutlich auf den Messwert auswirken.
- Δm ist für 07d größer als für 13+d. Das liegt daran, dass 07d generell eine höhere Suszeptibilität als 13+d aufweist. Dadurch ist der Kontrast zwischen Hintergrundsignal und Fehlstellensignal stärker bei 07d.
- Der Kontrastunterschied für 07d und 13+d spricht für eine bessere Auflösbarkeit von Fehlstellen in Verfüllbaustoffen mit stärkerem Suszeptibilitätssignal. Zwar steigt mit zunehmendem Signal auch die Streuung der Hintergrundmessung leicht an, aber der stärkere Kontrast bleibt bei 07d dennoch erhalten.

Da Fehlstellen direkt am Sondenrohr einem „Best case scenario“ im Hinblick auf die Detektierbarkeit entsprechen, wurden im nächsten Schritt Verfüllbaustoffproben mit Ø160 mm hergestellt

und bei diesen die $\varnothing 40\text{mm}$ Fehlstellen an den Probenrand platziert, was einem „Worst case scenario“ entspricht (siehe Abbildung 5-12, 2).

Abbildung 6-133 zeigt nochmal die Ergebnisse der beiden Proben mit $\varnothing 40\text{mm}$ Fehlstellen aus Abbildung 6-131, im Vergleich zu den Proben mit Fehlstellen gleichen Durchmessers am Probenrand. Deutlich zu erkennen ist, dass die Proben mit der Fehlstelle am Probenrand das Signal einer Hintergrundmessung aufweisen. Der Raum zwischen Fehlstellen und Sondenrohr beträgt dabei nur 20 mm. Das bestätigt nochmals die Abschätzung einer Eindringtiefe des Sensors von ca. 20 mm.

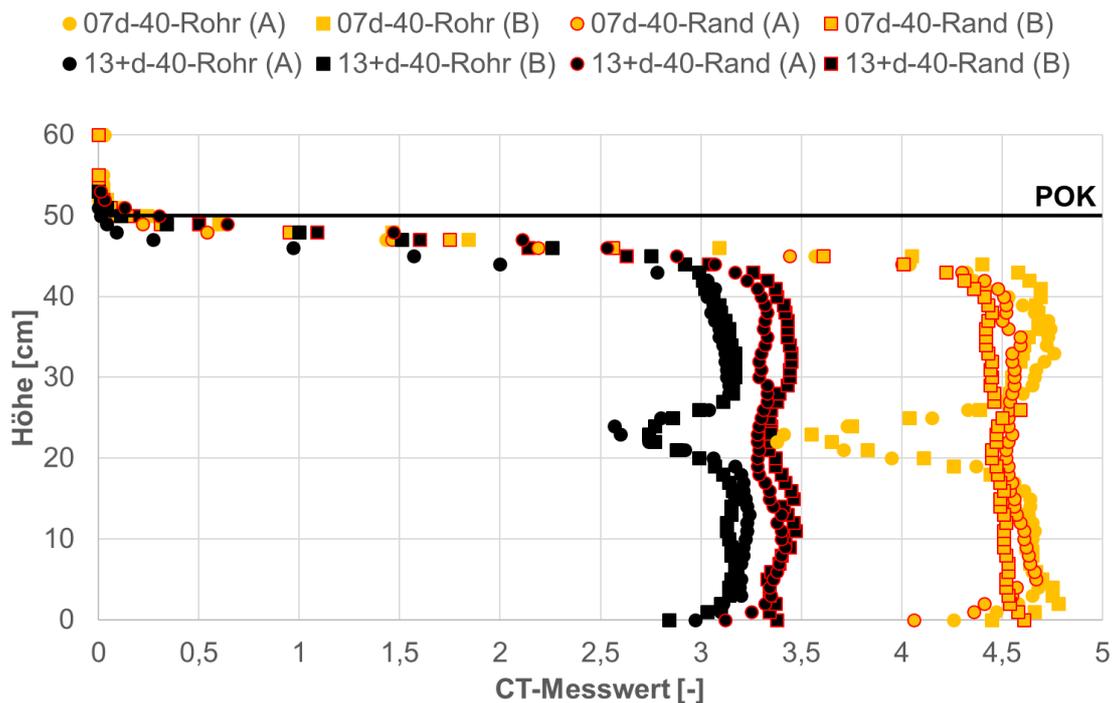


Abbildung 6-133: Untersuchung blasenförmiger Fehlstelle ($\varnothing 40\text{ mm}$) am Rohr und am Probenrand in 07d und 13+d (50 cm Länge, $\varnothing 110$ & 160 mm , POK = Probenoberkante) mit dem CemTrakker (CT)

Im Weiteren wurden Fehlstellenuntersuchungen auch mit dem MS2H Bohrlochsenors durchgeführt. Hierzu wurden, auch zum direkten Vergleich, die gleichen Proben gemessen und auch auf gleiche Weise ausgewertet wie zuvor beim CemTrakker. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 6-134 gezeigt.

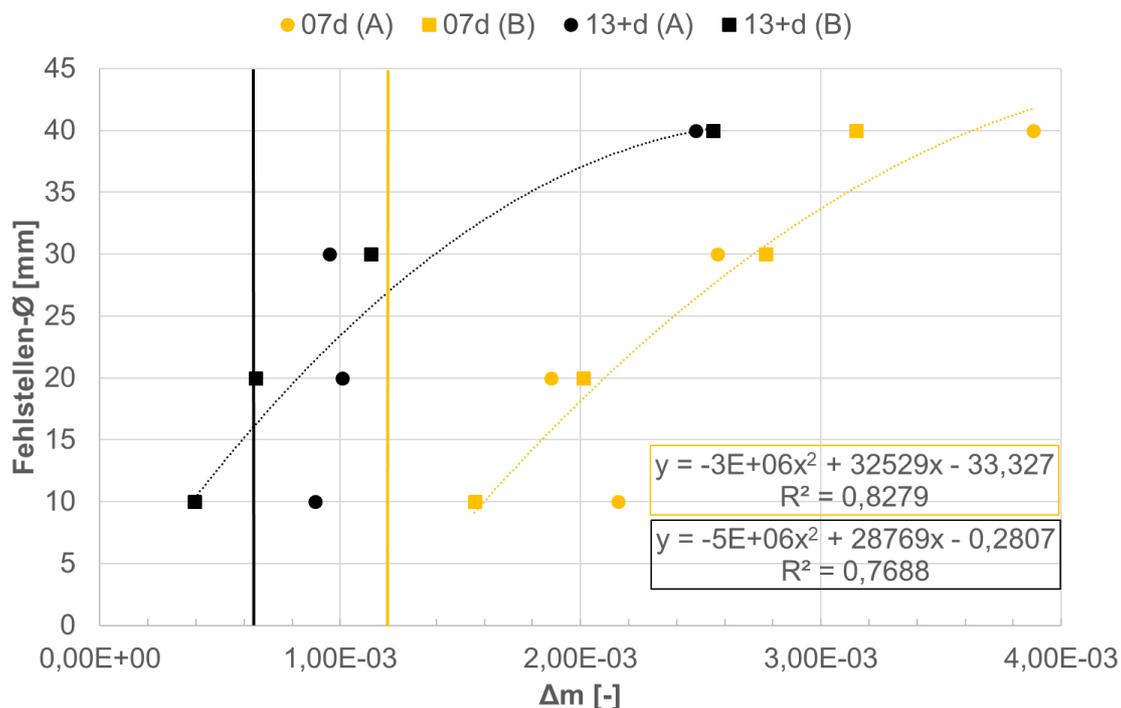


Abbildung 6-134: Auflösbarkeit von Fehlstellen direkt am Sondenrohr (Ø10-40 mm) mit dem MS2H

Anhand der Ergebnisse kann man folgendes ableiten:

- Bereits ab Ø10-20 mm können kugelförmige Fehlstellen direkt am Rohr aufgelöst werden.
- Allerdings ist eine genaue Differenzierung schwierig bei Ø10-20 mm (für 07d) und Ø10-30 mm (für 13+d), da die Werte z.T. streuen und sich gegenseitig überschneiden.
- Diese Schwankungen zwischen A & B Proben können auf Abweichungen der Sensorlage im Sondenrohr zurückgeführt werden. Der Sensor hat 21 mm außen-Ø während das Sondenrohr 26 mm innen-Ø hat, so dass ein leichtes Schlackern innerhalb eines 2,5 mm breiten Ringraums möglich ist. Das kann sich u.U. deutlich auf den Messwert auswirken. Dieses Problem ist beim CemTrakker jedoch nicht in dem Ausmaß aufgetreten, die unterschiedlich großen Fehlstellen waren erkennbar, obwohl der CemTrakker Sensor mit 16 mm außen-Ø noch mehr Spielraum in einem EWS-Rohr hat.
- Es zeigt sich auch beim MS2H ein besserer Kontrast bei der Fehlstellendetektion bei 07d gegenüber 13+d, wie es auch beim CemTrakker festgestellt wurde.

Wie bereits in Kap. 5.13.1.3 erklärt, ist dieser Sensor nicht für die Anwendung in EWS konzipiert. Weiterentwicklung der Hard- und Software wäre notwendig, wollte man diesen Sensor dafür verwenden.

Wie bei den CemTrakker-Messungen wurden auch die Proben mit den $\varnothing 40$ mm Fehlstellen am Sondenrohr und am Probenrand miteinander verglichen (Abbildung 6-135). Deutlich zu erkennen ist, dass die Proben mit der Fehlstelle am Probenrand das Signal einer Hintergrundmessung aufweisen, d.h. die Fehlstellen in 20 mm Entfernung zum Sondenrohr nicht mehr detektierbar sind. Das stimmt wiederum mit den CemTrakker Messungen gut überein.

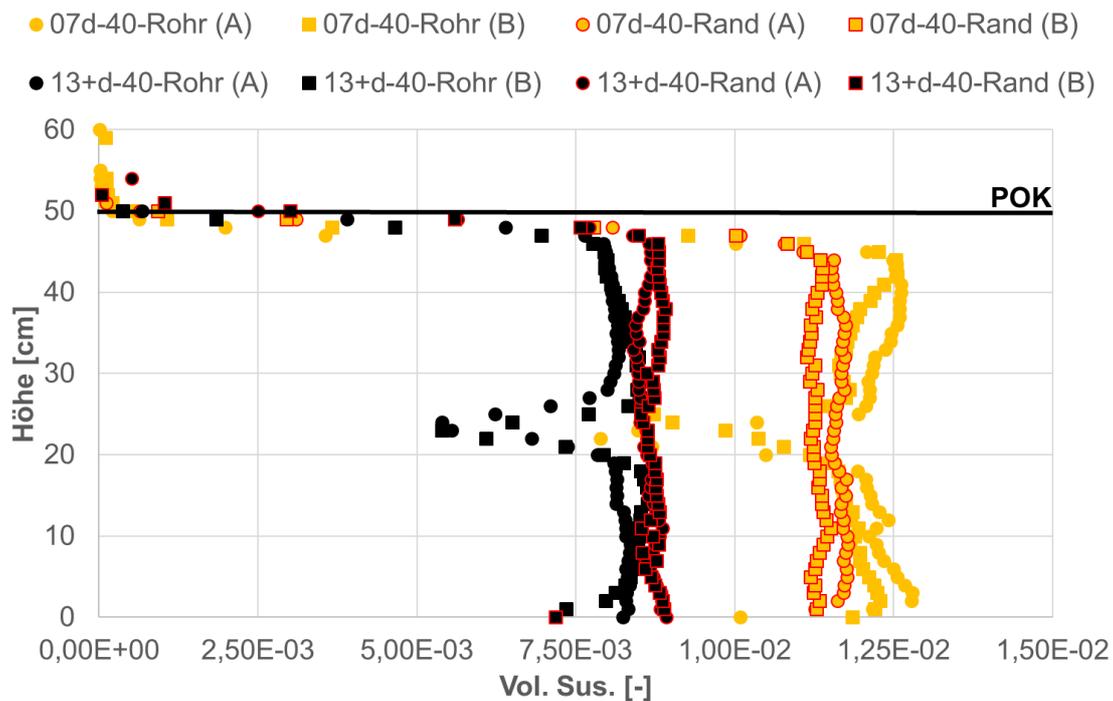


Abbildung 6-135: Untersuchung blasenförmiger Fehlstelle ($\varnothing 40$ mm) am Rohr und am Probenrand in 07d und 13+d (50 cm Länge, $\varnothing 110$ & 160 mm, POK = Probenoberkante) mit dem MS2H

6.6.1.12. Untersuchung des Einflusses einer Hilfsverrohrung auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors

Zur Untersuchung des Einflusses von Verrohrungen auf das Suszeptibilitäts-Messsignal wurden in einem ersten Schritt 50 cm Proben mit Sondenrohr hergestellt. Diese wurden zuerst mit dem CemTrakker vermessen und dann in einem zweiten Schritt durch einen simplen Gusseisenzylinder ($\varnothing 150$ mm) mit 14 cm Länge ergänzt, der auf mittlerer Höhe der Probe fixiert wird (siehe Abbildung 5-13, B). Im Anschluss wurde die Messung dann nochmal durchgeführt. Die Ergebnisse der CemTrakker Messung sind in Abbildung 6-136 für den Verfüllbaustoff 07d und 13+d dargestellt.

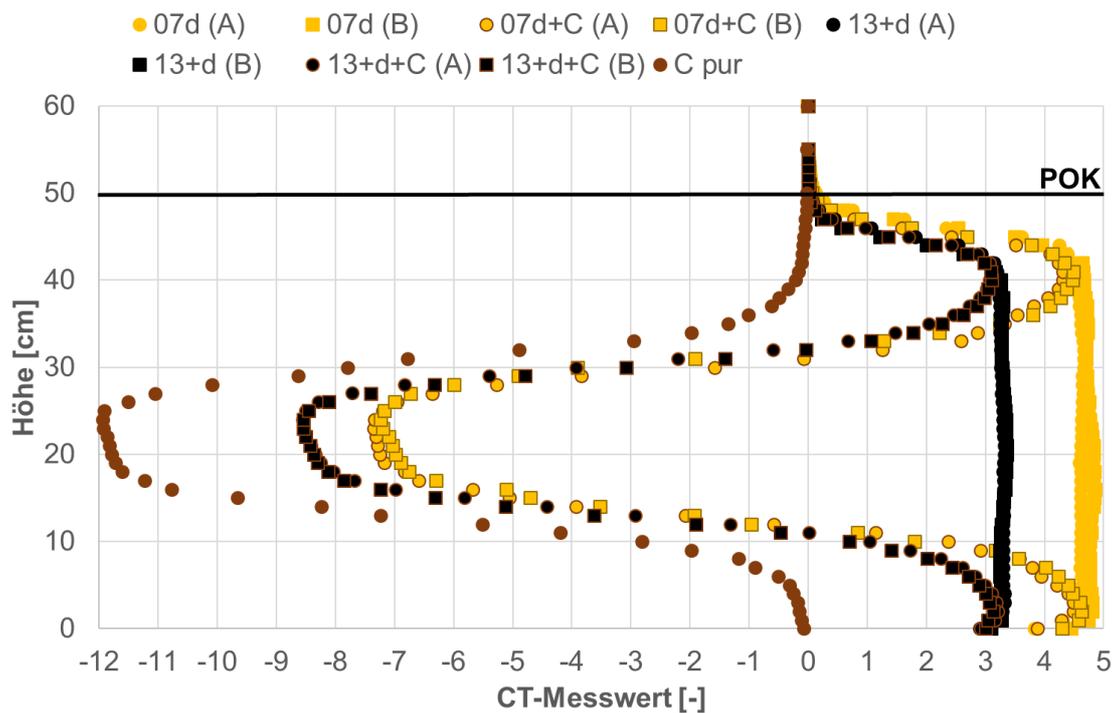


Abbildung 6-136: Einfluss einer Verrohrung (C) auf das CemTrakker (CT) Signal mit 07d und 13+d (50 cm Länge, Ø110 mm, POK = Probenoberkante)

Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Der CemTrakker reagiert sehr deutlich mit einem negativen Signal auf den Eisenzyylinder. (Auf die Frage warum das Signal negativ ist, wird in diesem Kapitel noch eingegangen).
- Das positive Signal des Verfüllbaustoffs addiert sich zum negativen Signal des Eisenzyinders.
- Der Effekt, dass sich beide Signale addieren, ist wichtig für die Praxis, da es somit auch in verrohrten Bereichen möglich ist den Suspensionsspiegel bei der Verpresskontrolle zu detektieren. Beim Eindringen mit dem Sensor in die Verrohrung kann so der negative Messwert in einer Tiefe eingefroren bzw. auf 0 zurückgesetzt werden. Erreicht der Suspensionsspiegel dann den Sensor, so wird nur die Suszeptibilität des Verfüllbaustoffs angezeigt.

Die Vorgehensweise beim Verpressvorgang wurde nun nochmals in einem anderen Experiment und mit flüssigem Verfüllbaustoff nachgestellt (Abbildung 6-137). Der Aufbau besteht aus einem Ø110 mm Rohr, diesmal mit einer Länge von 15 cm und einem in der Mitte angebrachten 32er Sondenrohr, sowie optional dem Eisenzyylinder darum herum. Für die Untersuchung an einem Verfüllbaustoff werden zwei Rohraufbauten entsprechend Abbildung 6-137 benötigt (einmal mit und einmal ohne Verrohrung), sowie insgesamt 5 Liter Verfüllbaustoffsuspension (2 x 2,5 Liter). Die Prozedur für den unverrohrten Test ist wie folgt:

1. Nullpunktkompensation des CemTrakker an der Luft
2. Einführen des CemTrakker in das Sondenrohr mit Ablesen des entsprechenden Werts
3. Einfüllen von Verfüllbaustoffsuspension in das $\varnothing 110$ mm Rohr bis zur Stabilisierung des Messsignals bzw. bis Oberkante mit Ablesen des entsprechenden Werts



Abbildung 6-137: Testaufbau zur Untersuchung des Einflusses der Hilfsverrohrung auf die Verfüllkontrolle

Die Prozedur für die verrohrten Tests ist wie folgt:

1. Nullpunktkompensation des CemTrakker an der Luft
2. Einführen des CemTrakker in das Sondenrohr mit Ablesen des entsprechenden Werts
3. Nullpunktkompensation („Einfrieren“) des CemTrakker-Messwerts innerhalb der Verrohrung mit Ablesen des entsprechenden Werts
4. Einfüllen von Verfüllbaustoffsuspension in das $\varnothing 110$ mm Rohr bis zur Stabilisierung des Messsignals bzw. bis Oberkante mit Ablesen des entsprechenden Werts

Tabelle 6-30 zeigt die Ergebnisse dieser Testreihe für den Verfüllbaustoff 07d, Tabelle 6-31 für den Verfüllbaustoff 13+d.

Tabelle 6-30: Hilfsrohr-Testreihe mit CemTrakker (CT) und 07d Suspension

Schritt	Test ohne Hilfsrohr, CT-Wert [-]		Test mit Hilfsrohr, CT-Wert [-]	
	A	B	A	B
1.	0	0	0	0
2.	-0,03	-0,02	-11,72	-11,69
3.	4,44	4,71	-0,00	-0,00
4.	-----	-----	4,68	4,52

Tabelle 6-31: Hilfsrohr-Testreihe mit CemTrakker (CT) und 13+d Suspension

Schritt	Test ohne Hilfsrohr, CT-Wert [-]		Test mit Hilfsrohr, CT-Wert [-]	
	A	B	A	B
1.	0	0	0	0
2.	-0,03	0,02	-11,76	-11,77
3.	3,24	3,10	0,00	0,00
4.	-----	-----	3,20	3,21

Es ist zu erkennen, dass eine Kompensation des stark negativen Signals der Verrohrung mit der Funktion „Nullpunktkompensation“ möglich ist. Danach Verhält sich der Sensor wie in einem unverrohrten Bohrloch, was man an den gut übereinstimmenden Werten bei Punkt 3 (unverroehrt) und Punkt 4 (verroehrt) erkennen kann. Somit stellt das Vorhandensein von Verrohrungen in EWS-Bohrlöchern keinen Störfaktor für die Verfüllkontrolle mit dem CemTrakker dar. Der Bearbeiter muss nur in der Lage sein, mit dem Sensor das Erreichen der Verrohrung anhand des stark negativen Signals zu identifizieren. Bei der Nachkontrolle von EWS nach dem Verfüllen mit dem CemTrakker sind die Verrohrungen gezogen, so dass kein Störeinfluss mehr vorhanden ist.

Um u.a. zu zeigen, dass der für die Untersuchungen verwendete Eisenzylinder einer echten Verrohrung gleicht, wurde eine Vergleichsuntersuchung an einem echten Bohrrohr (siehe Beschreibung in Kap.5.7) durchgeführt. Hierzu wurde ein gerades 32er EWS-Rohr an insgesamt drei Positionen in die Verrohrung eingebracht und mit dem CemTrakker gemessen (Abbildung 6-138).



Abbildung 6-138: Testaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Verrohrung auf das CemTrakker Signal, Bunte Pfeile markieren gemessene EWS-Rohr Positionen

Das Ergebnis zeigt Abbildung 6-139, dabei entsprechen die Farben der Messprofile den Farben der Positionspfeile in Abbildung 6-138. Insgesamt zeigt die echte Verrohrung ebenfalls ein stark negatives Signal, wobei sich der Betrag der Signalstärke an den Gewindeübergängen der Verrohrung erhöht. Das ist vermutlich auf die spezielle Behandlung der Gewinde (Nitrierung) gegenüber dem restlichen Rohrkörper zu erklären. Das Bohrrohr besteht aus 1.0570 Baustahl. Auffällig ist auch die Abhängigkeit der Signalstärke von der Lage des gemessenen EWS-Rohrs. Der Signalbetrag ist direkt am Bohrrohr (orangener Pfeil) am höchste und nimmt zur Mitte hin ab (blauer Pfeil). Solche Signaländerungen sowie Signalsprünge an den Gewindeübergängen sind jedoch für die Verfüllkontrolle nicht kritisch, da die Nullpunktkompensation immer angewendet werden kann, und der Sensor danach nicht mehr bewegt wird, bis die Suspension im Bohrloch das Level des Sensors erreicht hat.

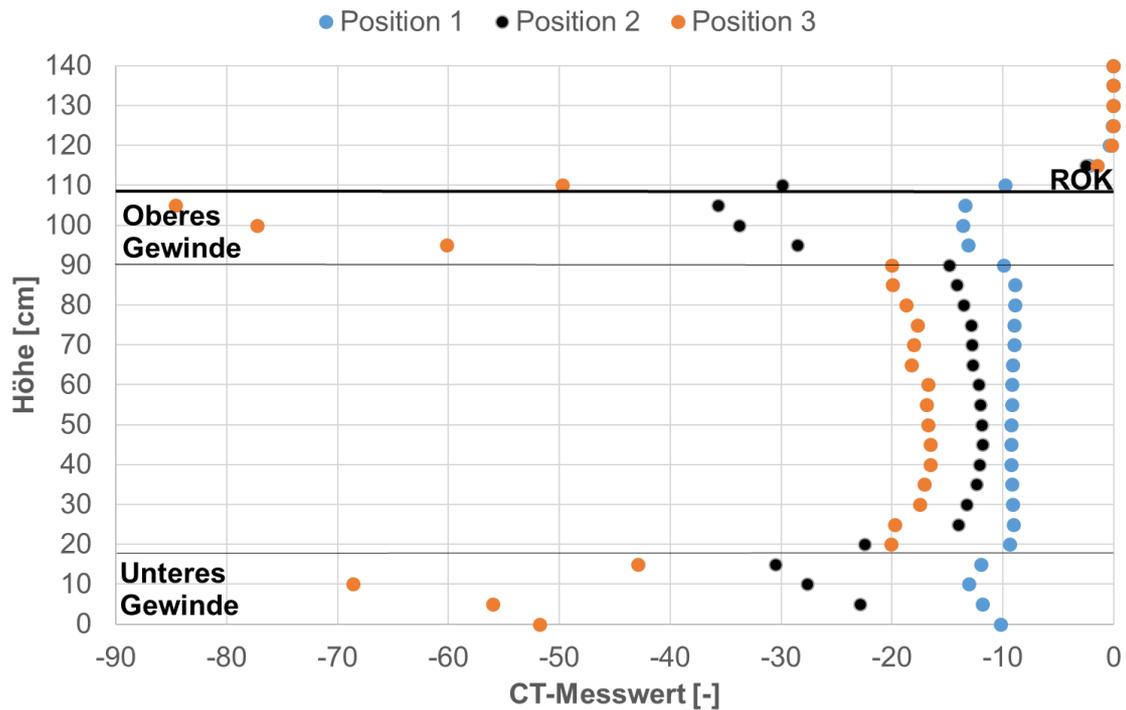


Abbildung 6-139: CemTrakker (CT)-Messung an drei Positionen im Bohrrohr (ROK= Rohroberkante)

Im Weiteren wurden Bohrrohruntersuchungen auch mit dem MS2H Bohrlochsenors durchgeführt. Hierzu wurden, auch zum direkten Vergleich, die gleichen Proben gemessen und auch auf gleiche Weise ausgewertet, wie zuvor beim CemTrakker. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-140 für 07d und 13+d dargestellt. Diese zeigen (anders als der CemTrakker), dass eine Hilfsverrohrung scheinbar keine Auswirkung auf die Signalmessung hat, bzw. das Signal der Verrohrung leicht positiv, ab insgesamt sehr nahe bei 0 liegt.

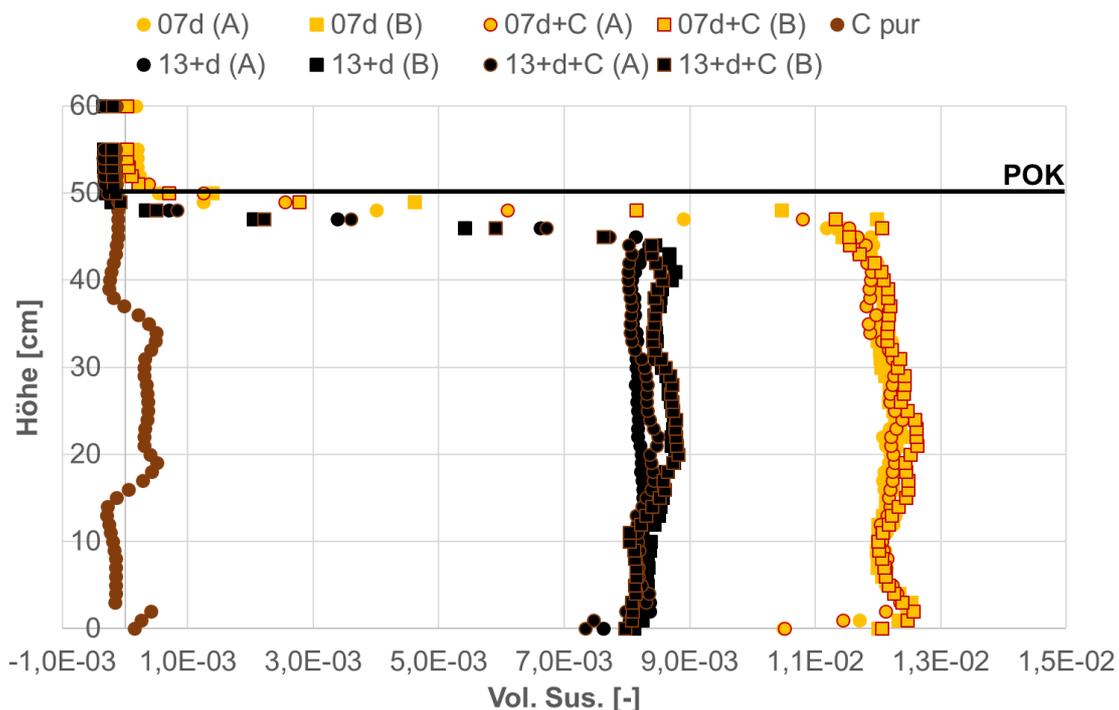


Abbildung 6-140: Einfluss einer Verrohrung (C) auf das MS2H-Signal mit 07d und 13+d (50 cm Länge, Ø110 mm, POK = Probenoberkante)

Abbildung 6-141 zeigt die MS2H-Messungen im großen Bohrröhr. Es besteht wie bei den CemTrakker Messungen eine Abhängigkeit des Messsignals von der Entfernung des gemessenen EWS-Rohrs zum Hilfsrohr. Beide EWS-Rohre (in der Mitte und am Rand) trennen nur 2 cm, das Signal erhöht sich dabei aber um drei Zehnerpotenzen von der Mitte zum Rand. Die Messwerte am Rand (Position 3) übertreffen sogar das Signal dotierter Verfüllbaustoffe um eine Zehnerpotenz. Somit würde der MS2H beim Befahren eines EWS-Rohrs in einer realen verrohrten Bohrung, je nach Lage durchaus starke Messwertbeeinflussungen erfahren. Wie bereits erwähnt ist das Bartingtonsystem primär nicht für die speziellen Abläufe bei einer EWS-Verpresskontrolle konzipiert und eingestellt. Allerdings verfügt es über die grundlegenden Software- und Hardwareoptionen, die es prinzipiell ermöglichen das Messsystem an die Bedürfnisse bei der EWS-Verpresskontrolle anzupassen. In diesem Fall ist dies z.B. die Nullpunktkompensation um das Signal der Verrohrung während der Abdichtungskontrolle kompensieren zu können.

Eine interessante Beobachtung ist aber nun, dass der MS2H positive Messwerte bei der Verrohrung anzeigt, die je nach Abstand zum Bohrröhr auch deutlich über den dotierten Verfüllbaustoffen liegen. Der CemTrakker zeigte zuvor negative Werte. Da eine solche Verrohrung in erster Linie aus Eisen besteht und somit stark ferromagnetisch sein sollte, sind die positiven MS2H Messwerte plausibler. Auf Anfrage bei der Firma Santherr Geothermietechnik wurde dieser Fakt auch bestätigt. Das CemTrakker System wurde jedoch bei der Entwicklung bewusst so modifiziert, dass die ursprünglich positiven Messwerte beim Eindringen des Sensors in verrohrte Abschnitte negativ dargestellt werden, damit eine deutliche Differenzierung zwischen mit Magnetit dotiertem Verfüllbaustoff und Verrohrung auf der Baustelle möglich ist.

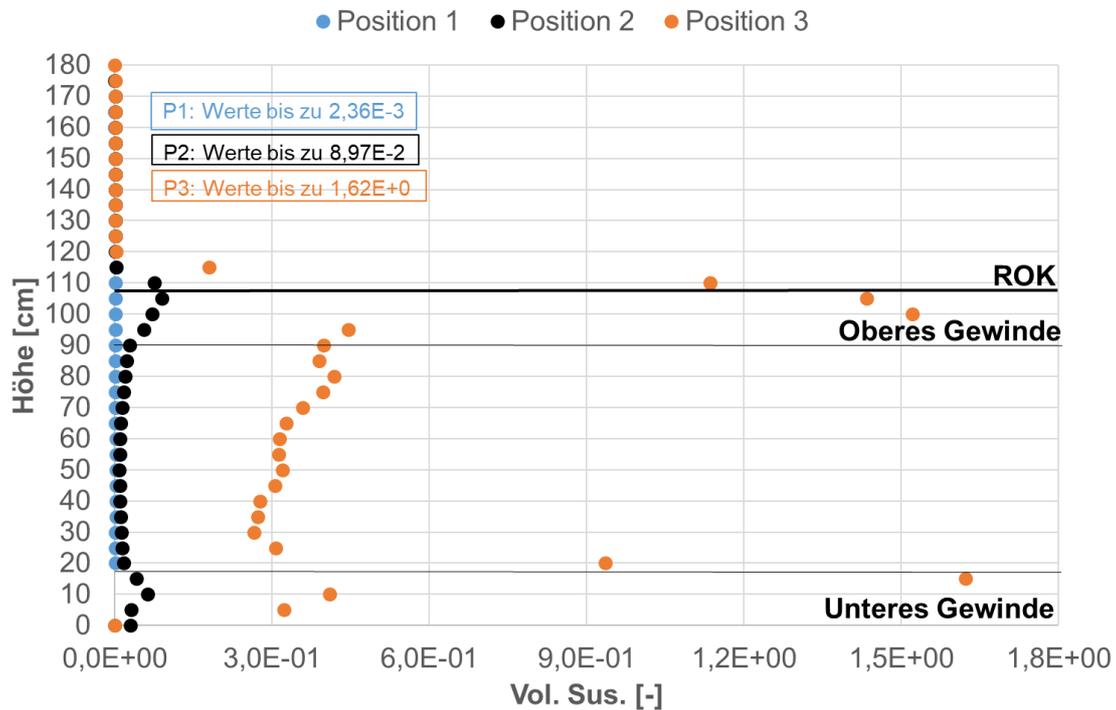


Abbildung 6-141: MS2H-Messung an drei Positionen im Bohrrohr (ROK= Rohroberkante)

6.6.1.13. Untersuchung des Einflusses von Abstandshaltern auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors

Um den Einfluss von Abstandshaltern auf das Messsignal zu untersuchen, wurden 4xDA32x2,9 mm Abstandshalter so zugeschnitten, dass sie in Ø110 mm Probenrohre mit einem 32er Sondenrohr passen (Abbildung 6-142).

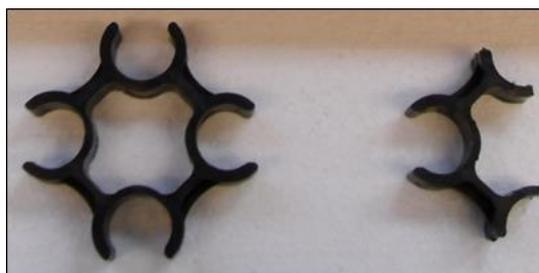


Abbildung 6-142: Originale (links) und zugeschnittene Abstandshalter (rechts)

Abbildung 6-143 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem CemTrakker, und Abbildung 6-144 mit dem MS2H für die Verfüllbaustoffe 07d und 13+d. Die Ergebnisse zeigen sowohl beim CemTrakker als auch beim MS2H eine deutliche Abnahme der Messsignale bedingt durch den Abstandshalter. Die Signalabnahme ist dabei vergleichbar mit der Abnahme bei Ø40 mm Fehlstellen am Sondenrohr, wie sie in Kapitel 6.6.1.11 untersucht wurden.

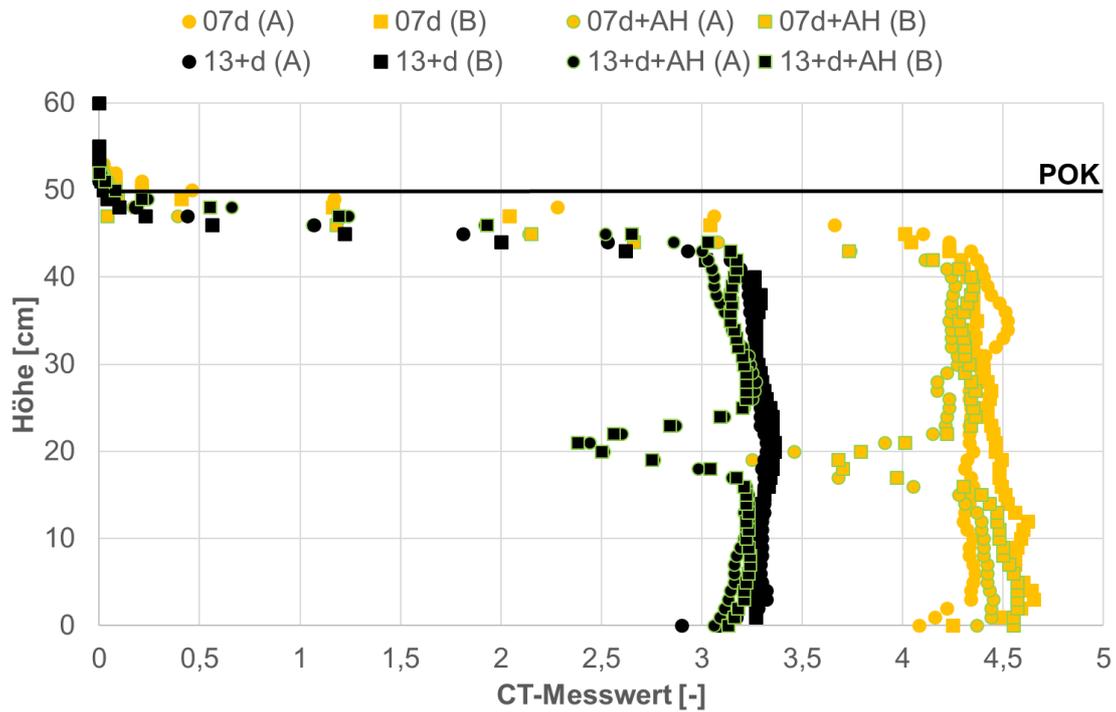


Abbildung 6-143: Einfluss von Abstandshaltern (AH) auf das CemTrakker (CT) Messsignal mit 07d und 13+d (POK = Probenoberkante)

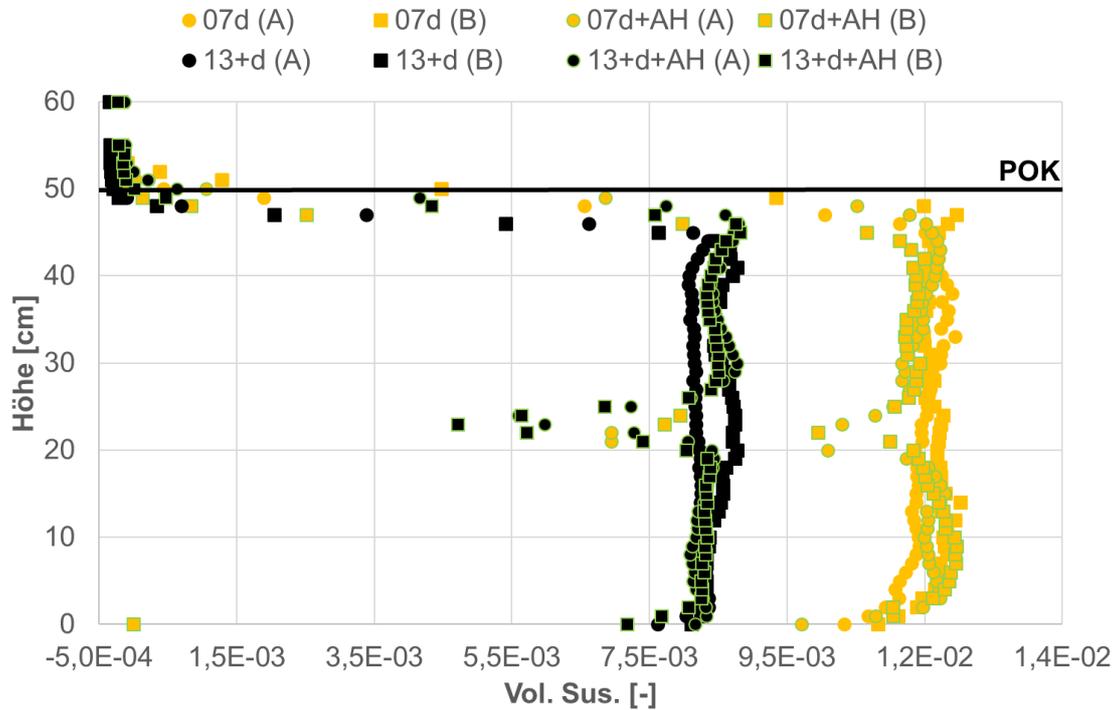


Abbildung 6-144: Einfluss von Abstandshaltern (AH) auf das MS2H-Messsignal bei 07d und 13+d (POK = Probenoberkante)

6.6.1.14. Untersuchung des Einflusses der Raumlage von Sondenrohren im Bohrloch auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors

Die Raumlage von Erdwärmesondenrohren in einer EWS-Bohrung ist in der Regel nicht bekannt und man kann (selbst bei Anwendung von Abstandshaltern und Zentrieren) eine Lageänderung über die Tiefe nicht ausschließen. Für die Verfüll- und Nachkontrolle mit dem CemTrakker kann dies u.U. problematisch werden, da unterschiedliche Störeinflüsse auftreten können. Für die Untersuchung solcher Störeinflüsse wurden verschiedene Szenarien in einem Bohrloch im Labormaßstab nachgestellt (Abbildung 6-145).

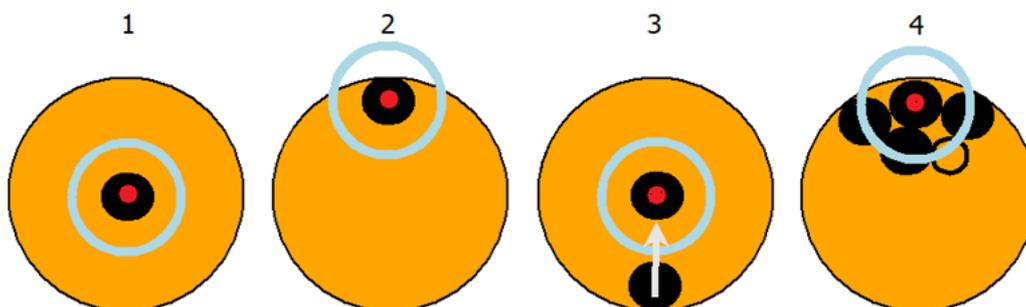


Abbildung 6-145: Vier Szenarien zur Untersuchung von Störeinflüssen auf die CemTrakker-Messung im Bohrloch (Roter Punkt = Sensor, Hellblauer Kreis = Eindringtiefe)

Szenario 1 ist ein Referenzszenario bei dem eine maximale Suszeptibilität gemessen wird, in Szenario 2 wird die Signalstörung durch das Anliegen eines EWS-Rohrs am Bohrlochrand untersucht, in Szenario 3 die Störung einer Messung durch ein zweites Rohr mit variabler Entfernung (0, 1 und 2 cm) zum zentralen Rohr, und Szenario 4 ein „Worst Case“ Szenario wie man es sich im Realfall vorstellen kann. Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit wird jeder Test zweimal durchgeführt. Die Testprozedur entspricht dem unverrohrten Test aus Kap.6.6.1.12. Abbildung 6-146 zeigt die Messaufbauten in $\varnothing 160$ mm Rohren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-32 gezeigt.

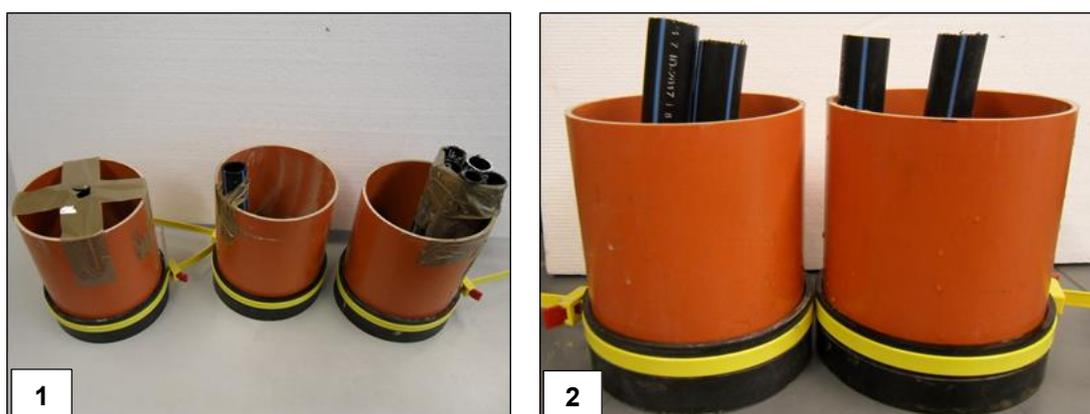


Abbildung 6-146: 1: Von links nach rechts: Szenario 1 mit ungestörtem Sonderrohr (32x2,9 mm), Szenario 2 mit Rohr am Bohrlochrand und Szenario 4 „Worst case“; 2: Szenario 3 mit 0 cm (links) und 2 cm Rohrabstand (rechts)

Tabelle 6-32: CemTrakker (CT) Signal für Szenarios 1-4

Material	Szenario, CT-Wert [-]					
	1	2	3 (2 cm)	3 (1 cm)	3 (0 cm)	4
07d-A	4,54	3,15	4,45	4,28	3,98	1,89
07d-B	4,35	3,16	4,44	4,19	3,86	2,06
13+d-A	3,1	2,19	3,05	2,93	2,65	1,48
13+d-B	3,06	2,12	2,98	2,90	2,72	1,43

Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Beide Verfüllbaustoffe zeigen eine deutliche Abnahme des Messsignals für Szenario 2 um im Schnitt 30 % gegenüber Szenario 1. Dies gilt im Realfall natürlich nur unter der Voraussetzung, dass die umgebende Geologie eine magnetische Suszeptibilität von 0 aufweist, wie auch Luft. Dies kann oft der Fall sein (siehe Kap. 6.6.1.16). Bei Gesteinen mit hohen Suszeptibilitäten kann sich der Wert aber auch deutlich erhöhen.
- Szenario 3 zeigt, dass zwei Rohre in 2 cm Entfernung zueinander keinen Einfluss aufeinander haben. Die Werte stimmen mit denen für Szenario 1 recht gut überein. Verringert man den Abstand auf 1 cm, nimmt das Messsignal um im Schnitt 4 % ab, liegen die Rohre direkt aneinander, sind es im Schnitt 11 %. Für die Praxis bedeutet dies, dass vor allem bei der Nachkontrolle Fehlstellen interpretiert werden können, wo eigentlich nur Rohre aneinander liegen.
- Auch das Aneinanderliegen mehrere Rohre ist möglich, wenn man an eine Doppel-U Sonde denkt und zusätzlich dem Verfüllrohr sofern im Bohrloch verblieben. Einen „Worst Case“ dazu bildet Szenario 4 ab. Die Werte sind hier um mehr als 50 % abgefallen, gegenüber dem Referenzszenario 1. Besonders hervorzuheben sind die Messwerte für 13+d, die unter die Grenze von 2 fallen, die dem Nachweis einer vollständigen Verfüllung laut CemTrakker Hersteller entsprechen soll. Dies kann unter Umständen auch zu Fehlinterpretationen während der Verpresskontrolle führen.

Im Weiteren wurden die gleichen Untersuchungen auch mit dem MS2H Bohrlochsenors durchgeführt (Tabelle 6-33).

Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Beide Verfüllbaustoffe zeigen eine deutliche Abnahme des Messsignals für Szenario 2 um im Schnitt 18 % gegenüber Szenario 1 (es gilt für den Realfall die Voraussetzung wie zuvor).
- Szenario 3 zeigt, dass zwei Rohre in 2 cm Entfernung zueinander keinen Einfluss aufeinander haben. Die Werte stimmen mit denen für Szenario 1 recht gut überein. Verringert man den Abstand auf 1 cm, verringert sich das Signal um im Schnitt 3%. Liegen die Rohre direkt aneinander (Szenario 3, = 0 cm), beträgt die Abnahme im Schnitt 11%.
- Beim „Worst case“ scenario beträgt die Abnahme im Schnitt 46 %. Beim Vergleich mit den %-Abnahmen der CemTrakker Messung zeigt sich eine etwas geringere Ansprache

des MS2H gegenüber dem CemTrakker. Ein direkter und eindeutiger Vergleich beider Sensoren ist jedoch durch Abweichungen, vor allem in der Sensorgröße, erschwert.

Tabelle 6-33: MS2H Signal für Szenarios 1-4

Material	Szenario, MS2H-Wert [-]					
	1	2	3 (2 cm)	3 (1 cm)	3 (0 cm)	4
07d-A	1,15E-02	9,40E-03	1,21E-02	1,14E-02	1,06E-02	6,30E-03
07d-B	1,13E-02	9,31E-03	1,17E-02	1,19E-02	1,04E-02	6,11E-03
13+d-A	8,87E-03	7,28E-03	8,90E-03	8,58E-03	8,07E-03	4,84E-03
13+d-B	9,06E-03	7,44E-03	8,96E-03	8,90E-03	7,85E-03	4,81E-03

6.6.1.15. Untersuchung des Einflusses steigender W/F Verhältnisse auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors

In diesem Unterkapitel wird kurz gezeigt, wie sich Verfüllbaustoffe mit nicht homogen verteiltem Magnetit auf das Messergebnis des CemTrakker und MS2H auswirken. Die Messungen wurden an Proben durchgeführt, die in Kap. 6.6.1.8 auch mit dem MS2C Ringsensor gemessen wurden. In Abbildung 6-147 sind für die Verfüllbaustoffe 07d und 13+d jeweils Proben (hergestellt bei 2000 U/min) mit Standard W/F, und solche mit W/F bei dem sich Magnetit im Verfüllbaustoff abtrennt. Die Proben mit Standard W/F (07d = 0,3 und 13+d = 0,8) zeigen eine homogene Signalverteilung zur Tiefe, während die instabilen W/F inhomogene und nach unten hin zunehmende Signale zeigen, hervorgerufen durch das Abtrennen und Absetzen des Magnetits.

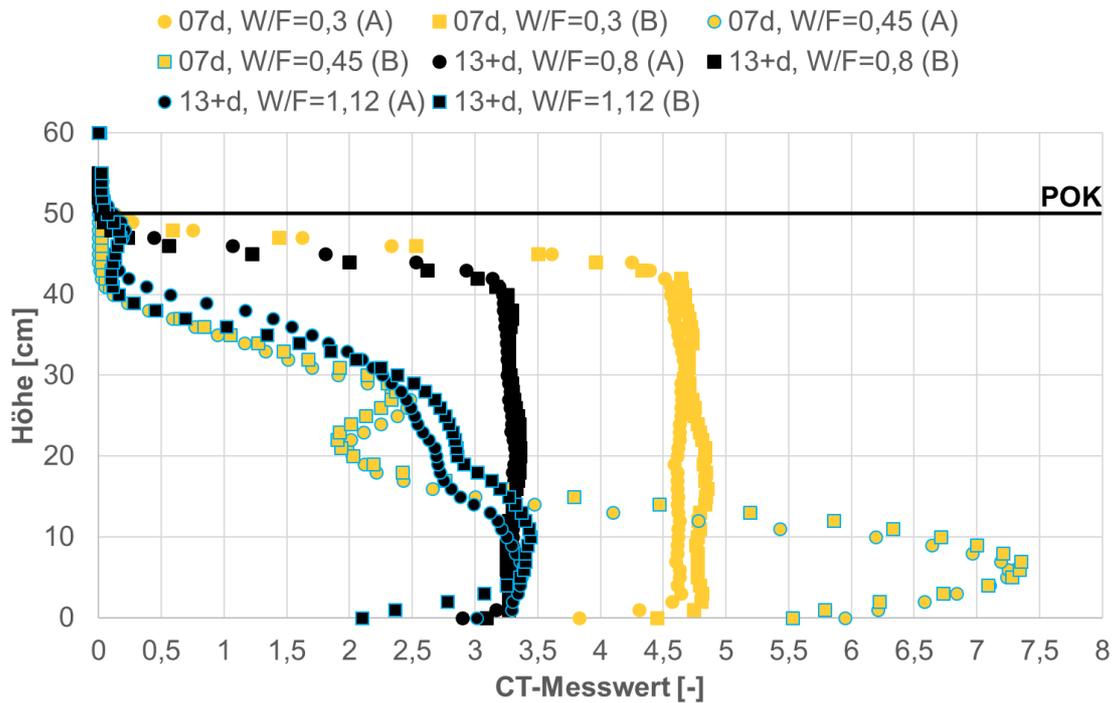


Abbildung 6-147: CemTrakker (CT) Messsignal bei homogen verteiltem und abgesetzten Magnetit im Verfüllbaustoff (POK = Probenoberkante)

Dies ist vor allem kritisch für die Nachkontrolle, da für die Fehlstellendetektion ein über die Bohrlochtiefe homogenes Signal Voraussetzung ist. Aber auch für die Verpresskontrolle kann es kritisch werden, sofern es bereits während des Verfüllvorgangs zu einer Abtrennung von Magnetit in der aufsteigenden Suspensionssäule kommt.

Die gleichen Untersuchungen wurden auch mit dem MS2H durchgeführt (Abbildung 6-148). Die Ergebnisse sind übereinstimmend mit denen des CemTrakker. Unterschiede gibt es nur in der vertikalen Auflösung, da CemTrakker und MS2H in ihrer Bauform unterschiedlich sind.

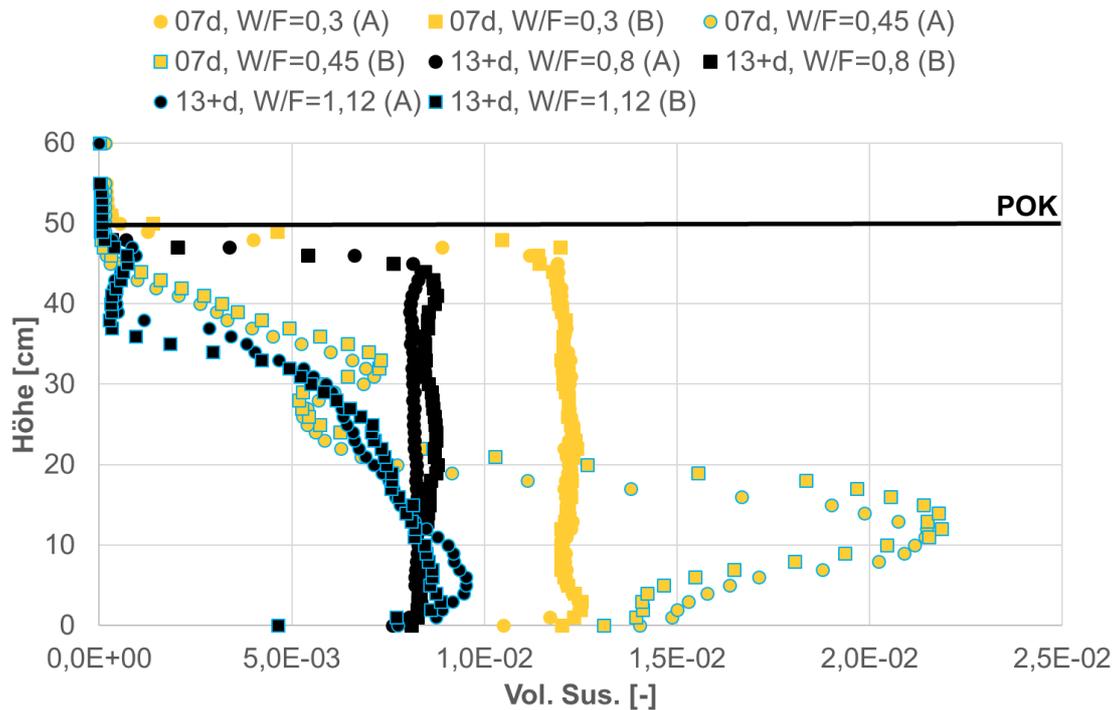


Abbildung 6-148: MS2H Messsignal bei homogen verteiltem und abgesetzten Magnetit im Verfüllbaustoff (POK = Probenoberkante)

6.6.1.16. Untersuchung des Einflusses geologischer Gegebenheiten auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors

Ergänzend zu den Untersuchungen in Kap. 6.6.1.9 werden folgend unterschiedliche Gesteine mit dem CemTrakker und MS2H-Sensor untersucht. Abbildung 6-149 zeigt einen Versuchsaufbau mit einem Gesteinsblock. Es wurde ein einzelnes Erdwärmerohr sowohl an einen Granit, als auch an einen ferritisch gebundenen Buntsandstein befestigt, so dass das Rohr direkt am Gestein anliegt. Diese Versuche sollen ein „Worst case“ Szenario simulieren, bei denen ein Erdwärmerohr im Bohrloch direkt an der Bohrlochwand und somit am Gestein anliegt. Als Gesteine wurden typische regionalgeologische Typen ausgewählt. Ziel ist es, mögliche Störeinflüsse durch die Gesteinssignale zu untersuchen.

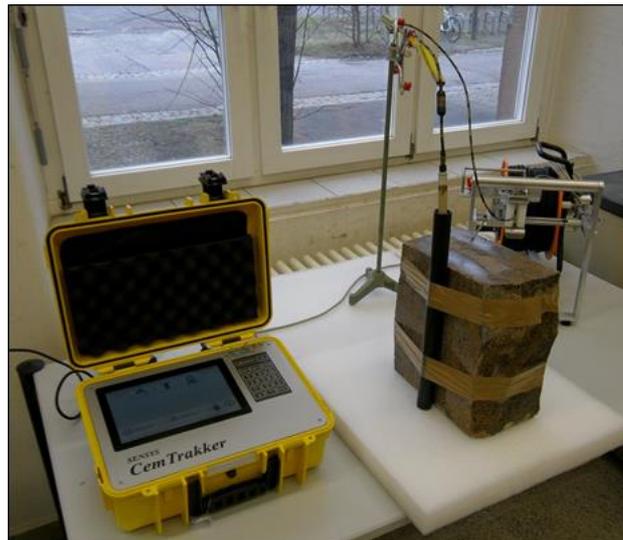


Abbildung 6-149: CemTrakker-Messung in einem 32er Erdwärmesondenrohr an einem Granit

Bei Buntsandstein konnte keinerlei Signal mit dem CemTrakker festgestellt werden, beim Granit hingegen bis zu 1,75. Es wurden zwei Profile (A & B) senkrecht zueinander gemessen um auch die Heterogenität des Signals zu zeigen, resultierend aus der Gesteinsheterogenität (siehe Abbildung 6-150).

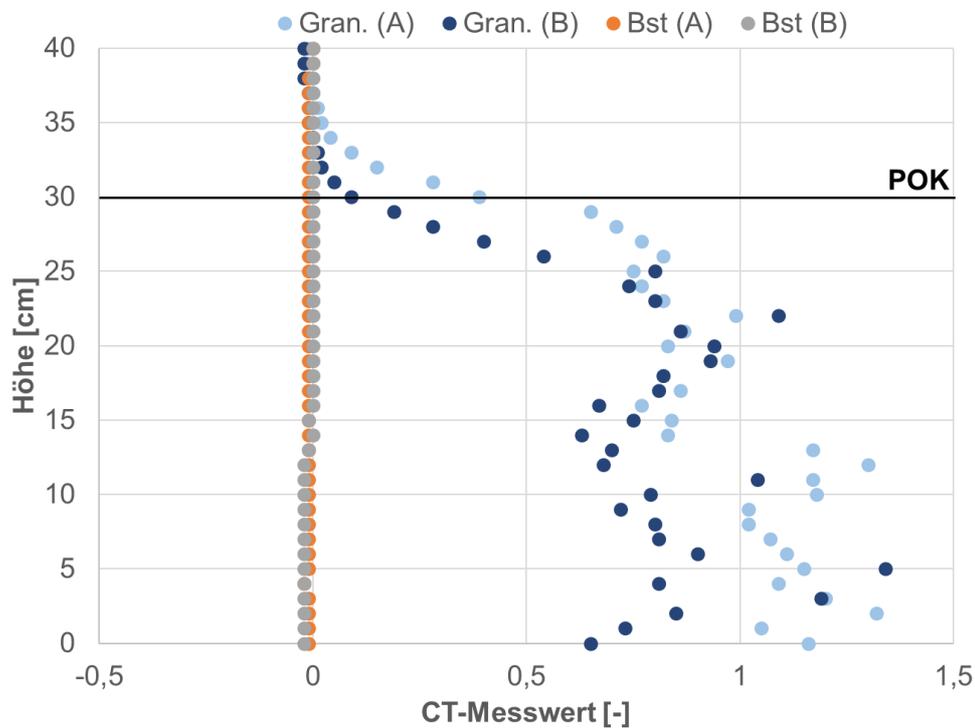


Abbildung 6-150: CemTrakker (CT) Profile an Festgesteinen (Granit, Buntsandstein) gemessen (POK = Probenoberkante)

Das recht starke Signal beim Granit lässt sich durch einen hohen Anteil ferri- und ferromagnetischer Minerale erklären, die vor allem für magmatische Gesteine typisch sein können, was sich mit höheren Suszeptibilitäten äußert (siehe auch Abbildung 6-124). Das heißt jedoch nicht, dass jeder Granit solche Merkmale aufweisen muss.

Das ferritische Bindemittel des Buntsandsteins scheint nicht dominant zu sein, zumindest konnte kein Signal aufgezeichnet werden. Dies deckt sich auch mit den Angaben von Schön (1983).

Genauso verhielt es sich bei Messung der Sand und Tonproben aus Kap. 6.6.1.9 (trockener und gesättigter Sand und Ton, siehe Abbildung 6-151). Das CemTrakker Signal ist unauffällig und liegt nahe bei 0.

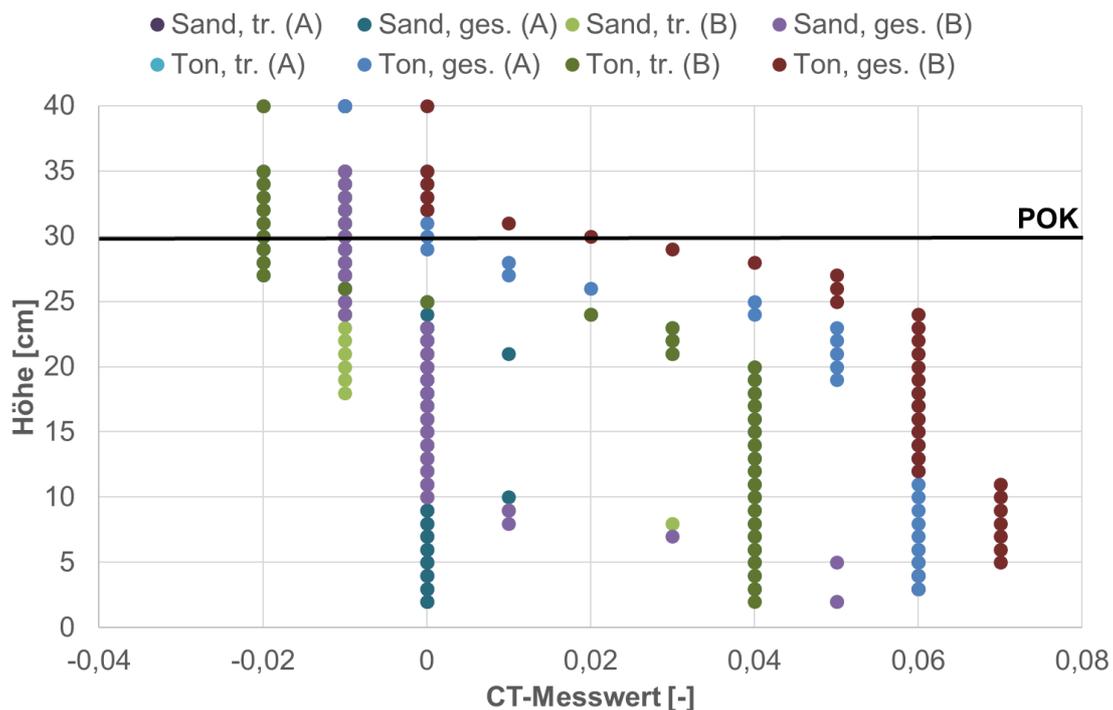


Abbildung 6-151: CemTrakker (CT) Profile gemessen an Lockergesteinen (Sand, Ton, trocken und gesättigt, POK = Probenoberkante)

In einer Erweiterung des Versuchs mit dem Granit wurde untersucht, bis zu welcher Entfernung des Sondenrohrs noch ein Signal messbar ist. Hierzu wurden schrittweise 1 cm dicke Styroporplatten zwischen Sondenrohr und Granitoberfläche eingebaut, die den Abstand simulieren sollten. Die Ergebnisse in Abbildung 6-152 zeigen, dass bereits bei 1 cm Abstand das Signal deutlich um im Schnitt 67% abnimmt. Von 1 cm auf 2 cm nimmt das Signal im Schnitt um 60% ab. Von 2 cm auf 3 cm nimmt das Signal um 42 % ab. Jedoch liegen bereits bei 2 cm Abstand die absoluten Messwerte bei 0,1-0,2, so dass in dieser Entfernung das Signal fast vernachlässigbar ist. Als Referenz wurde eine Luftmessung durchgeführt, sowie eine Messung einer 3 cm Styroporplatte, um evtl. Signalstörungen auszuschließen. Beide sind deckungsgleich und liegen nahe 0.

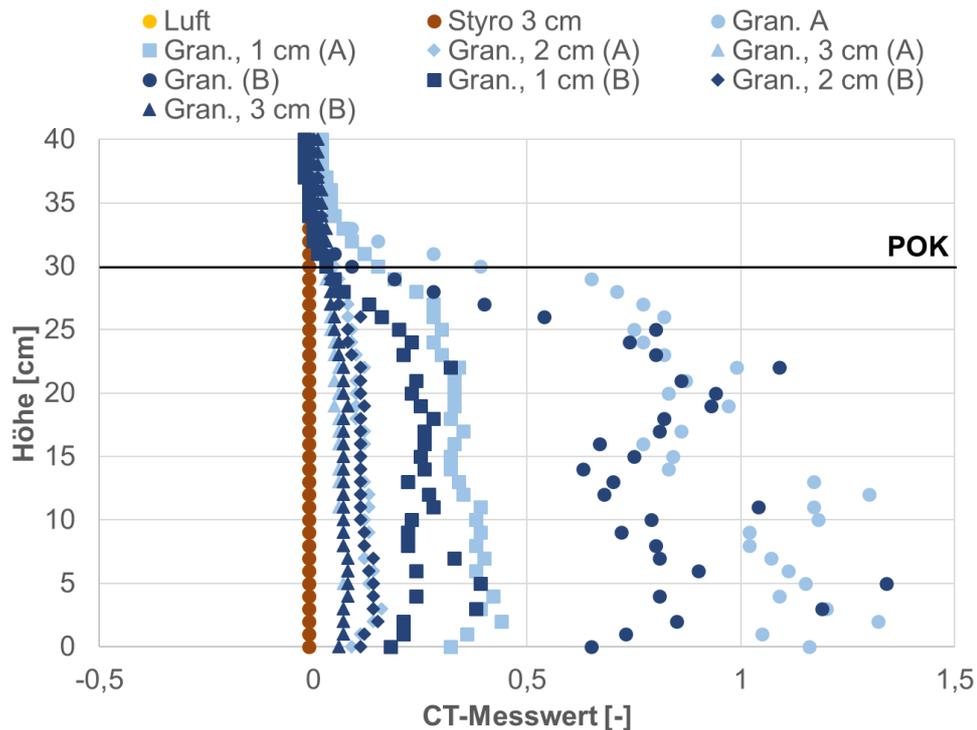


Abbildung 6-152: CemTrakker (CT) Profile an Granit mit variabler Entfernung des Sondenrohrs (POK = Probenoberkante)

Zu guter Letzt wurden noch Messungen mit dem CemTrakker an einer Sammlung von Gesteins-handstücken des KIT-Instituts für Angewandte Geowissenschaften durchgeführt. Hierzu wurde der CemTrakker-Sensor in ein aufgeschnittenes 32er Sondenrohr geklebt (siehe Abbildung 6-153), und an einzelnen Handstücken angelegt und diese nach maximalen magnetischen Signalen abgesucht. Ein Großteil der Gesteine war unauffällig, jedoch konnten in jeder Gesteinsgruppe auch Gesteine mit deutlichen Messsignalen auch weit über dem Wert von 2 nachgewiesen werden. Der in diesem Fall gemessene Granit wies allerdings kein Signal auf, im Vergleich zur Messung des Granitblocks in Abbildung 6-149. Hier zeigt sich also eine gewisse Variabilität, die aber in der Geologie nicht untypisch ist. So kann die Zusammensetzung eines Gesteins wie z.B. Granit oder auch andere in gewissen Grenzen variieren und damit auch das magnetische Signal (siehe auch Abbildung 6-124).



Abbildung 6-153: CemTrakker in 32er Sondenrohr-Halbschale an einem Arkose-Sandstein

Tabelle 6-34 zeigt die untersuchten Gesteine mit Kürzeln. Tabelle 6-35 zeigt den maximal gemessenen Messwert für jedes Gestein, z.T. aber auch die gemessenen Variabilitäten.

Tabelle 6-34: Gesteinsabkürzungen und Bedeutung

Abk.	Gestein	Abk.	Gestein	Abk.	Gestein
GRA	Granit	NEP	Nephelinit	GYP	Gips
GDR	Granodiorit	AMPH	Amphibolit	KAL	Kalkstein
DI	Diorit	GRAN	Granulit	MER	Mergel
GAB	Gabbro	GSCH	Grünschiefer	Q-SAND	Q-Sandstein
ANO	Anorthit	QZT	Quarzit	RAD	Radiolarit
SYE	Syenit	PHY	Phyllit	SAL	Steinsalz
AND	Andesit	MAR	Marmor	GRAW	Grauwacke
BIM	Bims	EKL	Eklogit	TUF	Tuff
RHY	Rhyolith	GNE	Gneis		
OBS	Obsidian	PER	Peridotit		
PHO	Phonolith	SCH	Schiefer		
TRA	Trachyt	ARK	Arkose		
BASAN	Basanit	COA	Steinkohle		
BAS	Basalt	DOL	Dolomit		

Ein paar typische Gesteine aus der Region Baden-Württemberg sind rot hervorgehoben. Diese sind zum Großteil unauffällig, aber das Beispiel des Gneises (wie zuvor auch beim Granit) zeigt, dass z.T. starke Variationen auch beim selben Gestein auftreten können. Diese können nicht nur aus unterschiedlichen Gesteinszusammensetzungen resultieren, sondern sind auch abhängig von der Orientierung und dem Abstand des Sensors zum Gestein. Die angegebenen Messwerte können also nicht als gesteinspezifisch angesehen werden. In diesem Fall wurden ein „Worst case“ Szenario betrachtet, d.h. ein EWS-Rohr liegt direkt am Bohrlochrand am Gestein an und wird mit dem CemTrakker vermessen.

Tabelle 6-35: CemTrakker (CT) Messwerte verschiedener Gesteine

	Plutonische Gesteine					
	GRA	GDR	DI	GAB	ANO	SYE
CT [-]	0-1,75	0,22	0,64	2,78	3,02	9,4
	Vulkanische Gesteine					
	AND	BIM	RHY	OBS	PHO	TRA
CT [-]	0	0	0	0,05	0,22	1,6
	BASAN	BAS	NEP			
CT [-]	3,5	3,36	11,87			
	Metamorphe Gesteine					
	AMPH	GRAN	GSCH	QTZ	PHY	MAR
CT [-]	0	0	0	0	0,05	0,07
	EKL	GNE	PER	SCH		
CT [-]	0,09	0-10	2,44	6,16		
	Sediment Gesteine					
	ARK	COA	DOL	GYP	KAL	MER
CT [-]	0	0	0	0	0	0
	Q-SAND	RAD	SAL	GRAW	TUF	
CT [-]	0	0	0	0	2,6	

Die Untersuchungen aus Tabelle 6-35 konnten nicht mit dem MS2H Sensor durchgeführt werden, da dieser in seiner Softwarekonfiguration ab Werk keine kontinuierliche Messung durchführt, und es somit kaum möglich ist, die Handstücke wie mit dem CemTrakker nach maximalen Signalen abzutasten. Jedoch die Untersuchungen am Granit- und Buntsandsteinblock konnten durchgeführt werden. Das Signal des Buntsandsteins war, wie auch beim CemTrakker, bei 0, so dass im Folgenden direkt die Abstandsmessungen mit dem MS2H beim Granit gezeigt werden (Abbildung 6-154). Bei dieser Messung nimmt das Signal bei 1 cm Entfernung bereits im Schnitt um 85 % ab. Das zeigt im Vergleich zum CemTrakker mit 67 %, dass der MS2H eine geringere Eindringtiefe hat. So befinden sich bereits die Messwerte bei 2 cm Entfernung im Bereich der Luft-Messung.

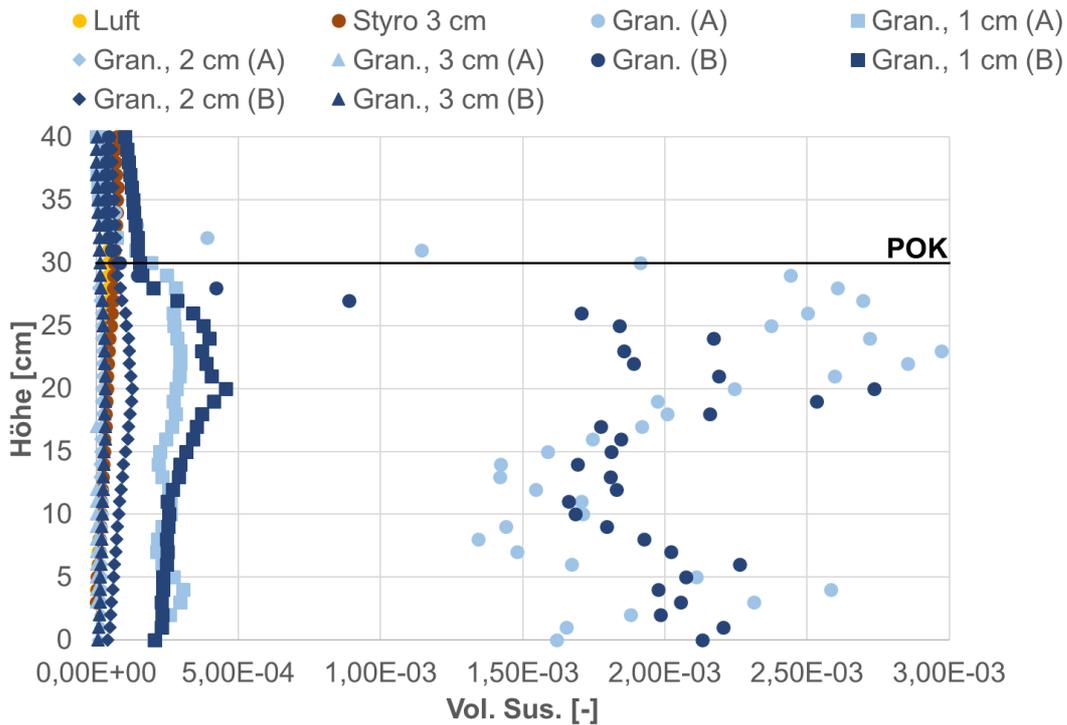


Abbildung 6-154: MS2H Profile an Granit mit variabler Entfernung des Sondenrohrs (POK = Probenoberkante)

Schließlich wurden noch die Ton- und Sand Proben (siehe vorherige Abbildung 6-151) mit dem MS2H gemessen (Abbildung 6-155). Die Messwerte sind durchweg unauffällig und liegen alleamt nahe 0.

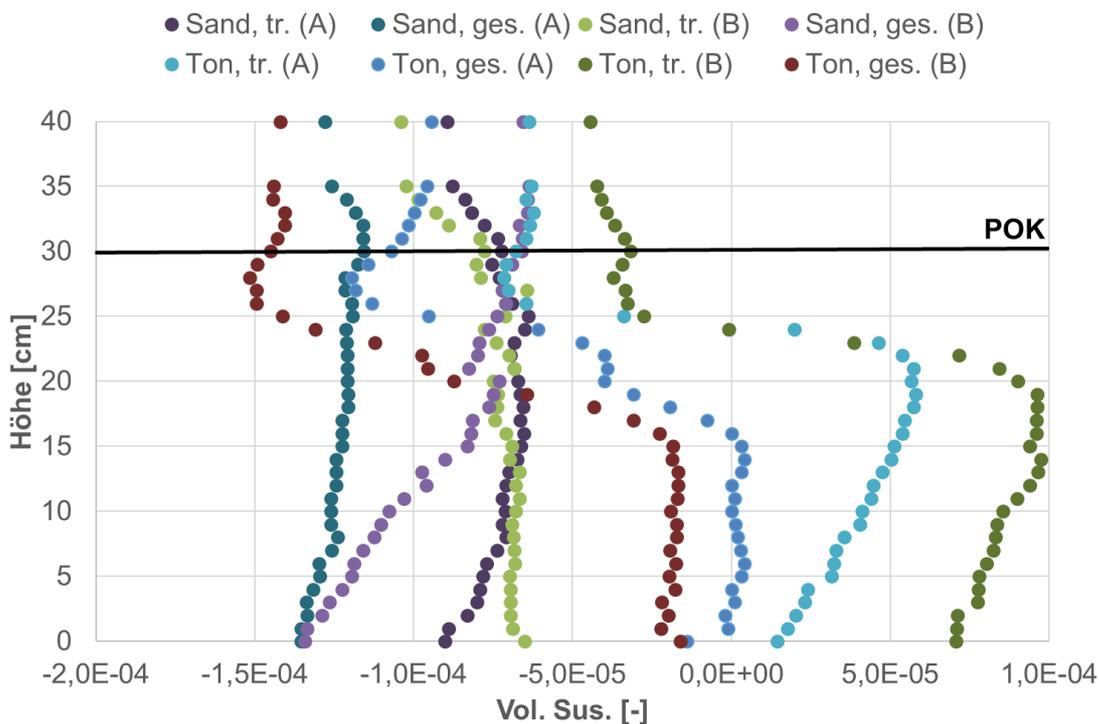


Abbildung 6-155: MS2H-Profile gemessen an Lockergesteinen (Sand, Ton, trocken und gesättigt, POK = Probenoberkante)

6.6.1.17. Zusammenfassung und Lösungsvorschläge für ein verbessertes magnetisches Messsystem und dotierte Verfüllbaustoffe

Die Ergebnisse bzgl. der Suszeptibilitätsmesssysteme, bzw. des CemTrakker, sowie der dotierten Verfüllbaustoffe, zeigen Verbesserungspotential hinsichtlich der Füllstandskontrolle, sowie der Detektion von Fehlstellen nach dem Verfüllvorgang.

Der CemTrakker zeigt im einfachen Laborversuch mit nur einem Sondenrohr deutliches Potential im Hinblick auf die Detektion bereits tischtennisballgroßer Fehlstellen, die durch die Langzeitstabilität der untersuchten Verfüllbaustoffe auch noch nach langer Zeit detektierbar sind. Im Realmaßstab ist dies jedoch nicht so einfach, da mindestens 2 oder sogar 4 Sondenrohre nebeneinanderliegen (+ Verfüllrohr, jedoch mit Verfüllbaustoff gefüllt) und das magnetische Signal je nach Lage verfälschen können. Das kann zur Interpretation von Fehlstellen führen, wo eigentlich keine sind. Zusätzlich kommt die geringe Eindringtiefe des CemTrakker (ca. 20 mm) hinzu, die eine verlässliche Aussage bzgl. Fehlstellen über die gesamte Bohrlochquerschnittsfläche nicht zulässt. Die genannten Schwachpunkte können im „Worst case“ auch die Füllstandskontrolle stören (Messwert <2), bei unvorteilhafter Lage der Sondenrohre, sowie einem Verfüllbaustoff mit relativ geringem Suszeptibilitätssignal. Ein Ansatz, die Messtechnik zu verbessern, wäre eine Erhöhung der Eindringtiefe des Messensors, sofern das technisch gut umsetzbar ist. In Abbildung 6-156 sind dazu exemplarisch vier mögliche Bohrlochsznarien dargestellt (viele weitere sind möglich). Die Bohrloch- und Sondenrohrdurchmesser sowie die aktuelle Sensorreichweite sind Maßstabsgetreu dargestellt für eine $\varnothing 150$ mm Bohrung mit 32x2,9 mm Duplex Sonde. Szenario 1 der oberen Reihe zeigt eine optimale Lage der Sondenrohre, bei der der Sensor nur Verfüllung misst

(Maximalwert). Szenarien 2-4 zeigen nicht optimale Lagen bei denen die Sensormessung z.B. durch Sondenrohre (2), durch die Geologie am Bohrlochrand (3) oder durch Fehlstellen (4) beeinflusst wird. Da die Lage der Sondenrohre im Bohrloch nie bekannt ist, ist es nicht möglich, die Szenarien 2-4 auseinanderzuhalten. Eine mögliche Lösung ist die Erweiterung der Sensorreichweite, so dass der Sensor an jedem Punkt im Bohrloch immer das gesamte Bohrloch erfasst. Signalbeeinflussungen wie unter 2 und 3 würden auf diese Weise wegfallen, und man würde nur beim Auftreten von Fehlstellen eine Signaländerung verzeichnen (siehe Abbildung 6-156, Szenario 1-4, untere Reihe). Inwieweit eine solche Verbesserung möglich ist, ist mit sensorproduzierenden Firmen zu klären. Falls ja, so könnten jedoch Abstandshalter, Zentrierer und eine Geologie mit deutlicher Suszeptibilität im ferri-ferromagnetischen Bereich aber immer noch zu Störsignalen führen. Bei der Geologie kann jedoch eine Vorabmessung der EWS-Rohre vor der Verfüllung mögliche Störeinflüsse aufdecken, die dann später rausgerechnet werden können. Dies ist ohne größeren Messaufwand möglich, so dauert die Messung eines 100 m EWS-Rohrs mit dem CemTrakker ca. 5 min. Die Messung aller Sondenrohre einer EWS ist zudem immer empfehlenswert, da aufgrund der variablen Lage der einzelnen Sondenrohre auch der Störeinfluss variieren kann. Bei Abstandshaltern und Zentrieren (sofern verwendet) ist die Tiefe des Anbringens zu dokumentieren, so können ggf. dadurch auftretende Störsignale zugeordnet werden, sofern sich die Abstandshalter beim Einbau der EWS nicht deutlich verschieben. Würde letzteres passieren, so wäre dies jedoch zumindest messtechnisch nachweisbar.

Vorhandene Bohrröhre, vor allem während der Füllstandskontrolle, stellen kein Problem dar, da deren Störsignal leicht erkennbar, und manuell am CemTrakker kompensiert werden kann.

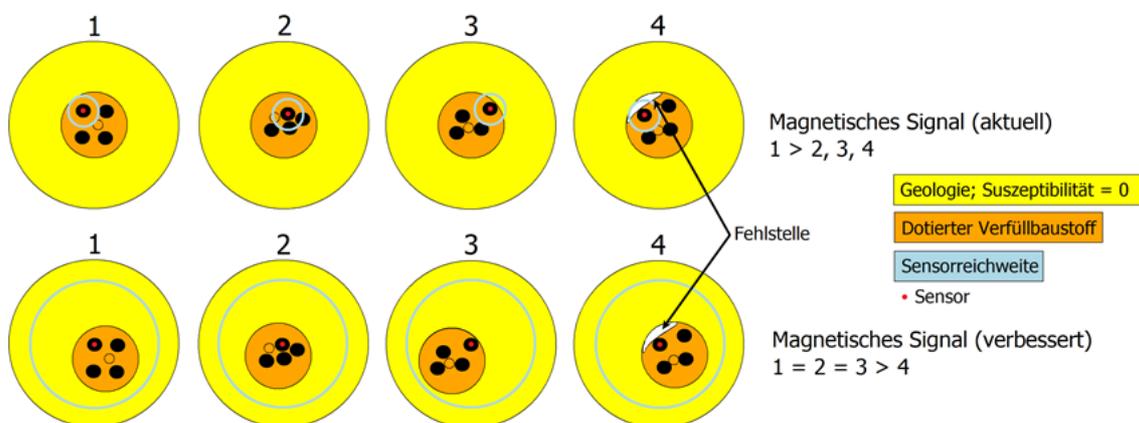


Abbildung 6-156: Aktuelle und (mögliche) verbesserte Funktion des CemTrakker für die Nachkontrolle

Ob mit einem System mit größerer Eindringtiefe eine sichere Fehlstellendetektion möglich ist, müsste getestet werden, allerdings wäre das Potential mit Sicherheit größer als mit der aktuellen CemTrakker Version. Eine größere Sensorreichweite kann u.U. auch für die Verpresskontrolle von Vorteil sein. Hierzu ein Sketch in Abbildung 6-157. In diesem Fall ist das „Worst case“ Szenario aus Abbildung 6-146 nochmal gezeigt. Wie gesagt kann es in diesem Fall je nach Verfüllbaustoff zu einem CemTrakker Messwert < 2 kommen, der bei der Füllstandskontrolle zu Fehleinschätzungen führen kann. Bei einer Erweiterung des Sensorfelds, so dass der Sensor an je-

dem Punkt immer den ganzen Bohrlochquerschnitt erfasst, würde man theoretisch über die gesamte Tiefe immer den gleichen Messwert erhalten, unabhängig von der Raumlage der Sondenrohre (Vorausgesetzt der Magnetit ist im Verfüllbaustoff homogen über die Bohrlochtiefe verteilt, und vorhandene Geologie ohne Störsignale bzw. vorheriger Referenzmessung zur Korrektur). Dies könnte eine präzisere und auf einzelne Verfüllbaustoffe abgestimmte Verfüllkontrolle ermöglichen, da jeder Verfüllbaustoff entsprechend seiner Dotierung einen für ihn charakteristischen, idealen Messwert aufweisen würde. Inwieweit dies aber tatsächlich funktionieren kann, müsste untersucht werden.

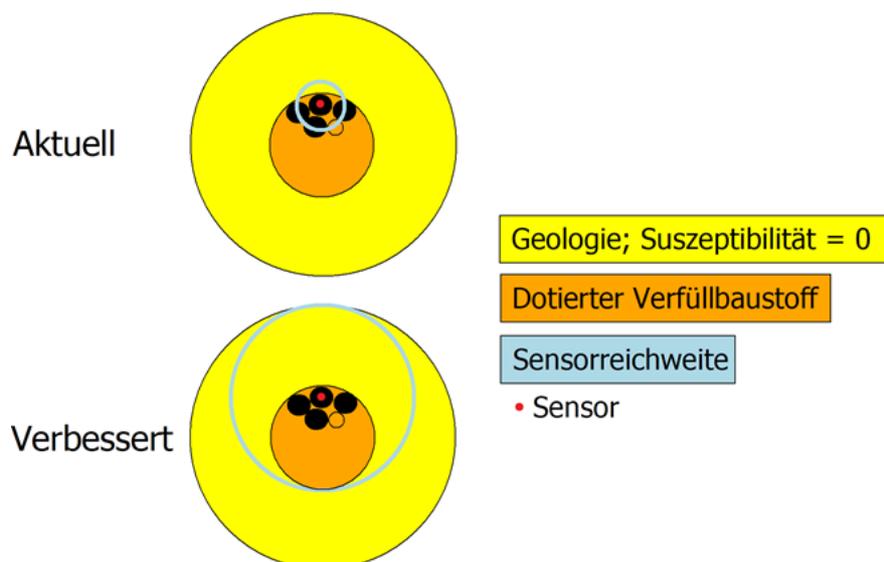


Abbildung 6-157: Aktuelle und (mögliche) verbesserte Funktion des CemTrakker für die Verpresskontrolle

Neben der Verbesserung der Messtechnik, ist aber auch eine Verbesserung der Verfüllbaustoffe wichtig. Die Tatsache, dass die beiden Verfüllbaustoffe 07d und 13+d unterschiedlich starke Signale haben, wirft die Frage auf, wie das bei anderen auf dem Markt erhältlichen Verfüllbaustoffen aussieht. Wenn dotierte Verfüllbaustoffe generell unterschiedliche Signale haben, so ist eine einheitliche Festsetzung eines Messgrenzwerts (mit der aktuellen CemTrakker Version) wie aktuell 2, zur Beurteilung der Verfüllqualität fragwürdig. Entweder muss jedem Verfüllbaustoff ein materialspezifischer CemTrakker-Messwert zur Qualitätssicherung zugeordnet werden, oder es muss wie aktuell ein CemTrakker-Messwert als Qualitätskriterium festgesetzt werden, aber gleichzeitig auch ein Fixwert für alle Verfüllbaustoffe hinsichtlich des Suszeptibilitätssignals. Letzteres macht mehr Sinn, auch im Hinblick auf die Fehlstellendetektion, die sich mit zunehmender Signalstärke verbessert. Unter den gegebenen Bedingungen, was Messtechnik und mögliche Störeinflüsse angeht, markiert 07d in etwa den Mindestwert, den ein Verfüllbaustoff aktuell aufweisen sollte, um mit der aktuellen CemTrakker-Version korrekt vermessen werden zu können. Hier lag nämlich das abgeschwächte Signal beim „Worst case“ Szenario gerade bei 2.

Auch würde ein einheitlich festgelegtes Messsignal in der Praxis einen besseren Erfahrungsaustausch hinsichtlich der Verfüllkontrolle mit dieser Methode ermöglichen (z.B. Quantifizierung der Fehlstellengrößen). Die Angabe der materialspezifischen Volumensuszeptibilität von Verfüllbaustoffen als weiteres Qualitätskriterium in Datenblättern wäre in diesem Zusammenhang sinnvoll.

Neben den aufgeführten Punkten ist weiterhin die Qualitätskontrolle von Seiten der Verfüllbaustoffhersteller, sowie die korrekte Verarbeitung der Verfüllbaustoffe beim Endverbraucher Grundvoraussetzung für eine verlässliche Füllstands- und Fehlstellenkontrolle. Gerade die Anmischbedingungen bzw. Mischerwahl, und die Einhaltung der Rezeptvorgaben für einzelne Verfüllbaustoffe sind essentiell, um einen stabilen Verfüllbaustoff und darin homogen verteilten Magnetit für eine korrekte Suszeptibilitätsmessung zu erhalten.

6.6.2. Entwicklung und Untersuchung Magnetit dotierter Referenzverfüllbaustoffe, und der Suszeptibilitätsmesssysteme

In diesem Kapitel werden Untersuchungen der magnetischen Suszeptibilität an den im Projekt entwickelten und mit Magnetit dotierten Referenzverfüllbaustoffen M1-M4 (Kapitel 6.1) beschrieben. Die Untersuchungen der magnetischen Suszeptibilität dienen im Laufe der Verfüllbaustoffentwicklung an manchen Stellen als Entscheidungshilfen für weitere Entwicklungsschritte. Schlussendlich wurden die fertig entwickelten Verfüllbaustoffe, ähnlich den kommerziellen Verfüllbaustoffen 07d und 13+d, auf Ihre Eignung im Hinblick auf die EWS-Verfüllung und magnetische Abdichtungskontrolle untersucht. Die Untersuchungen der Referenzverfüllbaustoffe wurden bei den zuvor festgelegten Standardanmischbedingungen von 650 und 2000 U/min durchgeführt. In der Entwicklungsphase wurde mit 1400 U/min gearbeitet.

6.6.2.1. Untersuchung und Bewertung von Referenzverfüllbaustoffen mit Dotierungen unterschiedlicher Korngröße und Vol.% mittels MS2C + B Messungen

Im Anschluss an die Auswahl von Magnetiten wurden Kernproben mit unterschiedlicher Dotierung und Korngröße (Fein, Mittel, Grob) hergestellt und vermessen. Es wurden drei Dotierungsstufen (1,0, 2,5 und 5,0 Vol.%) festgelegt und jeweils mit jeder Korngröße kombiniert. Zu jeder Korngrößen/Vol.% Kombination wurden jeweils zwei Proben hergestellt (Abbildung 6-158).

In diesem Fall wurden 20 cm lange Kernproben hergestellt. Das hatte den Hintergrund, dass die Proben vom Partner MPA in einem Überkopfschüttler hergestellt wurden, der max. 20 cm lange Proben aufnehmen konnten. Basierend auf den Ergebnissen aus Kap. 6.6.1.2, sowie den Angaben aus dem Bartington Handbuch, sind die Messwerte dieser Proben also nicht als materialspezifisch anzusehen, da Randeffekte miterfasst werden. Der Sinn dieser Messungen war aber in erster Linie ein relativer Vergleich, für den materialunspezifische Werte ausreichen. Die Mischungen wurden bei 1400 U/min angemischt.

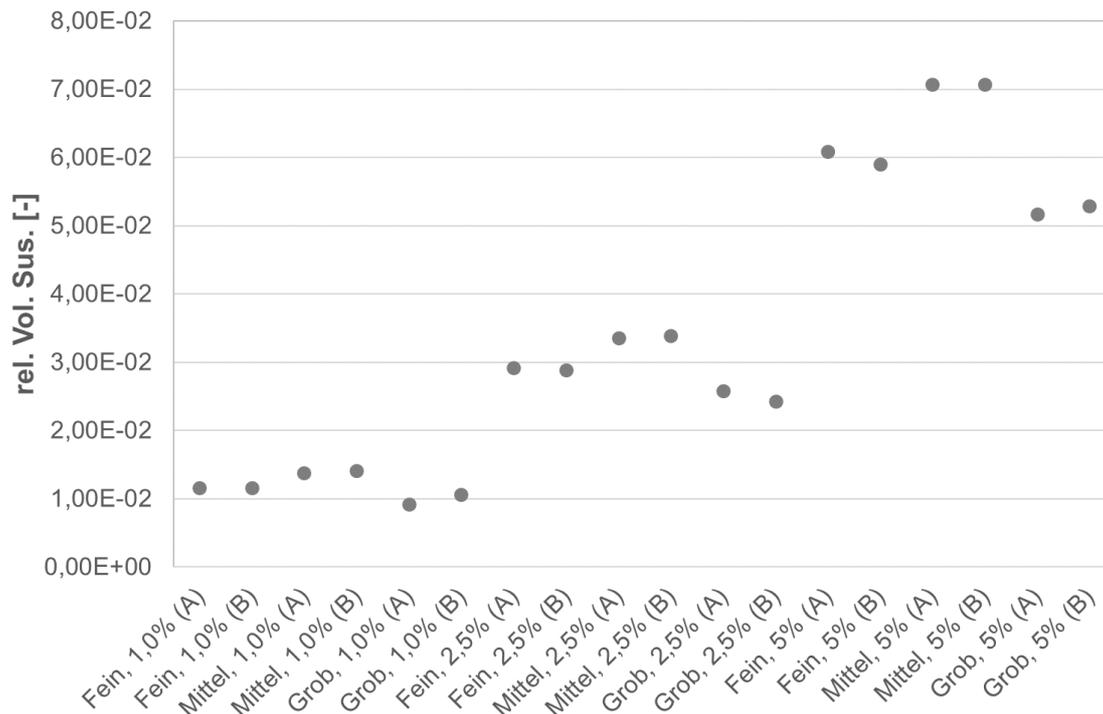


Abbildung 6-158: Untersuchung unterschiedlicher Dotierungen (Korngröße, Vol.%) an 20 cm Kernen mit dem MS2C

A & B Proben für jede Korngrößen/Vol.% Kombination stimmen jeweils gut überein. Eine Beobachtung die logisch erscheint, ist die Zunahme des Signals mit zunehmendem Vol.%. Auffällig ist, dass sich bei jeder Vol.%-Stufe ein Ranking ergibt bei der der grobe Magnetit das schwächste und der mittlere Magnetit das stärkste Signal aufweist. Dies stimmt nicht mit den Untersuchungen der reinen Magnetite aus Tabelle 6-2 überein, denn bei diesen steigt das Signal von fein zu grob. Eine Erklärung für diesen Effekt kann das Absinkverhalten der Magnetitkörner beim Herstellungsprozess der dotierten Referenzverfüllbaustoffe sein. Eine Untersuchung der dotierten Referenzverfüllbaustoffpulver mit dem MS2B ergab, dass die Pulverproben ein ähnliches Suszeptibilitäts-Ranking wie die Kernproben aufweisen (siehe Tabelle 6-36). Zumindest weist der mittlere Magnetit auch in diesem Fall immer das höchste Signal auf. Die Differenzierung zwischen fein und grob ist nicht immer ganz eindeutig, vermutlich weil die Signale nahe beieinander liegen und geringe Messabweichungen sowie Herstellungsabweichungen eine Rolle spielen. Eine mögliche Erklärung für das ungleiche Ranking zwischen reinem Magnetit und dotiertem Verfüllbaustoffpulver kann eine unterschiedliche Verteilung der verschiedenen Magnetit-Korngrößen bei der Herstellung im Trockenbaustoffmischer und später auch im Suspensionsmischer sein. Eine Beobachtung kann auf diese Annahme hindeuten, vergleicht man die A und B Proben in Tabelle 6-36. Die A Proben wurden nach dem Anmischen der einzelnen Trockenbestandteile aus dem oberen Bereich des Mischbehältnisses genommen, Probe B aus dem Bodenbereich. Gerade bei den Mischungen mit grobem Magnetit und Dotierungen 2,5 und 5% haben die A Proben einen niedrigeren Messwert als die B Proben. Das kann auf ein Absinken von Magnetitpartikeln während des Mischvorgangs hindeuten. Dies kann sich in der Folge signalschwächend in den Kernproben äußern. Vermutlich erfolgt auch ein zusätzliches Absinken von Magnetitpartikeln während

oder kurz nach dem Anmischen der Suspension im Mischbehältnis, was den Effekt verstärkt. Dieser abgesetzte Magnetit fehlt dann in der Bilanz und führt zu insgesamt niedrigeren Suszeptibilitäten der Kernproben mit grobem Magnetit.

Tabelle 6-36: Volumenssuszeptibilitäten (K) der dotierten Verfüllbaustoffpulver

KG/Dot.	Pr.	K [-]	KG/Dot.	Pr.	K [-]	KG/Dot.	Pr.	K [-]
Fein/1	A	1,26E-02	Fein/2,5	A	3,24E-02	Fein/5	A	6,53E-02
	B	1,21E-02		B	3,00E-02		B	6,29E-02
Mittel/1	A	1,48E-02	Mittel/2,5	A	3,49E-02	Mittel/5	A	7,25E-02
	B	1,40E-02		B	3,71E-02		B	6,82E-02
Grob/1	A	1,19E-02	Grob/2,5	A	3,32E-02	Grob/5	A	6,11E-02
	B	1,17E-02		B	3,45E-02		B	6,48E-02

KG = Korngröße, Dot. = Dotierung in Vol.%, Pr. = Probe

Diese vermutete Absetzverhalten wurde ebenfalls untersucht. Die Messkurven der MS2C-Messung können Informationen liefern, ob es Inhomogenitäten gibt. So würde man bei einem deutlich Absetzen Abweichungen von der symmetrischen parabelähnlichen Form der Messkurven feststellen können, wie schon bei den kommerziellen Verfüllbaustoffen in den vorherigen Kapiteln gezeigt. In diesem Fall waren die Kurven allesamt parabelförmig und symmetrisch, andererseits wären die Berechnungen und Vergleiche in Abbildung 6-158 nicht möglich gewesen. Die Messkurven sind im Anhang (Abbildung 10-41) zu finden. Eine weitere Möglichkeit das Absetzen mit besserer Auflösung zu bestimmen, ist der MS2K-Auflegesensor. Hierzu kann man an beiden Probenenden jeweils neun Messpunkte messen mit einer Eindringtiefe von ca. 1 cm (siehe Kap.5.13.1.2, Abbildung 5-8). Sollte sich ein Absetzen zeigen, so würde eine Seite höhere Messwerte aufweisen als die andere (siehe Ergebnisse Abbildung 6-159, Mittelwerte aus neun Messpunkten). Wie zuvor bei den Pulverproben konnten nur bei den Dotierungsstufen von 2,5 und 5 Vol.% mit grobem Magnetit etwas erhöhte Mittelwerte auf einer Seite festgestellt werden. Das sich gerade beim groben Magnetit ein Ungleichgewicht zeigt, ist nicht verwunderlich, da mit zunehmender Korngröße die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln zunimmt (Malcherek o.D.). Vermutlich kam es so beim Aushärten trotz Überkopfschütteln zum Absinken einiger Magnetitpartikel. Beim mittlerem und feinen Magnetit und allen Dotierungsstufen gibt es keine Ungleichgewichte. Auch bestätigt die Messung mit dem Auflegesensor das Ranking, das zuvor mittels den MS2C Messungen festgestellt wurde (Abbildung 6-158). Die zuvor gemachte Vermutung über das Absetzen von Magnetitpartikeln bereits im Mischbehältnis beim oder kurz nach dem Anmischen der Suspension, liegt aufgrund dieser Ergebnisse ebenfalls nahe.

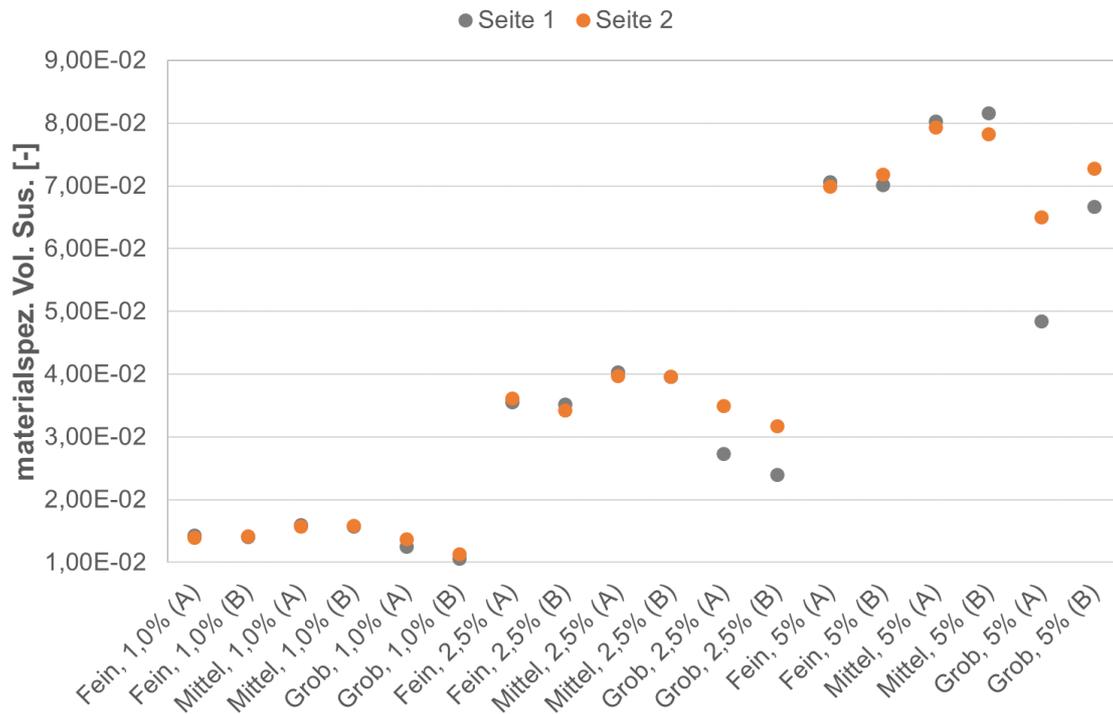


Abbildung 6-159: Mittelwerte aus neun Messpunkten jeweils an beiden Probenenden (Seite 1 & 2)

6.6.2.2. Suszeptibilitätsbestimmung an Referenzverfüllbaustoffpulvern mit dem MS2B

Im Rahmen der von EIFER durchgeführten Untersuchungen an den fertig entwickelten Referenzverfüllbaustoffen wurden einzelne Verfüllbaustoffchargen von M1-4 (je ca. 70 kg) mit dem Lödige-Trockenbaustoffmischer hergestellt. Für jede Charge wurde jeweils zur Qualitätskontrolle die magnetische Volumenssuszeptibilität K analysiert, auch wurde eine Charge M4 ohne Dotierung als Referenz hergestellt (Tabelle 6-37). Der undotierte Verfüllbaustoff (nd) hat ein um drei Zehnerpotenzen geringeres Signal. Im Übrigen liegen die Messwerte der dotierten Referenzverfüllbaustoffe M1-M4 recht gut beieinander. Dies soll auch so sein, da alle Verfüllbaustoffe die gleiche Dotierung von 2,5 Vol.% aufweisen. Signalunterschiede bei unterschiedlichen Chargen erreichen in dieser Untersuchung max.14% Abnahme ausgehend vom höchsten Wert. Diese Schwankungen sind Abweichungen beim Herstellungsprozess sowie Messabweichungen zuzuordnen. Eine Ausreißercharge markiert M2 C1 bei der vermutlich eine nicht ganz korrekte Einwaage erfolgte.

Tabelle 6-37: Volumenssuszeptibilitäten K für Referenzverfüllbaustoff (VB)-Pulver M1-M4

VB	Charge	Probe	K [-]	VB	Charge	Probe	K [-]
M1	C1	A	3,77E-02	M2	C1	A	2,92E-02
		B	3,62E-02			B	2,94E-02
	C2	A	3,26E-02		C2	A	3,59E-02
		B	3,26E-02			B	3,49E-02
VB	Charge	Probe	K [-]	VB	Charge	Probe	K [-]
M3	C1	A	3,43E-02	M4	C1	A	3,34E-02
	C1	B	3,41E-02		C1	B	3,51E-02
	C2	A	3,42E-02		C2	A	3,45E-02
	C2	B	3,35E-02		C2	B	3,61E-02
					C3	A	3,23E-02
					C3	B	3,58E-02
					C4	A	3,53E-02
					C4	B	3,49E-02
					nd	A	2,29E-05
					nd	B	1,77E-05

6.6.2.3. Untersuchungen von Referenzverfüllbaustoff suspensionen nach LQS-EWS

Tabelle 6-38 zeigt die Suspensionseigenschaften der Referenzverfüllbaustoffe beim Standard W/F von 0,28, anhand der gemessenen Werte für mehrere im Verlauf des Projekts hergestellte Chargen.

Tabelle 6-38: Suspensionseigenschaften bei 650 & 2000 U/min für die Referenzverfüllbaustoffe (VB) M1-M4 und verschiedene Chargen (C)

VB	Parameter				VB	Parameter			
M1	Dichte [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]	U/min	M2	Dichte [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]	U/min
C1	2,02	0,8	NM	2000	C1	2,03	0,0	219	2000
C1	2,05	0	NM	650	C1	2,01	0,0	415	650
C2	2,07	0,8	NM	2000	C2	2,02	0,0	211	2000
C2	2,00	0	NM	650	C2	2,00	0,0	422	650
VB	Parameter				VB	Parameter			
M3	Dichte [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]	U/min	M4	Dichte [g/cm ³]	AM [Vol.%]	MZ [s]	U/min
C1	2,02	0,0	83	2000	C1	2,02	0,0	117	2000
C1	2,02	0,0	102	650	C1	2,01	0,0	311	650
C2	2,02	0,0	82	2000	C2	1,99	0,0	132	2000
C2	2,01	0,0	100	650	C2	2,06	0,0	264	650
					C3	2,03	0,0	119	2000
					C3	2,08	0,0	252	650
					C4	2,03	0,0	120	2000
					C4	2,03	0,0	289	650

Wesentliche Unterschiede bei den vier Verfüllbaustoffen sind vor allem bei der Marshzeit zu erkennen. Das Absetzmaß ist durchweg bei 0, außer beim Verfüllbaustoff M1 bei 2000 U/min geringfügig höher bei 0,8%. Die Dichtewerte liegen im Wesentlichen zwischen 2,01-2,03. Etwaige Ausreißer sind vermutlich auf Mess- und Herstellungsfehler und z.T. auch unterschiedliche Bearbeiter im Verlauf des Projekts zurückzuführen. Tabelle 6-39 zeigt ergänzend die Zusammensetzung der Verfüllbaustoffe M1-4 hinsichtlich der Gehalte an Fließmittel und Stabilisierer.

Tabelle 6-39: Gehalte an Fließmittel und Stabilisierer in den Referenzverfüllbaustoffen (VB) M1-M4 sowie deren Eigenschaften

VB	Fließmittel [g/1 Liter Susp.]	Stabilisierer [g/1 Liter Susp.]	Verfüllbaustoffeigenschaften
M1	0	0,21	Hohe FG und hohe ER
M2	0,64	2,14	Hohe T und hohe ER
M3	0,59	0	Niedrige FG und geringe ER
M4	0,43	0,75	Mittlere FG, geringe T und hohe ER

ER = Entmischungsresistenz, FG = Fließgrenze, Susp. = Suspension, T = Thixotropie

Abbildung 6-160 zeigt eine Gegenüberstellung der Marshzeit jeweils mit Fließmittel und Stabilisierer-Gehalten. Da bei M1 keine Marshzeit messbar war, ist diese nicht in der Abbildung enthalten.

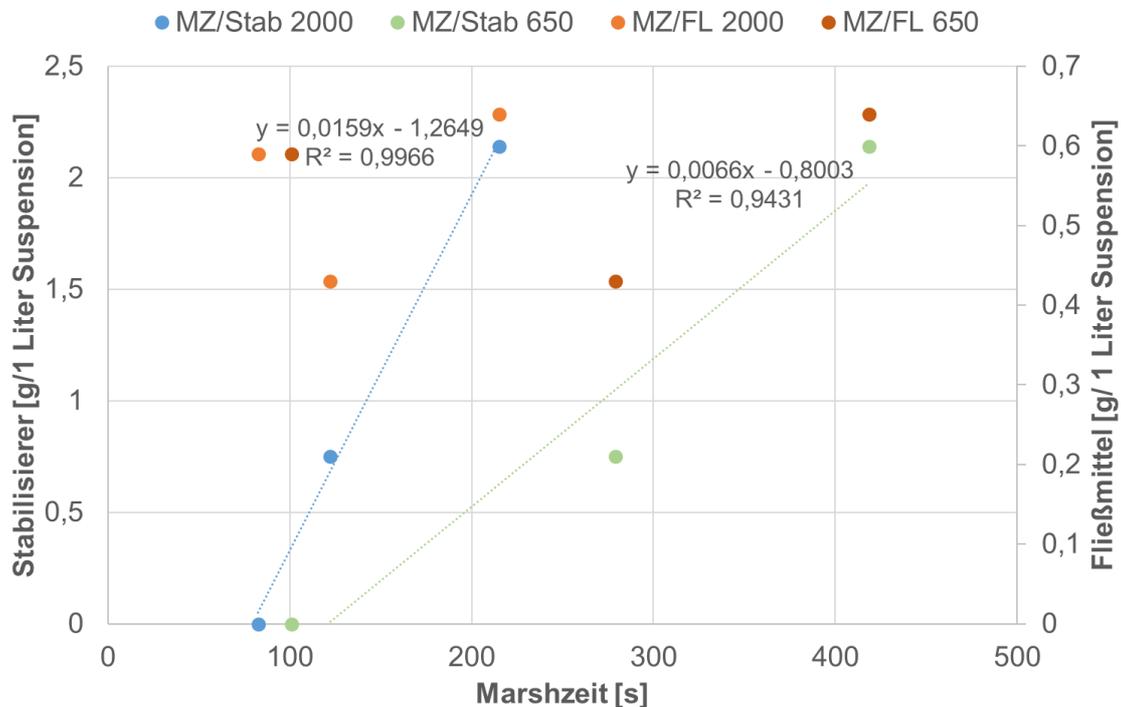


Abbildung 6-160: Gegenüberstellung von Marshzeit (MZ) mit Fließmittel (FL) und Stabilisierer (Stab)-Gehalt bei unterschiedlichen Anmischbedingungen

Man kann erkennen, dass es keine Korrelation zwischen Marshzeit und Fließmittelgehalt gibt. Das liegt vermutlich daran, dass die Fließmittelgehalte bei M2-M4 nur geringfügig voneinander differieren. Hingegen sind die Unterschiede bei den Stabilisierergehalten für M2-M4 wesentlich deutlicher, und es zeigt sich auch eine lineare Beziehung zwischen Stabilisierergehalt und Marshzeit, bzw. die Marshzeit nimmt mit Zunahme an Stabilisierer zu. Viskositätszunahme von Baustoffsuspensionen ist ein typischer Effekt, der bei Zugabe von polymerbasierten Stabilisierern auftritt. Der Effekt ist in diesem Fall stärker bei 650 U/min als bei 2000 U/min ausgebildet. Höhere Marshzeiten wurden durchweg bei allen Untersuchungen mit niedrigeren Anmischbedingungen (650 U/min) festgestellt (Tabelle 6-38). Das hängt mit dem schlechteren Aufschluß der Verfüllbaustoffbestandteile zusammen. Das schlechte Aufschließen wird durch den Stabilisierer möglicherweise noch verstärkt. Dass die Marshzeit bei M1 nicht messbar ist, würde bei ausschließlicher Betrachtung des Stabilisierergehalts nicht in den linearen Trend passen. Allerdings ist durch das vollständige Fehlen von Fließmittel, M1 als Ausreißer zu betrachten.

6.6.2.4. Untersuchung von Qualitätsunterschieden bei M1-M4 und unterschiedlichen Anmischgeschwindigkeiten (650 & 2000 U/min)

Abbildung 6-161 zeigt den Vergleich der Volumenssuszeptibilitäten von M1-M4, gemessen an 50 cm Proben, hergestellt bei 650 und 2000 U/min und einem Standard W/F von 0,28. In diesem Fall sind die Messkurven gezeigt und nicht die errechneten materialspezifischen Volumenssuszeptibilitäten aus den Plateaus, um Qualitätsunterschied besser zeigen zu können. Auf den ersten Blick zeigen alle vier Referenzverfüllbaustoffe ein Plateau, sowohl bei 650 als auch bei 2000 U/min. Auch die Signalstärke ist wie zu erwarten bei allen Verfüllbaustoffen die gleiche mit geringen Schwankungen, die auf kleine Herstellungsfehler bei der Trockenmischung (Chargenunterschiede) wie auch beim späteren Anmischen mit Wasser zurückzuführen sind. Qualitätsunterschiede, die aus den unterschiedlichen Stabilisierer- und Fließmittelgehalten resultieren, sind nur zur erahnen. Eigentlich ist das nur bei M3 zu erkennen, da sich eine leichte Steigung des Messplateaus von oben nach unten andeutet (Absetzen von Magnetit). Dieser Effekt ist vermutlich auf das Fehlen von Stabilisierer zurückzuführen (M3 hat die geringste Entmischungsresistenz von allen Referenzverfüllbaustoffen). Bei den übrigen Verfüllbaustoffen ist diese nicht der Fall, bei M4 sieht man den Effekt sogar umgekehrt, d.h. eine leichte Steigung von unten nach oben. Das ist ein Effekt, der schon in Kap.6.6.1.6 beim Verfüllbaustoff 13+d (Abbildung 6-115) beobachtet wurde. Vermutlich hängt das mit einem ersten Absinken von Magnetit im Mischeimer während dem Anmischen zusammen, ein anschließendes Eingießen dieses Magnetitabsatzes in den oberen Bereich der Probe, und eine Konservierung des Magnetits im oberen Bereich durch relativ schnelle Viskositätserhöhung.

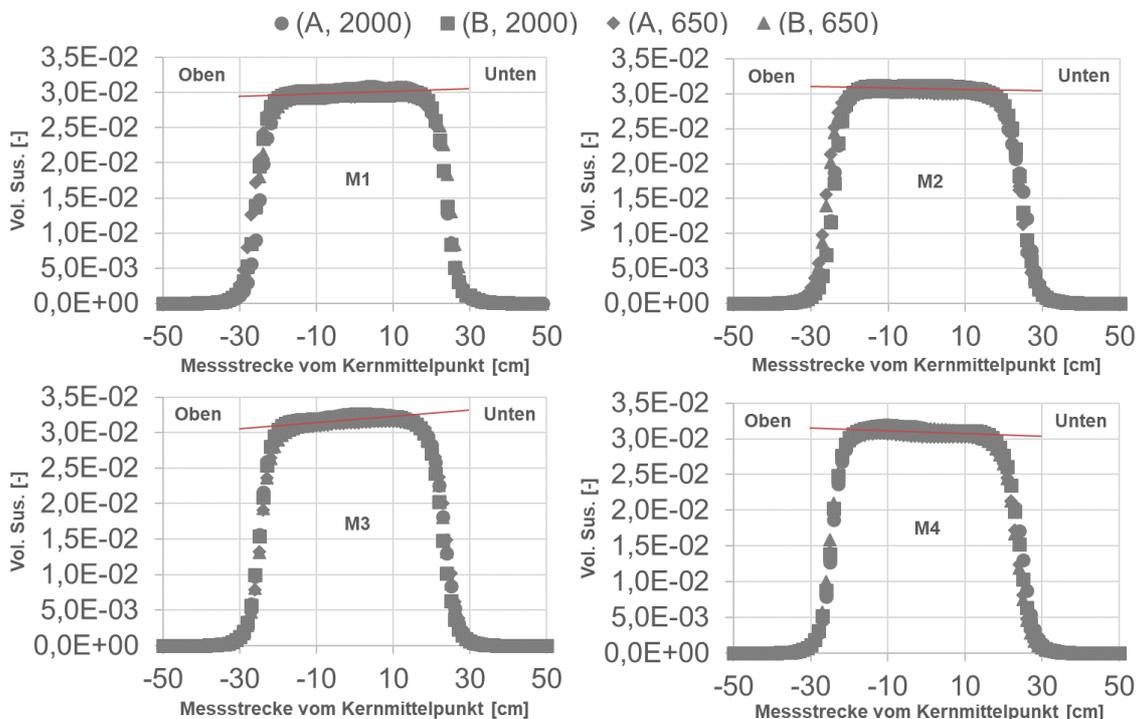


Abbildung 6-161: Vergleich von M1-M4 bei 650 und 2000 U/min. Der rote Strich zeigt die Steigung der Plateaus an

6.6.2.5. Untersuchung des Einflusses steigender W/F Verhältnisse und Anmischbedingungen auf das Messsignal

Abbildung 6-162 zeigt die materialspezifischen K bei unterschiedlichen W/F für den Verfüllbaustoff M1 bei 650 und 2000 U/min. Abbildung 6-163 zeigt exemplarisch die Messkurven beim Standard W/F und beim W/F bei dem sich Magnetit erstmalig sichtbar abtrennt. In Abbildung 6-164 und Abbildung 6-165 sind zusätzlich die Suspensionsdichten sowie Absetzmaße der Proben bei den unterschiedlichen W/F aufgetragen. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Bei einer Erhöhung des W/F von 120-140% ausgehend vom Standard W/F von 0,28 ($W/F=0,616-0,672$) zeigt sich bei 650 & 2000 U/min eine Magnetitabtrennung im Verfüllbaustoff, deshalb sind die Messwerte bei $W/F=0,672$ nicht mehr als materialspezifisch anzusehen und gelten somit als Ausreißer (rot umkreist).
- Die Signalabnahme, die mit zunehmendem W/F bei beiden Anmischbedingungen festgestellt werden kann, lässt sich mit der abnehmenden Suspensionsdichte erklären (Abbildung 6-164).
- Entgegen allen anderen kommerziellen und Referenzverfüllbaustoffen in diesem Projekt, weist M1 bei einer W/F Erhöhung eine umgekehrte Magnetitanomalie auf, d.h. der Magnetit reichert sich im oberen anstatt im unteren Probenbereich an (siehe Abbildung 6-163). Vermutlich ist dies auf zwei zusammenfallende Effekte zurückzuführen. Beim Anmischen ($W/F=0,672$) und nach Abstellen des Mischers kommt es bereits zu einer ersten Abtrennung von Magnetit in der Suspension. Dieser Magnetit befindet sich dann im Bodenbereich des Mischeimers und wird später beim Eingießen in die Probenform zuletzt ganz oben in die Probe gegossen. Außerdem besitzt M1 die stärkste Viskosität von allen Referenzverfüllbaustoffen (Marshzeit nicht messbar, siehe Tabelle 6-38), so dass vermutlich die Viskosität auch bei dem hohen W/F noch relativ schnell ansteigt und somit die Magnetitanreicherung im oberen Probenbereich konserviert wird.
- Das kritische Absetzmaß ist bei beiden Anmischbedingungen bereits bei $W/F=0,448$ erreicht und ist somit der übergeordnete Qualitätsparameter beim Vergleich mit der Magnetitabtrennung.

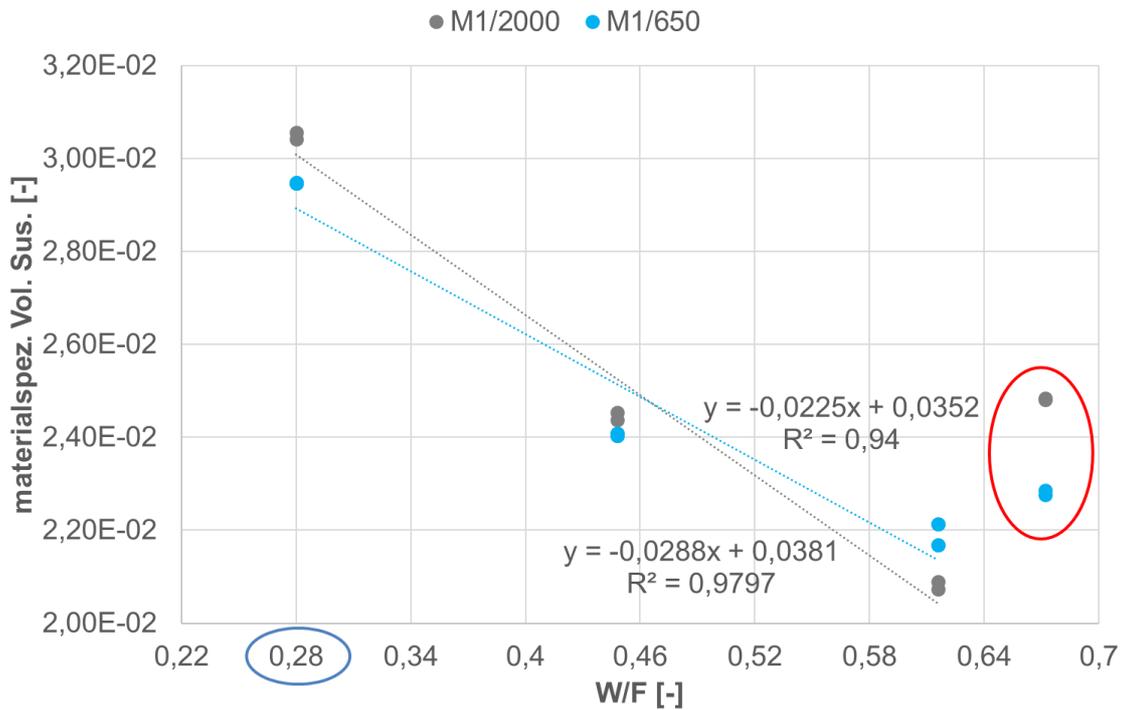


Abbildung 6-162: Einfluss steigender W/F auf das materialspez. K für M1 und variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Kreis markiert Ausreißer

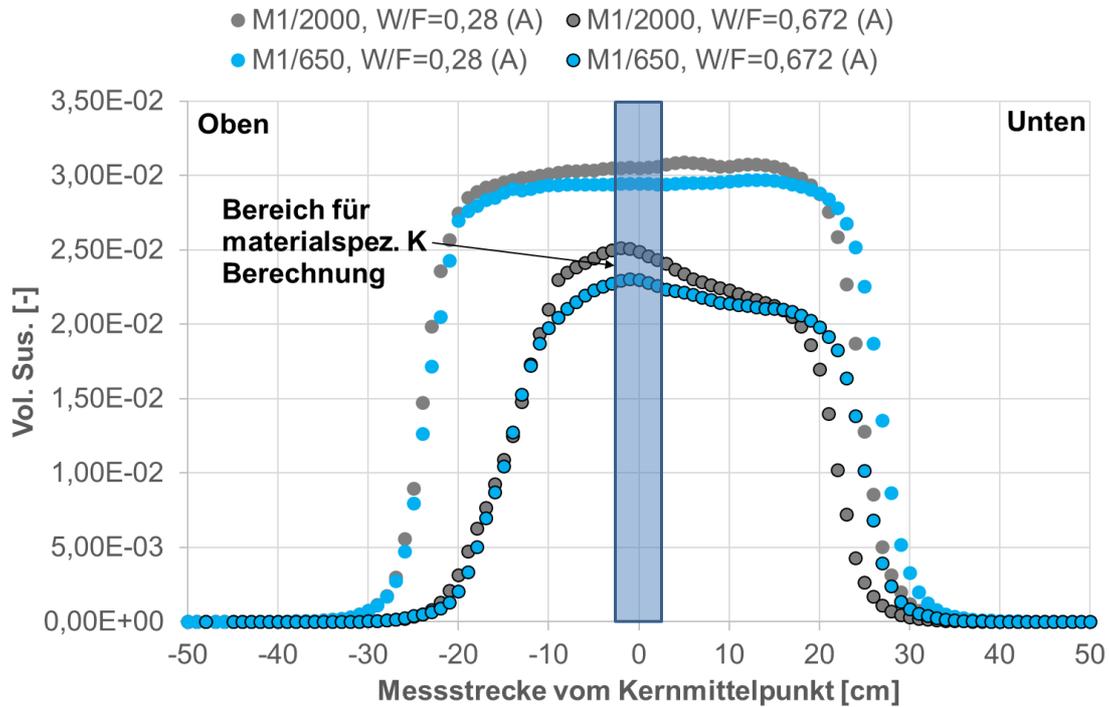


Abbildung 6-163: Berechnung des materialspez. K

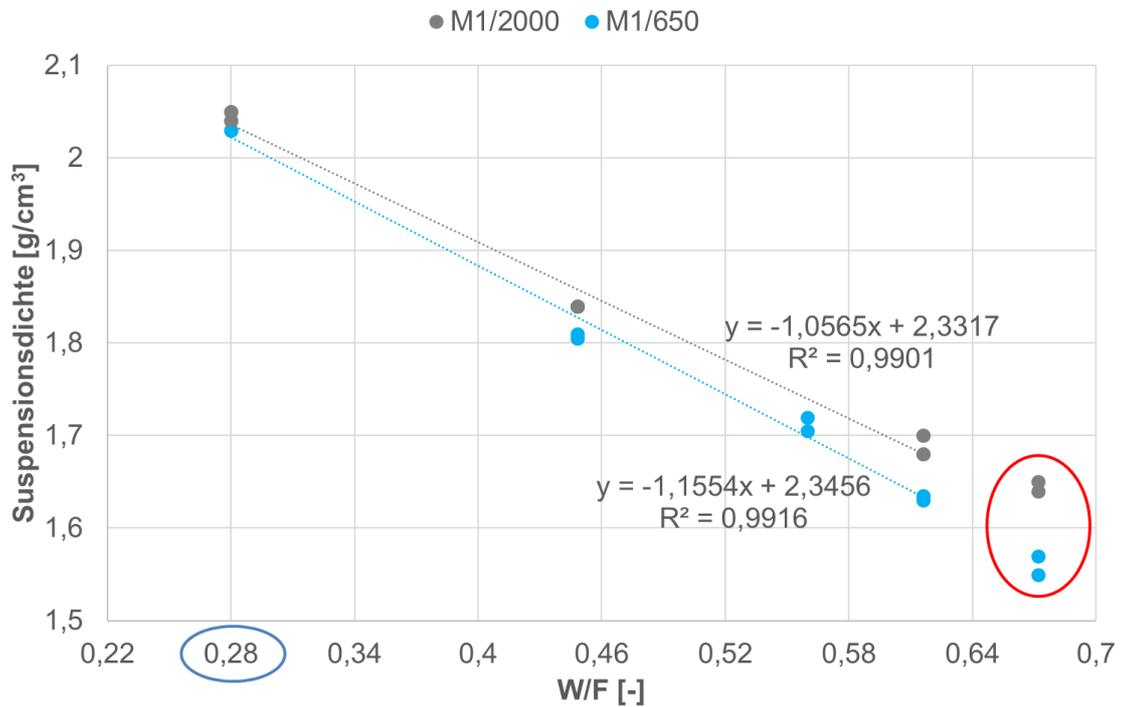


Abbildung 6-164: Einfluss steigender W/F auf die Suspensionsdichte für M1 bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Kreis markiert Ausreißer

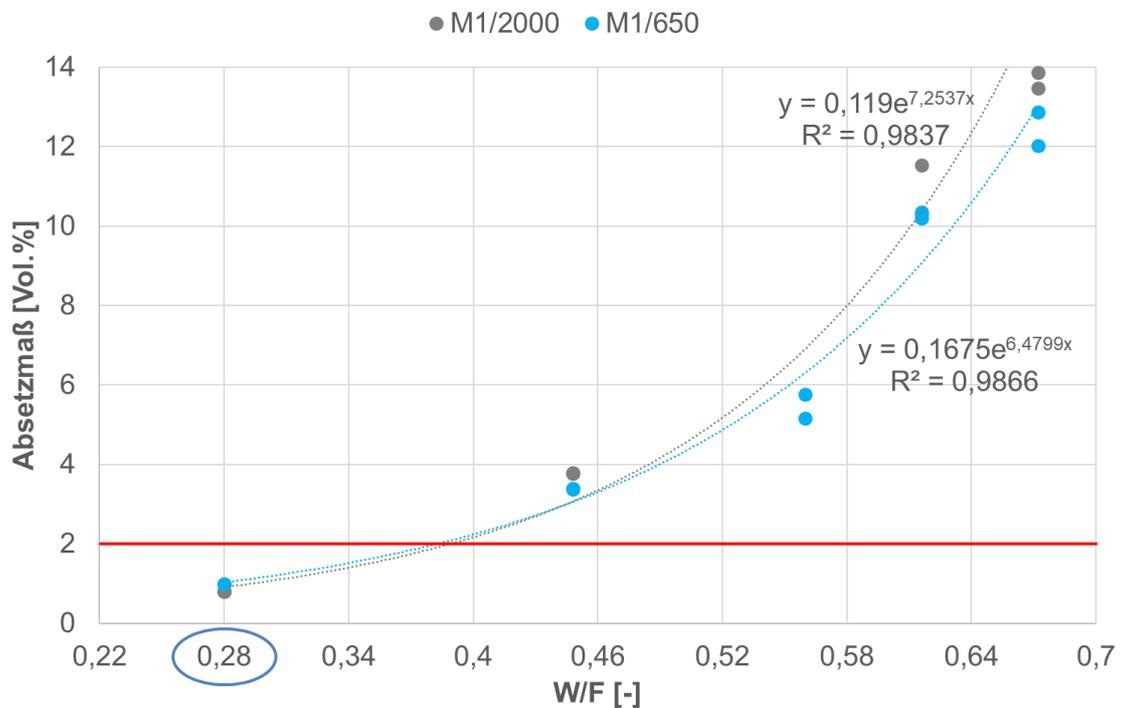


Abbildung 6-165: Einfluss steigender W/F auf das Absetzmaß für M1 bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Strich markiert das kritische Absetzmaß nach LQS-EWS

Abbildung 6-166 bis Abbildung 6-169 zeigen die gleichen Untersuchungen für M2, wie zuvor für M1. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Bei einer Erhöhung des W/F von 60-80% (W/F=0,448-0,504) ausgehend vom Standard W/F von 0,28 zeigt sich bei 650 U/min eine Magnetitabtrennung im Verfüllbaustoff, bei 2000 U/min zeigt sich dies bereits bei einer Erhöhung von 40-60% (W/F=0,392-0,448). Deshalb sind die Messwerte bei W/F=0,504 für 650 U/min und W/F=0,448 bei 2000 U/min nicht mehr als materialspezifisch anzusehen und gelten somit als Ausreißer (rot umkreist).
- Die Signalabnahme mit zunehmendem W/F ist wieder mit der abnehmenden Suspensionsdichte zu erklären (Abbildung 6-168). Ein kritisches Absetzmaß wird nicht erreicht. Dies ist somit der einzige Verfüllbaustoff in dieser Arbeit, bei dem das Absetzmaß nicht der übergeordnete Qualitätsparameter ist. In diesem Fall kann aber die Marshzeit als übergeordnete Qualitätsparameter angesehen werden, da bereits beim Standard W/F von 0,28, diese bei beiden Anmischbedingungen recht hoch ist (siehe Tabelle 6-38).

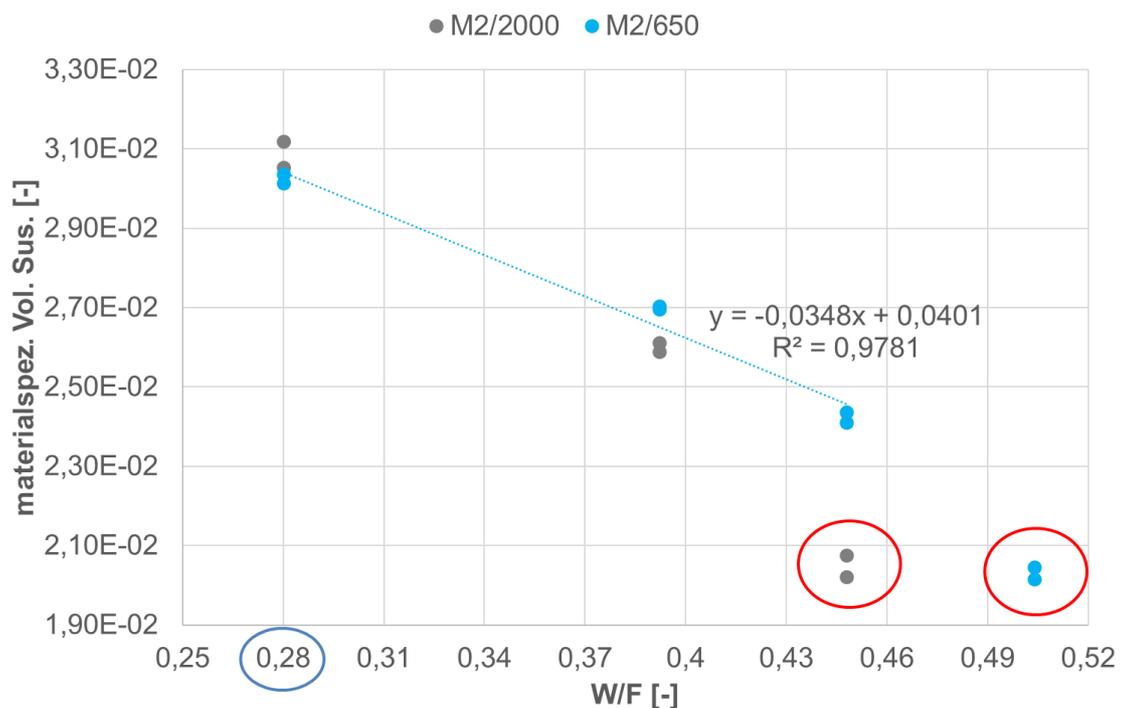


Abbildung 6-166: Einfluss steigender W/F auf das materialspez. K für M2 und variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, die roten Kreise markieren Ausreißer

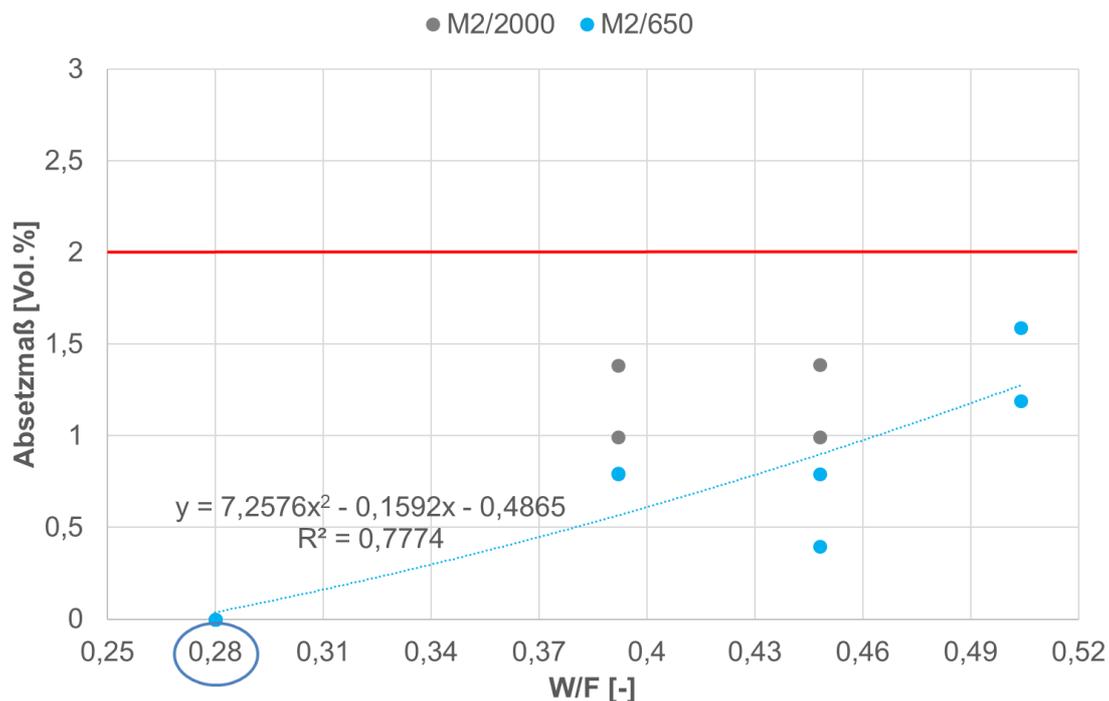


Abbildung 6-169: Einfluss steigender W/F auf das Absetzmaß für M2 bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Strich markiert das kritische Absetzmaß nach LQS-EWS

Abbildung 6-170 bis Abbildung 6-173 zeigen die gleichen Untersuchungen für M3 wie zuvor für die anderen Referenzverfüllbaustoffe. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Bei einer Erhöhung des W/F von 30-40% ausgehend vom Standard W/F von 0,28 (W/F=0,336-0,392) zeigt sich bei 650 & 2000 U/min eine Magnetitabtrennung im Verfüllbaustoff, deshalb sind die Messwerte bei W/F=0,392 nicht mehr als materialspezifisch anzusehen und gelten somit als Ausreißer (rot umkreist).
- Die Signalabnahme mit zunehmendem W/F ist wieder mit der abnehmenden Suspensionsdichte zu erklären (Abbildung 6-172). Ein kritisches Absetzmaß ist bei 650 U/min bereits bei W/F=0,336 erreicht, bei 2000 U/min ebenfalls, wobei es deutlich ausgeprägter ist als bei 650 U/min.
- Entgegen den Erfahrungen mit den kommerziellen Verfüllbaustoffen (Kap. 6.6.1.6) erscheint der Magnetit in M3 bei geringeren Anmischgeschwindigkeiten und steigendem W/F etwas stabiler. Das ist an den Messkurven in Abbildung 6-171 abzulesen, die bei W/F=0,392 ein schwächeres Absetzen bei 650 U/min andeuten. Das Absetzmaß ist auch weniger ausgeprägt bei niedrigeren Anmischbedingungen und ist der übergeordnete Qualitätsparameter (bei beiden Anmischbedingungen), da der kritische Wert schon bei W/F von 0,336 erreicht wird, hingegen der Magnetit sich erst bei höherem W/F abtrennt.

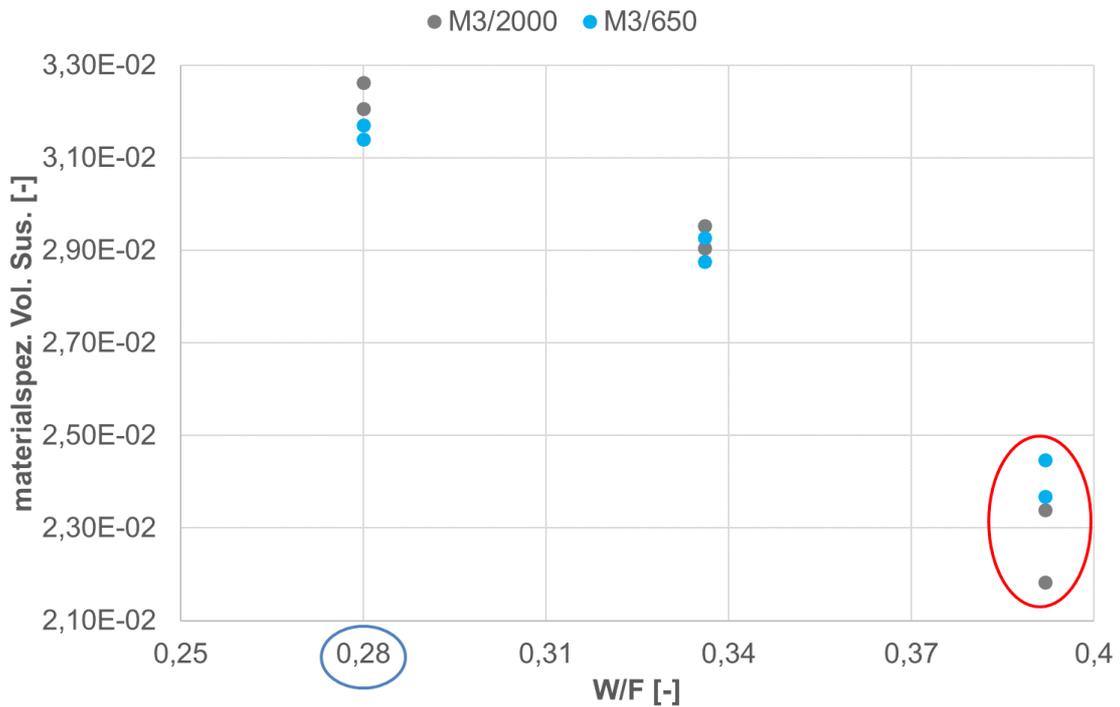


Abbildung 6-170: Einfluss steigender W/F auf das materialspez. K für M3 und variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Kreis markiert Ausreißer

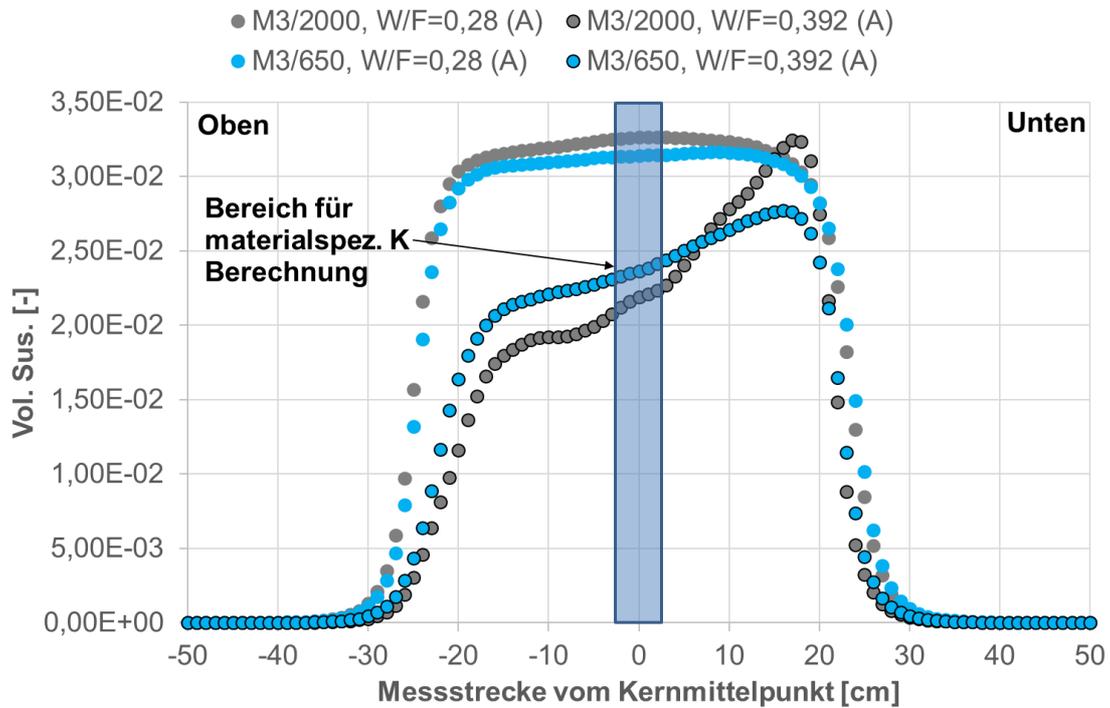


Abbildung 6-171: Berechnung des materialspez. K

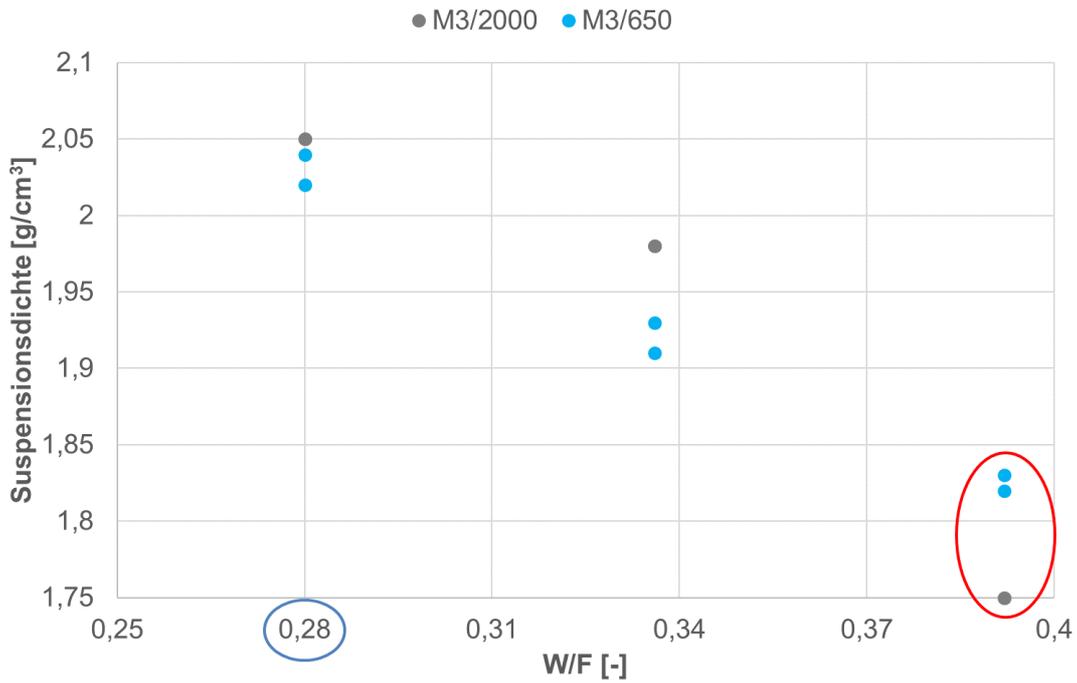


Abbildung 6-172: Einfluss steigender W/F auf die Suspensionsdichte für M3 bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Kreis markiert Ausreißer

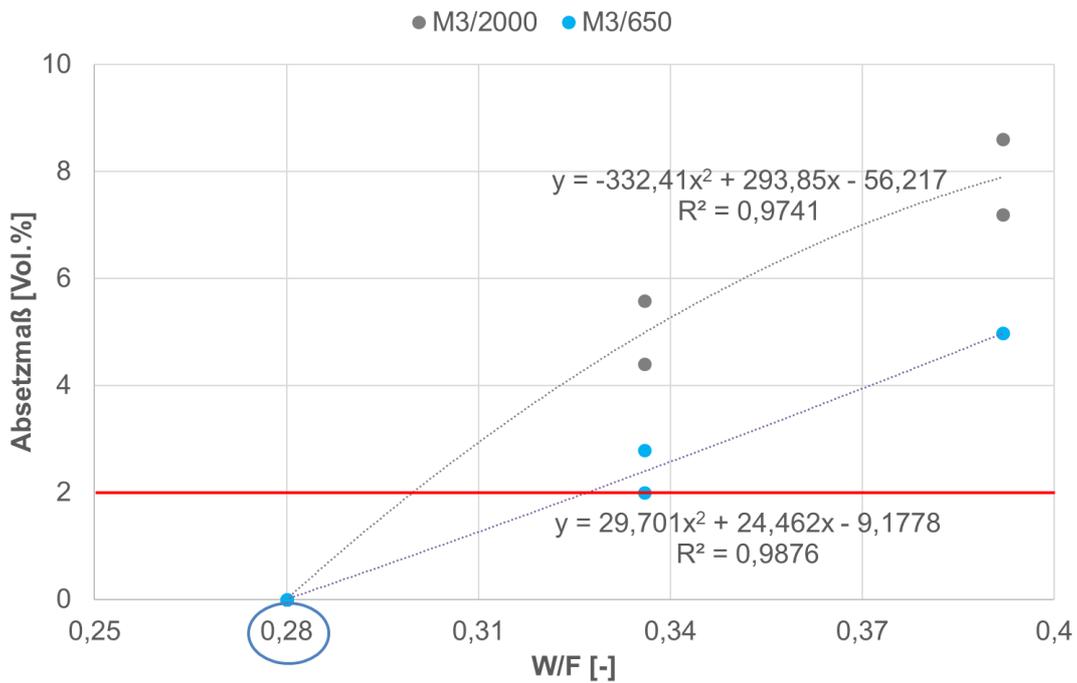


Abbildung 6-173: Einfluss steigender W/F auf das Absetzmaß für M3 bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Strich markiert das kritische Absetzmaß nach LQS-EWS

Abbildung 6-174 bis Abbildung 6-177 zeigen die gleichen Untersuchungen für M4 wie zuvor für die anderen Referenzverfüllbaustoffe. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Bei einer Erhöhung des W/F von 80-100% ausgehend vom Standard W/F von 0,28 (W/F=0,504-0,56) zeigt sich bei 2000 U/min eine Magnetitabtrennung im Verfüllbaustoff, deshalb ist der Messwert bei W/F=0,56 nicht mehr als materialspezifisch anzusehen und gilt somit als Ausreißer (auch wenn der Messwert scheinbar in den Trend passt). Das gleiche gilt bei 650 U/min und W/F von 0,728. Die Ausreißer sind in Abbildung 6-174 sind jeweils rot umkreist.
- Die Signalabnahme mit zunehmendem W/F ist wieder mit der abnehmenden Suspensionsdichte zu erklären (Abbildung 6-175) Ein kritisches Absetzmaß ist bei 650 U/min sowie bei 2000 U/min bereits beim W/F=0,392 erreicht.
- Wie bei M3 erscheint der Magnetit in M4 bei geringeren Anmischgeschwindigkeiten und steigendem W/F stabiler als bei höheren Anmischgeschwindigkeiten. Das Absetzmaß läuft bis zum kritischen Wert von 2 Vol.% hingegen gleich bei beiden Anmischbedingungen und ist der übergeordnete Qualitätsparameter, da der kritische Wert schon bei W/F von 0,392 erreicht wird.

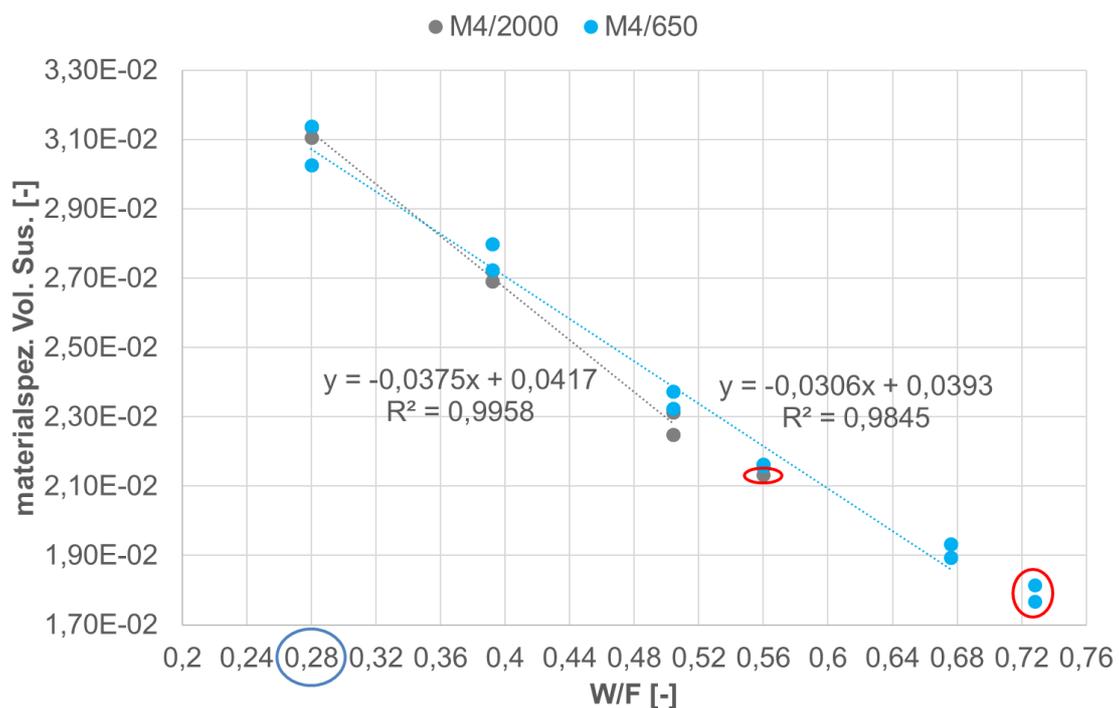


Abbildung 6-174: Einfluss steigender W/F auf das materialspez. K für M4 und variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, die roten Kreise markieren Ausreißer

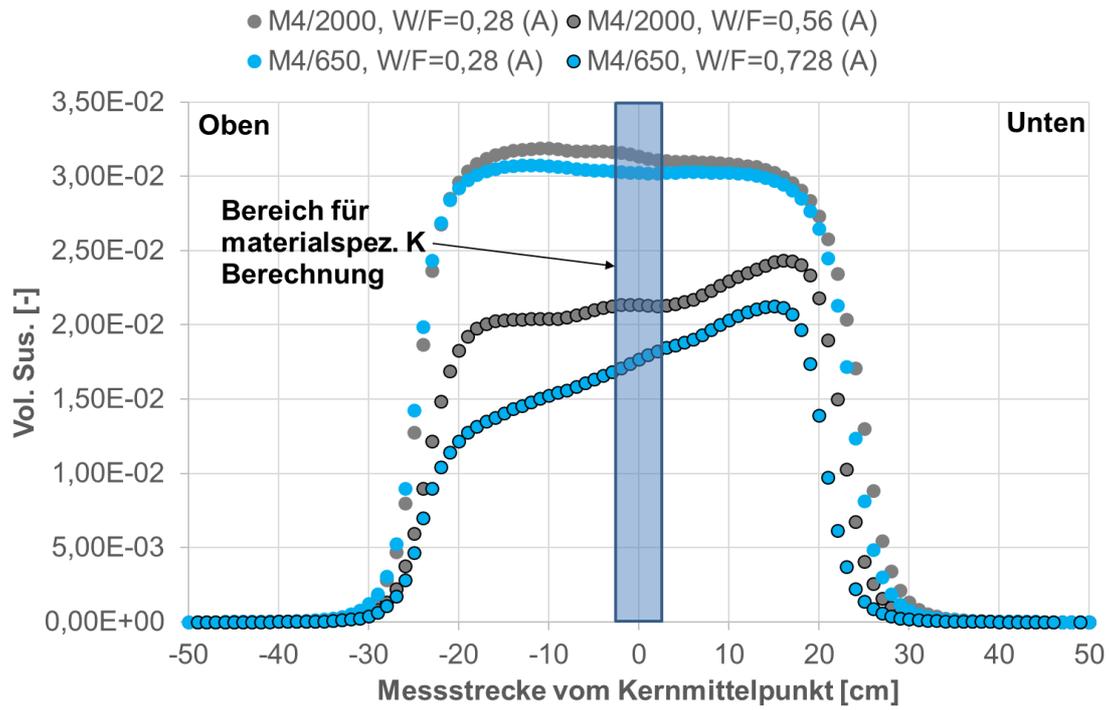


Abbildung 6-175: Berechnung des materialspez. K

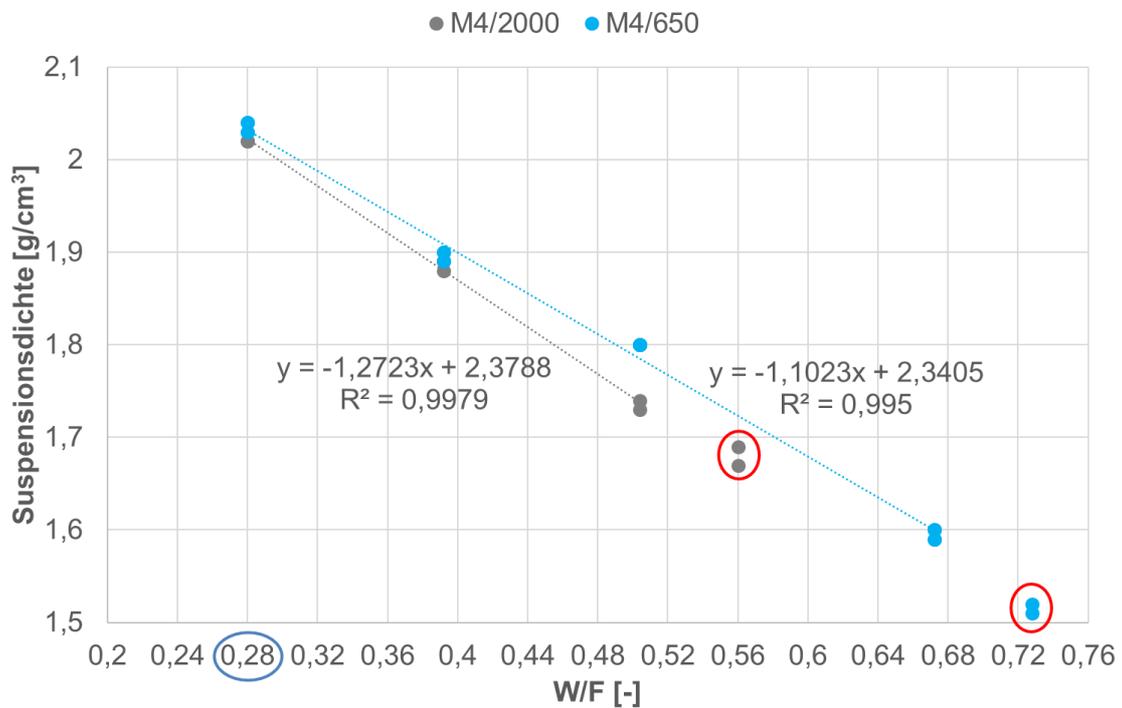


Abbildung 6-176: Einfluss steigender W/F auf die Suspensionsdichte für M4 bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, die roten Kreise markieren Ausreißer

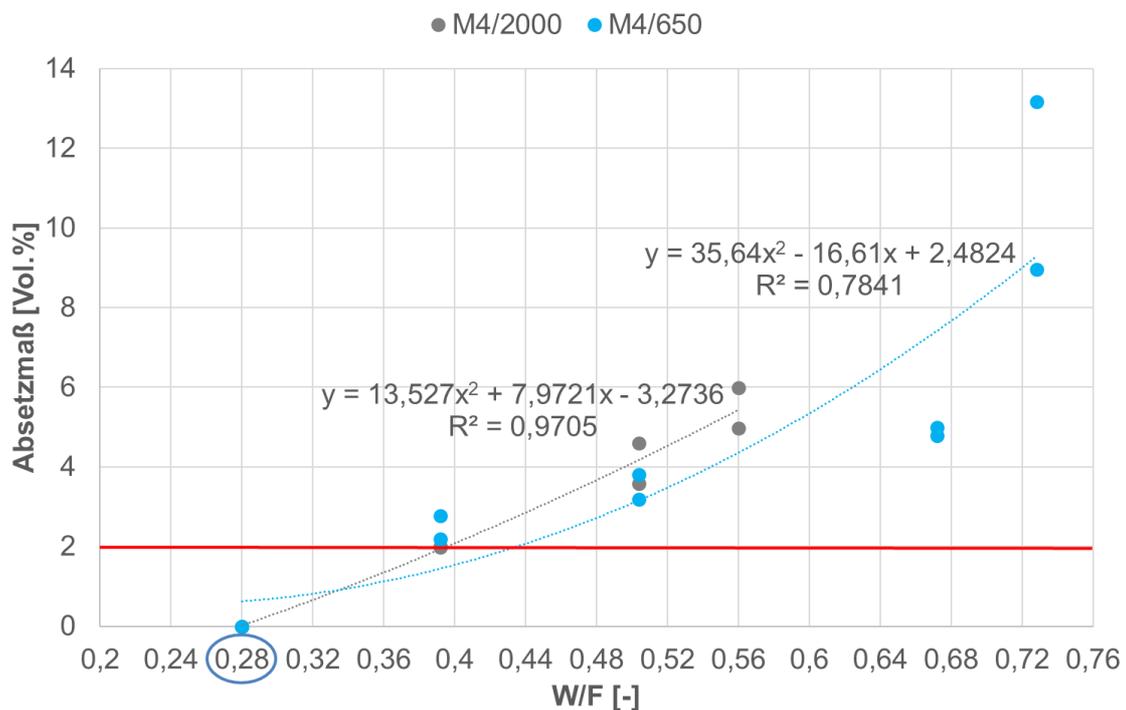


Abbildung 6-177: Einfluss steigender W/F auf das Absetzmaß für M4 bei variablen Anmischbedingungen. Der blaue Kreis markiert das Standard W/F, der rote Strich markiert das kritische Absetzmaß nach LQS-EWS

6.6.2.6. Fehlstellenuntersuchungen mittels CemTrakker und MS2H-Sensor

Zum Vergleich mit den Untersuchungen der kommerziellen Verfüllbaustoffe (Kap.6.6.1.11) wurden Proben mit Ø40 mm Kugelfehlstellen sowohl am Sondenrohr als auch am Probenrand hergestellt und gemessen (Abbildung 6-178). Zum Vergleich sind hier nochmal die Profile der kommerziellen Verfüllbaustoffe gezeigt mit der Ø40 mm Fehlstelle am Sondenrohr. Man kann deutlich erkennen, dass die Auflösung der Fehlstellen mit zunehmendem magnetischem Signal besser wird. Am besten ist diese entsprechend beim Verfüllbaustoff M4. Das errechnete Δm (siehe Berechnung in Abbildung 6-131) liegt für M4 bei 1,7-1,9, zur Erinnerung für 13+d bei 0,4-0,6 und für 07d bei 1-1,3 was den zunehmenden Kontrast rechnerisch bestätigt. Wie auch bei den kommerziellen Verfüllbaustoffen (Abbildung 6-133) zeigen die M4 Proben mit der Fehlstelle am Probenrand kein Signal, d.h. die Fehlstelle ist nicht detektierbar, was der geringen Eindringtiefe des Sensors geschuldet ist.

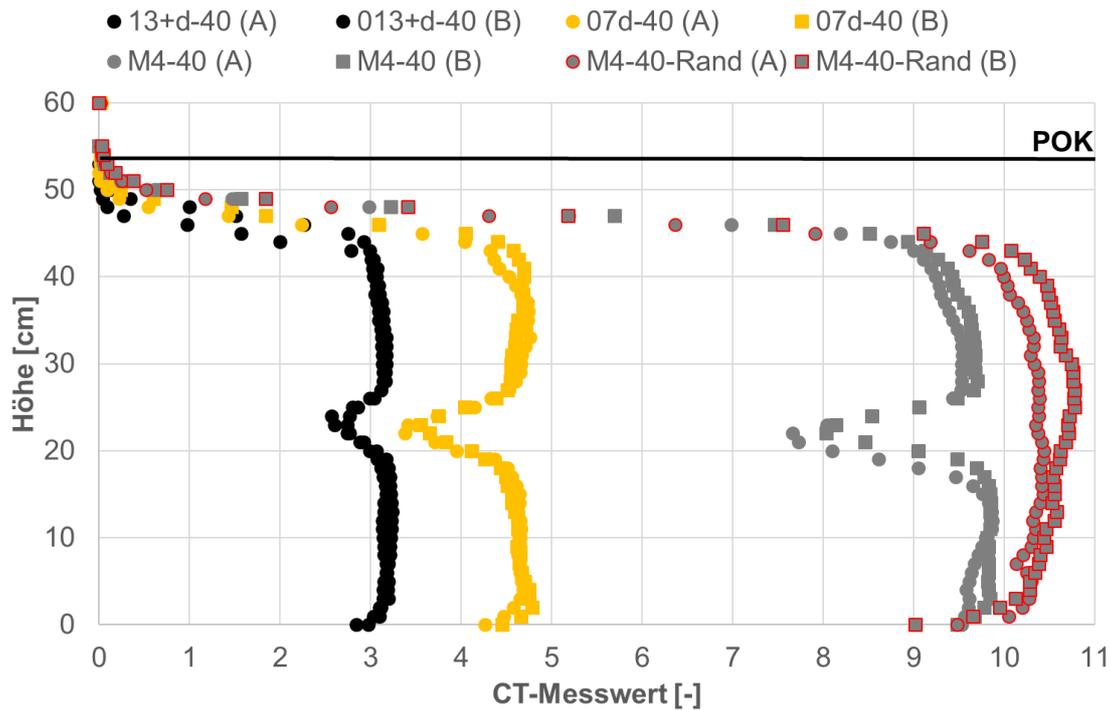


Abbildung 6-178: Untersuchung blasenförmiger Fehlstelle ($\varnothing 40$ mm) am Rohr für M4, 07d und 13+d, sowie am Probenrand für M4 (50 cm Proben, $\varnothing 110$ & 160 mm) mit dem CemTrakker (CT)

Die gleichen Untersuchungen wurden auch mit dem MS2H durchgeführt (Abbildung 6-179). Die Ergebnisse sind identisch zu den CemTrakker Messungen. Für 13+d liegt Δm bei $8E^{-4}$, für 07d bei $1E^{-3}$ - $1,2E^{-3}$ und für M4 bei $3,9E^{-3}$ - $3,7E^{-3}$ und somit bei letzterem wieder am höchsten.

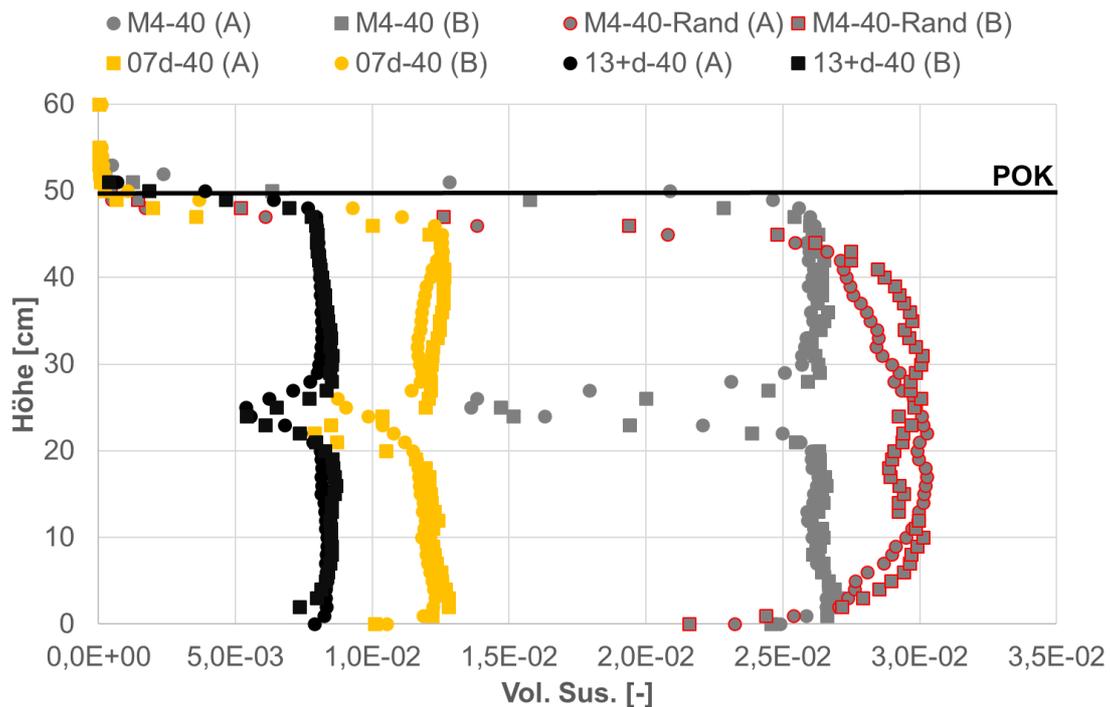


Abbildung 6-179: Untersuchung blasenförmiger Fehlstellen ($\varnothing 40$ mm) am Rohr für M4, 07d und 13+d, sowie am Probenrand für M4 (50 cm Proben, $\varnothing 110$ & 160 mm) mit dem MS2H

6.6.2.7. Untersuchung des Einflusses der Raumlage von Sondenrohren im Bohrloch auf das Messsignal des CemTrakker und MS2H Sensors

Entsprechend den Untersuchungen in Kap. 6.6.1.14, Abbildung 6-145 wurden Untersuchungen auch mit dem stabilen Referenzverfüllbaustoff M4 durchgeführt, repräsentativ für die übrigen Verfüllbaustoffe M1-M3, die allesamt die gleiche Signalstärke aufweisen. Tabelle 6-40 zeigt die Ergebnisse für den CemTrakker, Tabelle 6-41 die für den MS2H.

Tabelle 6-40: CemTrakker (CT) Signal für Szenarios 1-4

Material	Szenario, CT-Wert [-]					
	1	2	3 (2 cm)	3 (1 cm)	3 (0 cm)	4
M4-A	10,2	7,23	10,11	9,68	8,33	4,37
M4-B	10,16	7,16	10,2	9,64	8,57	4,35

Die CemTrakker Ergebnisse zeigen eine deutliche Abnahme des Messsignals für Szenario 2 um ca. 29 % gegenüber Szenario 1. Dies gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, dass im Realfall die umgebende Geologie eine magnetische Suszeptibilität von 0 aufweist, wie auch Luft. Szenario 3 zeigt, dass zwei Rohre in 2 cm Entfernung zueinander keinen Einfluss aufeinander haben. Die Werte stimmen mit denen für Szenario 1 recht gut überein. Verringert man den Abstand auf 1 cm nimmt das Messsignal um im Schnitt 5 % ab, liegen die Rohre direkt aneinander, sind es im

Schnitt 17 %. Beim „Worst Case“ Szenario 4 sind die Werte gegenüber dem Referenzszenario 1 um mehr als 50 % abgefallen. Die Ergebnisse sind nahezu identisch mit denen der kommerziellen Verfüllbaustoffe (Kap. 6.6.1.14).

Im Weiteren wurden die gleichen Untersuchungen auch mit dem MS2H Bohrlochensensors durchgeführt. Die Ergebnisse in Tabelle 6-41 zeigen eine deutliche Abnahme des Messsignals für Szenario 2 um ca. 18 % gegenüber Szenario 1. Dies gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, dass im Realfall die umgebende Geologie eine magnetische Suszeptibilität von annähernd 0 aufweist, wie auch Luft. Szenario 3 zeigt, dass zwei Rohre in 2 cm Entfernung zueinander keinen Einfluss aufeinander haben. Die Werte stimmen mit denen für Szenario 1 recht gut überein. Verringert man den Abstand auf 1 cm liegt die Abnahme bei im Schnitt 3 %. Liegen die Rohre direkt aneinander (Szenario 3, = 0 cm) beträgt die Abnahme im Schnitt 13 %. Beim „Worst case“ scenario beträgt die Abnahme ca. 50 %. Die Ergebnisse sind im Rahmen der Messunsicherheit identisch mit denen der kommerziellen Verfüllbaustoffe (Kap. 6.6.1.14).

Tabelle 6-41: MS2H Signal für Szenarios 1-4

Material	Szenario, MS2H-Wert [-]					
	1	2	3 (2 cm)	3 (1 cm)	3 (0 cm)	4
M4-A	2,83E-02	2,30E-02	2,85E-02	2,71E-02	2,54E-02	1,44E-02
M4-B	2,86E-02	2,35E-02	2,82E-02	2,78E-02	2,37E-02	1,42E-02

6.6.2.8. Korrelation der Messsysteme bei unterschiedlicher Dotierung

Im Rahmen der Untersuchungen wurde einer der stabilen Referenzverfüllbaustoffe (M4) mit unterschiedlichen Dotierungen (0, 1, 2,5 und 5 Vol.%) hergestellt und mit den drei Messsystemen MS2C, MS2H und CemTrakker untersucht. Ziel war es, die magnetischen Messsignale in Abhängigkeit zur Dotierung sowie die Korrelation der Messwerte der unterschiedlichen Messsysteme zu untersuchen.

Abbildung 6-180 zeigt den Zusammenhang zwischen Dotierung und der materialspezifischen Volumenssuszeptibilität für die einzelnen Messsysteme. Die Zusammenhänge sind für alle Messsysteme linear. Gezeigt ist auch die Rohmessung mit dem MS2H und die korrigierte Messung entsprechend dem Sondenrohrdurchmesser (32x2,9 mm) in welches der Sensor eingebracht wird. Nach Korrektur ist die MS2H Messung nahezu deckungsgleich mit der MS2C Messung.

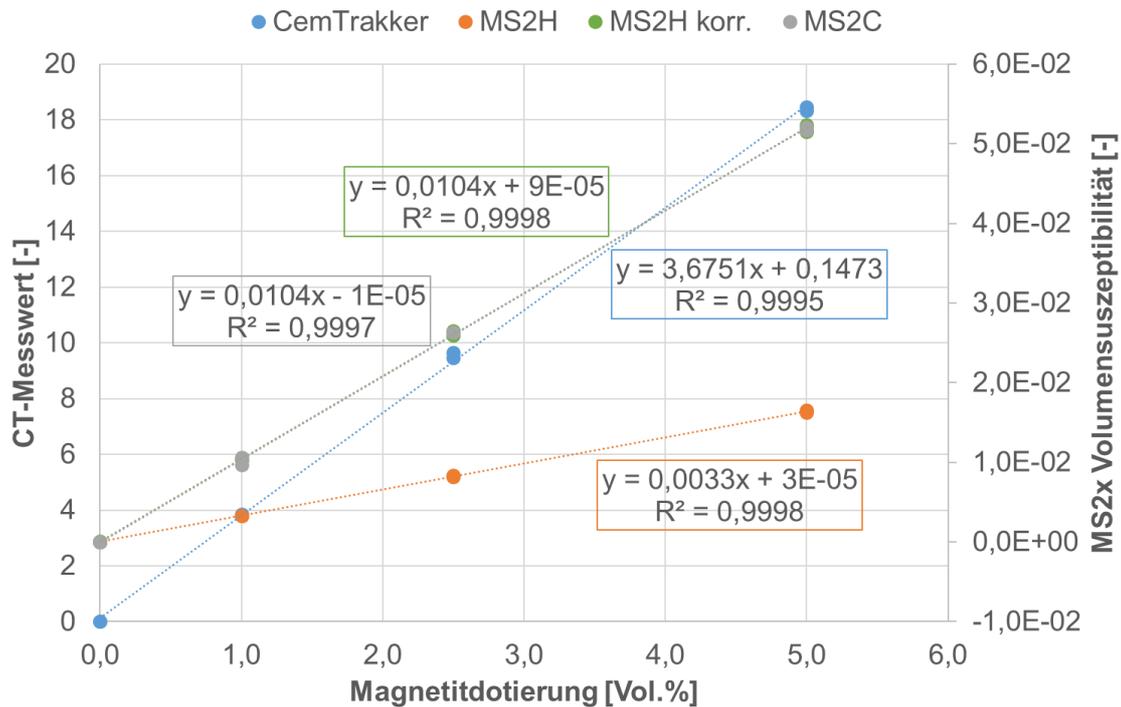


Abbildung 6-180: Zusammenhang zwischen Magnetitdotierung und Messsignal für MS2C, MS2H und CemTrakker (CT)

Abbildung 6-181 zeigt die Korrelation zwischen MS2C und CemTrakker, und MS2C und MS2H. MS2H und MS2C bilden einen exakt linearen Zusammenhang, der die Qualität und Vergleichbarkeit der Bartington Sensoren unterstreicht.

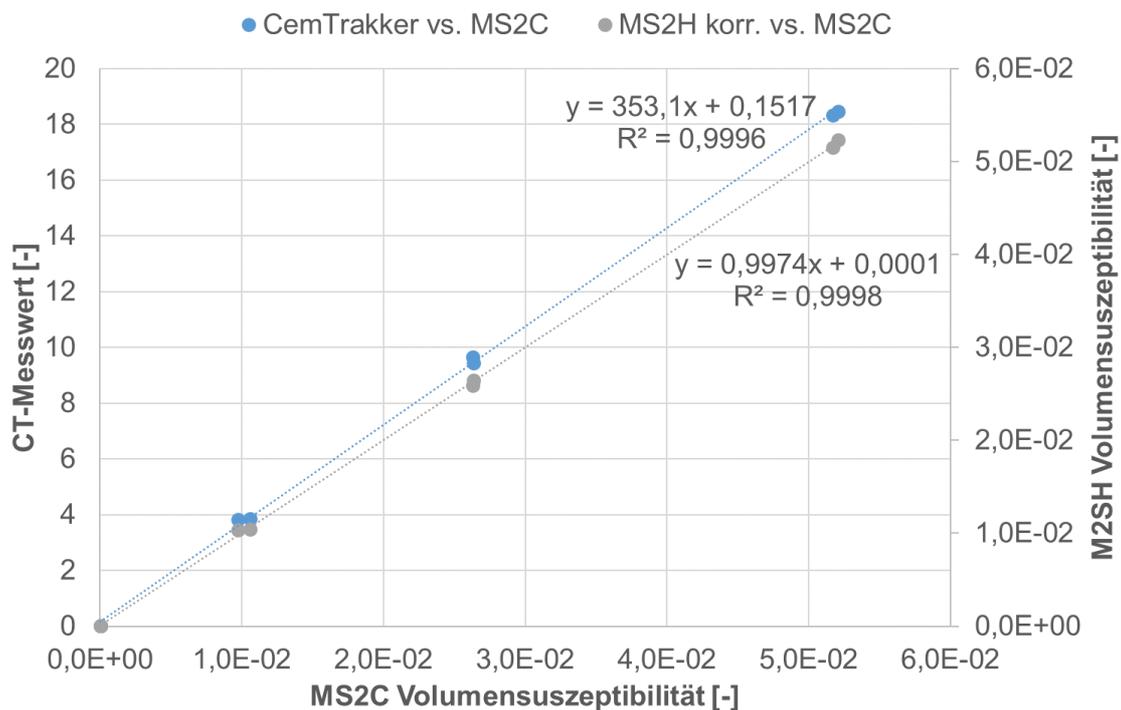


Abbildung 6-181: Korrelation zwischen CemTrakker (CT) und MS2C sowie MS2H und MS2C

6.6.2.9. Zusammenfassung und Analyse günstiger Verfüllbaustoffeigenschaften

Ziel der Entwicklung und Untersuchung der Referenzverfüllbaustoffe war es, anhand deren definierter Eigenschaften und daraus resultierendem Verfüllverhalten, möglichst günstige Eigenschaften für kommerzielle Verfüllsuspensionen abzuleiten, um eine gute Verfüllung ohne Fehlstellen zu gewährleisten.

Der Referenzverfüllbaustoff M1 weist als zuvor festgelegte Charakteristika eine hohe Fließgrenze mit hoher Entmischungsresistenz auf. Die Untersuchungen des Verfüllbaustoffs zeigen vor allem eine damit einhergehende, nicht messbare Marshzeit, während die anderen Parameter beim Standard W/F unkritisch sind. Durch die hohe Marshzeit ist eine gute Verarbeitung und Injektion der Suspension technisch kaum möglich und somit auch keine adäquate Verfüllung. Eine hohe Fließgrenze bzw. hohe Marshzeit hat aber auch einen positiven Aspekt, so zeigt M1 von allen Referenzverfüllbaustoffen das robusteste Verhalten hinsichtlich dem Absetzen von Magnetit, dass erst bei einer W/F Erhöhung von 120-140 % auftritt. Allerdings liegt das Auftreten des kritischen Absetzmaß gleichzeitig viel niedriger bei W/F von ca. 0,4, was etwa 40 % W/F Erhöhung entspricht. Letzteres ist somit der übergeordnete Qualitätsparameter von beiden.

Im nächsten Schritt wurde mit M2 neben einer wieder hohen Entmischungsresistenz, auch eine hohe Thixotropie simuliert. Die hohe Thixotropie führt dazu, dass die Verfüllsuspension beim Anmischen eine Viskositätsabnahme erfährt, die sich erst nach Abstellen des Mixers wieder erhöht. Dieser Effekt führt im Vergleich zu M1 dazu, dass die Marshzeit beim Standard W/F zumindest wieder messbar, wenn auch immer noch sehr hoch ist. Die Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit der Suspension wird also durch eine höhere Thixotropie bei einer sonst sehr zähen Suspension verbessert. Allerdings wird dadurch auch die Robustheit hinsichtlich dem Absetzen von Magnetit

verringert, so kommt es bereits (je nach Anmischbedingungen) bei 40-80 % W/F Erhöhung zu einem Abtrennen von Magnetit. Das Absetzmaß erreicht allerdings bei keinem W/F einen kritischen Wert. In diesem Fall ist also das Abtrennen von Magnetit der übergeordnete Qualitätsparameter beim Vergleich mit dem Absetzmaß.

M3 wurde mit einer niedrigen Fließgrenze und geringen Entmischungsresistenz entwickelt. Diese Charakteristika schlagen sich beim Standard W/F von 0,28 in erster Linie in einer verhältnismäßig geringen Marshzeit nieder, die aber im Rahmen der LQS-EWS liegt. Ein Absetzen des Magnetits ist in Laborversuchen beim Standard W/F nur zu erahnen, durch ein leicht nach unten ansteigendes Suszeptibilitätssignal in den Proben. Deutlicher wird der Einfluss der geringen Entmischungsresistenz jedoch bei steigendem W/F. Bereits bei 30-40 % W/F Erhöhung macht sich ein deutliches Magnetitabsetzen bemerkbar. Noch eher, und zwar bei 10 % W/F Erhöhung ist ein kritisches Absetzmaß erreicht, was wieder dem übergeordneten Qualitätskriterium entspricht. M3 weist also die geringste Robustheit der untersuchten Referenzverfüllbaustoffe auf, hervorgerufen durch die geringe Entmischungsresistenz. Entsprechend ist die Bildung von Fehlstellen unter solchen Bedingungen am wahrscheinlichsten.

Die drei untersuchten Referenzverfüllbaustoffe haben jeweils unterschiedliche Qualitätscharakteristika die besonders schlecht und besonders gut ausfallen, wobei die schlechten für sich genommen, im Sinne einer Freigabeproofung nach aktueller LQS-EWS zum Teil zu einer Freigabeverweigerung führen würden (bei M1+M2):

- M1 -> zu hohe Marshzeit; besonders geringe Tendenz zur Magnetitabtrennung
- M2 -> zu hohe Marshzeit; besonders geringes Absetzmaß
- M3 -> starke Tendenz zu kritischem Absetzmaß bei geringfügiger W/F Veränderung (+10%); besonders gute Marshzeit

M3 würde unter Standardbedingungen (W/F=0,28) die Freigabeproofung bestehen, jedoch ist der Verfüllbaustoff sehr empfindlich hinsichtlich einer W/F Erhöhung.

Für einen Verfüllbaustoff mit insgesamt guten Qualitätscharakteristika ist eine sinnvolle Kombination der Eigenschaften von M1-M3 notwendig. Hierzu wurde M4 entwickelt und untersucht. M4 zeichnet sich durch eine mittlere Fließgrenze, hohe Entmischungsresistenz und geringe Thixotropie aus. In den Untersuchungen zeigt der Verfüllbaustoff unter Standardbedingungen (W/F=0,28) und 2000 U/min bei allen Qualitätsparametern (Marshzeit und Absetzmaß) akzeptable Werte im Sinne einer Freigabeproofung. Die Suspensionsdichte war ohnehin bei allen M-Verfüllbaustoffen die gleiche. Auch Absetzmaß und die Tendenz zur Magnetitabtrennung bei steigendem W/F ist verhältnismäßig robust, wobei das Absetzmaß der übergeordnete Parameter ist und bei einem W/F von ca. 0,4 den kritischen Wert erreicht.

Eine Erkenntnis aus diesen, wie auch den Untersuchungen der kommerziellen Verfüllbaustoffe, ist die Wichtigkeit das Absetzen von Magnetit als weiteres Kriterium für Freigabeproofungen speziell mit Magnetit dotierter Verfüllbaustoffe zu betrachten. Neben der Suspensionsdichte, Marshzeit, Siebproofung, Absetzmaß und Suspensionstemperatur sollte die homogene Verteilung von Magnetit im Verfüllbaustoff sichergestellt sein, da sonst eine verlässliche Verfüllkontrolle mit dem CemTrakker nicht zweifelsfrei durchgeführt werden kann. Dies könnte als Erweiterung in den

Qualifizierungsnachweis Baustellenmischtechnik mitaufgenommen werden. Die Umsetzung würde das Herstellen einer zylindrischen Rückstellprobe bei der einmaligen Probemischung im Beisein eines Sachverständigen erfordern. Sofern die anderen Freigabeparameter in Ordnung sind, würde diese Probe nach aushärten (nicht mehr als 1 Woche) in einem Labor mit entsprechender Technik für Suszeptibilitätsmessungen vermessen werden, um die homogene Verteilung von Magnetit nachzuweisen.

Ein weiterer wichtiger Punkt bezüglich der Verfüllbaustoffcharakteristika ist auch die Höhe des Signals, wie schon in Kap. 6.6.1.17 erwähnt. Die Untersuchung der Fehlstellen in M4 zeigt den stärksten Fehlstellenkontrast verglichen mit den kommerziellen Verfüllbaustoffen. Prinzipiell ist also für die Fehlstellendetektion bei der Nachkontrolle ein möglichst hohes Signal von Vorteil. Das konnte sowohl mit dem CemTrakker als auch MS2H festgestellt werden. Die maximale Dotation, die sowohl technisch als auch wirtschaftlich sinnvoll ist, gilt es festzustellen.

6.7. Ergebnisse der automatischen Verfüllstandskontrollversuche (AP. C)

Die gekoppelte tiefenorientierte Messung einer magnetischen Dotierung und gleichzeitiger Messung der Verpressvolumina und –Drücke beim Hinterfüllung von Erdwärmesonden ist eine zugelassene Variante nach der LQS-EWS Baden-Württemberg und auch das derzeit weitverbreitetste Verfahren zur Erstellung eines tiefenaufgelöstes Verpressprotokolls. Mit dem Aufbau des automatischen Abdichtungskontrollprüfstands sollte eine generelle Möglichkeit geschaffen werden, Abdichtungskontrollmethoden zu entwickeln, testen, bewerten und miteinander vergleichen zu können. Der Fokus im Projekt EWS-tech-II wurde dabei auf magnetisch dotierte Baustoffen basierenden Verfahren gelegt. Der Begriff „automatisch“ ist streng genommen nicht richtig gewählt, denn im eigentlichen Sinne wird ein magnetisches Messsignal händisch ermittelt (also nicht automatisch) und zur Detektion eines Hinterfüllspiegels herangezogen (interpretiert). Im Falle des marktüblichen Messverfahrens mit dem CemTrakker ist der Wert für eine ausreichende Detektion mit einem CemTrakker derzeit mit einem Wert von 2 festgelegt. Wenn dieser Wert gemessen wird, soll die kabelgebundene Messsonde, die vor dem Hinterfüllen in einem Sondenschenkel eingebracht wurde, wenige Meter nach oben gezogen werden und anschließend gewartet werden bis wieder ein Messwert von 2 erreicht wird. Der Vorgang soll dann sukzessive bis zum Ende eines dann als vollständig angesehenen Hinterfüllvorgangs wiederholt werden. Auch der Begriff Abdichtungskontrolle ist falsch gewählt, denn mit einem solchen Verfahren wird nicht ein Abdichten einer EWS bestimmt, sondern es wird lediglich eine Art Füllstandkontrolle durchgeführt. Deshalb wird im Folgenden richtigerweise nunmehr der Begriff Füllstandkontrolle und in diesem Zusammenhang auch „automatisch“ nicht mehr verwendet. Folgende Aspekte standen im Rahmen des Projektes im Vordergrund,

- Kann ein Suspensionsspiel ausreichend detektiert werden?
- Wie verhalten sich unterschiedliche Baustoffe?
- Ist ein CemTrakker Wert von 2 ein nachvollziehbarer Wert für eine Detektion eines Suspensionsspiegels?
- Unterscheiden sich die Baustoffe (Fertigmischungen) hinsichtlich ihrer magnetischen Detektierbarkeit?
- Können Entmischungen beim Hinterfüllvorgang erkannt werden?
- Wie verhalten sich die klar definierten Eigenmischungen (M3 und M4) im Vergleich zu kommerziellen Fertigmischungen?
- Wie wirken höhere Verpressgeschwindigkeiten und höhere Wasser/Feststoff Verhältnisse auf die Detektion eines Suspensionsspiegels aus? Können Unterschiede in der Hinterfüllqualität erkannt werden?
- Können bei statischer Säule weitere Veränderungen detektiert werden?
- Können die volumetrischen magnetische Suszeptibilitäten, die über Querschnitt der Säule gemessen werden, mit den in den einzelnen Sondenrohren gemessenen CemTrakker-Werten korreliert werden? Frage der Reichweite?
- Welche zusätzlichen Aussagen hinsichtlich der Qualität der Hinterfüllung können mit den magnetischen Messungen getroffen werden?

In der Tabelle 6-42 sind die 19 können die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführte Versuche entnommen werden.

Tabelle 6-42: Im Füllstandskontrollprüfstand durchgeführte Versuche

Versuche	13+	13+d	02d	07d	15d	M3	M4
Trockene Säule		1 (0,8)					
Vollständig mit Wasser gefüllte Säule, normale Verpressgeschw.	1 (0,8)	1 (0,8)	1 (0,7)	1 (0,3)	1 (0,8)	1 (0,28)	1 (0,28)
Vollständig mit Wasser gefüllte Säule, höherer W/Z-Verhältniss		1 (1,2)	1 (1,1)	1 (0,45)	1 (1,2)		
Vollständig mit Wasser gefüllte Säule, höhere Verpressgeschw.		1 (0,8)	1 (0,7)	1 (0,3)	1 (0,8)		
Vollständig mit Wasser gefüllte Säule, Koax-Sonde, normale Verpressgeschw.		1 (0,8)					
Vollständig mit Wasser gefüllte Säule, normale Verpressgeschw., gealtertes Mat.		1 (0,8)		1 (0,3)			
Gesamtzahl Versuche	1	6	3	4	3	1	1

in den Klammer sind die W/F-Werte festgehalten.

6.7.1. Baustoff 15d

Im Folgenden wird exemplarisch am Versuch mit dem Baustoff 15d die Auswertung detailliert erläutert.

6.7.1.1. ~40 l/min Volumenstrom, exemplarische detaillierte Auswertung

Alle Versuche sind auf einen äquivalenten Auswertebeginn normiert, um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Versuche ermöglichen zu können (Abbildung 6-182).

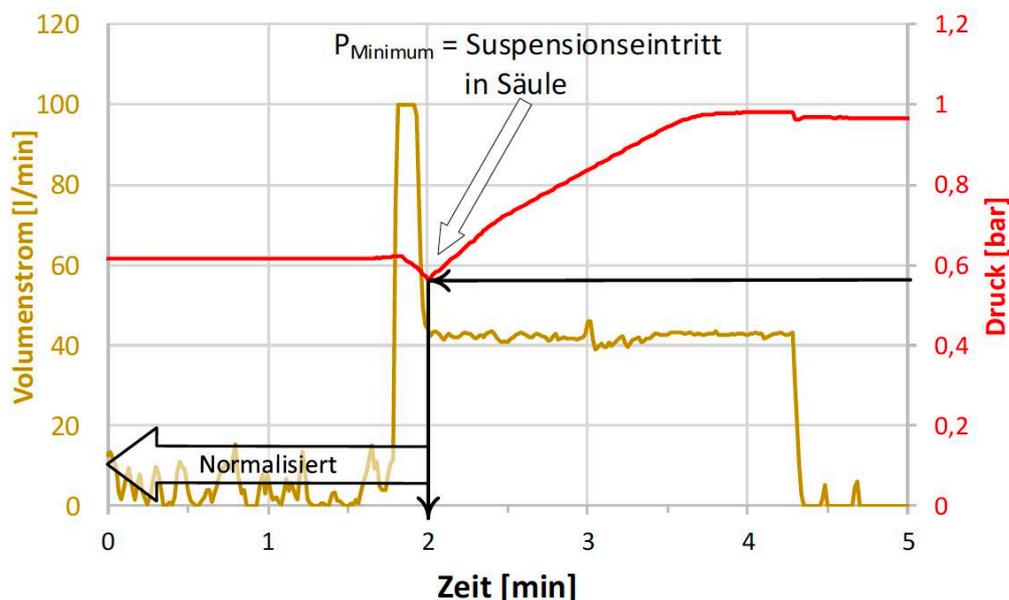


Abbildung 6-182: Normierung der Auswertebeginns auf das Druckminimum nach Start des Hinterfüllvorgangs. Dargestellt ist der Verlauf des Säulendruckes (rote Kurve) und des Volumenstromes (goldene Kurve)

Dabei wird der minimale Druck, der sich am Drucksensor (Lage siehe Abbildung 5-14) nach dem Starten des Hinterfüllvorgangs (Pumpen des Hinterfüllmaterials) einstellt, als Normierungspunkt gewählt. Der Zeitpunkt für den Normierungspunkt wurde auf zwei Minuten festgelegt, so dass sich dementsprechend der Darstellungsbeginn in den folgenden Auswertediagrammen auf 2 Minuten vor Einstellen des minimalen Druckes gesetzt ist (entspricht dann dem Zeitpunkt Null). Eine solche Normierung macht aus deshalb Sinn, da die benutzte Mischanlage mit keinem Datenaufzeichnungssystem ausgestattet ist und dementsprechend der Startzeitpunkt der Verpressung

nicht exakt erfasst werden kann (nur händisch möglich, kein exakter oder synchronisierter Zeitstempel mit den zentral an einem System elektronisch erfassten Daten). Die Versuche lassen sich anhand des Druckes und Volumenstroms in unterschiedlichen Phasen unterteilen (Abbildung 6-183). Der Druck entwickelt sich entsprechend den Versuchsbedingungen. Vor dem Starten des eigentlichen Hinterfüllvorgangs, wenn die Anlage/Säule mit Wasser vorbefüllt ist, entspricht der gemessene Druck P_m (bar) dem Druck P_W (bar) der überstehenden Wassersäule (Phase I). Der Volumenstrom ist zu diesem Zeitpunkt gleich Null. In diesem Messzeitraum sind die Messwerte des Coriolis-Durchflussmessers keine realen Volumenströme, sondern nur scheinbar gemessene Volumenströme. Der Coriolis-Durchflussmesserprinzip funktioniert nur bei stabilen Durchflüssen und konstanten Druckgefällen, dementsprechend können die Messwerte des Durchflusses aus Phase I ignoriert werden. Durch Umlegung eines Schalters am Mischer wird der Hinterfüllvorgang gestartet. Die erste Strömung im Verpresssystem wird dann unmittelbar am Durchflussmesser als ansteigendes Messsignal im Volumenstrom wahrgenommen (Startphase als Beginn der Phase II). Bei Erreichen eines stabilen Volumenstromwertes im Durchflussmesser kann von nahezu konstanten Druckgefällen und Durchströmungsbedingungen ausgegangen werden. Der Druck steigt zu Beginn leicht an und fällt dann kontinuierlich bis zum Erreichen eines konstanten Volumenstroms etwas unter dem hydrostatischen Druck der anfänglichen Wassersäule (Ende Phase II). Der Druckverlauf resultiert aus dem Strömungsdruck und der in dem Schlauchsystem noch vorhandenen Luft (vorab keine komplette Entlüftung möglich) sowie aus dem sukzessive in die Säule eingespülten Hinterfüllmaterial. Ein stetiger Anstieg des Druckes bei gleichzeitigem nahezu konstanten Volumenstrom wird als Startzeitpunkt des Erdsondenhinterfüllvorgangs interpretiert (Start Phase III). Das Erreichen eines Druckmaximums markiert das Auslaufen der Suspension mit quasi konstanter Dichte aus dem Ablauf der Säule (siehe Abbildung 5-14). Die Säule wird nicht unmittelbar beim Erreichen des Druckmaximums ausgeschaltet, sondern es wird eine gewisse Zeit nachverpresst bevor die Verpresspumpe schlussendlich abgeschaltet wird (Ende Phase III). Der unmittelbare Druckabfall direkt nach Abschalten resultiert aus dem wegfallenden dynamischen Druck (Wegfall Strömung). Sonst ergibt sich der Druck nach Ende des Hinterfüllvorgangs aus der stehenden Suspensionssäule. Der leicht gemessene Druckabfall während der Phase IV im Beispiel der Baustoffes 15d zeigt, dass sich die Suspension nicht komplett hydrostatisch, sondern sich möglicherweise bereits erste Hydrationsprozesse bemerkbar machen und auch der Tatsache schuldet, dass sich bei der Suspension um eine nicht-Newton'sche Flüssigkeit handelt (kein ideal hydrostatisches Verhalten). Danach wird die Suspension aus der Säule herauslaufen lassen, so dass dementsprechend der Druck rasch abfällt (Phase V).

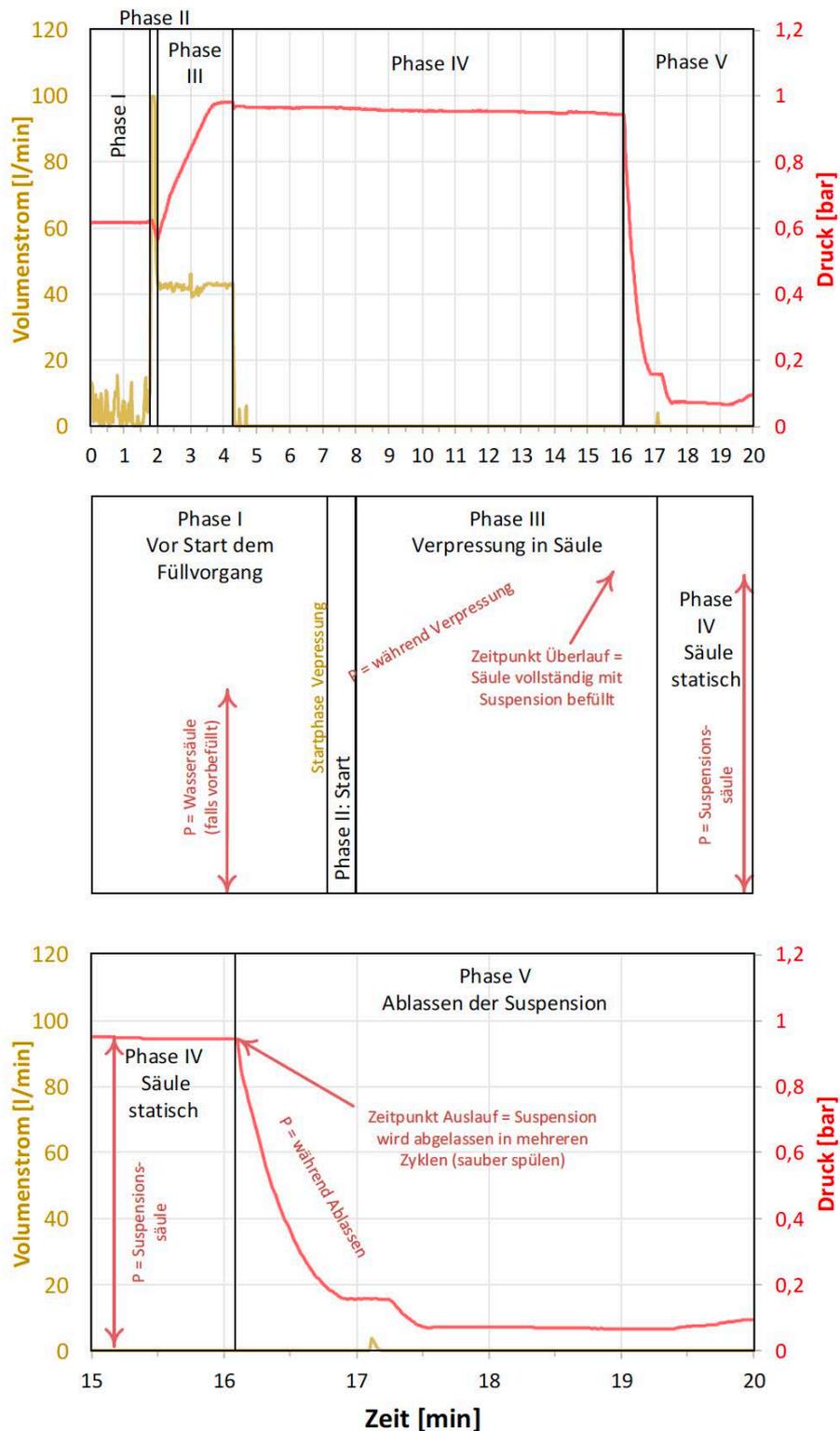


Abbildung 6-183: Aufteilung des Versuchsablaufs in verschiedene Phasen anhand des Druck- und Volumenstromverlaufs, oben: gesamter Auswertzeitraum, Mitte: Zoom auf Anfang, unten: Zoom auf Ende

Die Druckmesswerte werden in eine Bezugshöhe für den Suspensionsspiegel H_{Spiegel} (m) umgerechnet (im Folgenden wird diese Bezugshöhe einem Suspensionsspiegel gleichgesetzt). Dabei wird sich zu Nutze gemacht, dass das Druckminimum P_{min} (bar) im Zulauf und das Druckmaximum P_{max} (bar) im Ablauf einer eindeutigen Höhe zugeordnet werden können,

$$\begin{aligned}
 H_{\text{Spiegel}}(P) &= 0 && \text{für } P_m(t) \leq P_{\text{min}} \\
 H_{\text{Spiegel}}(P) &= m \cdot P_m(t) + b && \text{für } P_{\text{min}} < P_m(t) \leq P_{\text{max}} \\
 &&& m = \frac{H_{\text{Ablauf}} - H_{\text{Drucksensor}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}, b = \text{intercept} \\
 H_{\text{Spiegel}}(P) &= H_{\text{Ablauf}} \text{ oder} \\
 H_{\text{Spiegel}}(P) &= \frac{P_m(t)}{\rho_{\text{Suspension}} \cdot g} && \text{für } P_{\text{max}} > P_m(t)
 \end{aligned} \tag{6-1}$$

mit

t	Normierte Zeit [sec]	$\rho_{\text{Suspension}}$	Suspensionsdichte [kg/m ³]
g	Erdbeschleunigung 9,81 m/s ²		

Die Suspensionsspiegelhöhe im Zulauf $H_{\text{Drucksensor}}$ (m) beträgt vor Suspensionseintritt 0 Meter und die Suspensionsspiegelhöhe H_{Ablauf} (m) im Ablauf bei Erreichen eines maximalen Druckes 6,313 Meter (siehe Abbildung 5-14). Mit der Annahme einer linearen Interpolation wird davon ausgegangen, dass nach Eintritt in die Säule die Suspension das überstehende pure Wasser ideal, homogen und kontinuierlich in den Ablauf verdrängt. In einem solchen Fall würde sich aufgrund der Dichteunterschiede eine eindeutige Trennlinie zwischen der Suspension und dem Wasser bilden. In der Realität ergeben sich aber diffuse Durchmischungszonen, sich entwickelnde lokale Durchströmungsunterschiede sowie Sedimentations- und Aufwirbelungseffekte unterschiedlich schwerer Partikel, etc., die eine eindeutige Zuordnung eines Suspensionsspiegels rein aus den Druckwerten nicht ermöglicht. Trotz dieser Tatsache wird die Beziehung aus Gleichung (6-1) benutzt, um einen solchen idealen Suspensionsspiegel zu berechnen. Denn der aus den gemessenen Druckwerten berechnete Suspensionsspiegel ist eine gute Möglichkeit, eine Vergleichbarkeit mit den höhenspezifischen magnetischen Suszeptibilitätsmessungen herzustellen und diese dann auch einordnen und bewerten zu können. In Abbildung 6-184 sind die berechneten Suspensionsspiegelhöhen für den Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom) exemplarisch dargestellt.

Wenn die Verpressung eigentlich gestoppt wurde, steht der Suspensionsspiegel exakt auf $H_{\text{Ablauf}} = 6,313$ m (im Beispiel bis zur gestrichelten Linie, zusätzliche Anmerkung: unter Voraussetzung vernachlässigbarer Absetzten, nicht erkennbar in den Druckwerten!). Wie oben schon erwähnt, fällt der Druck trotz gleicher Dichte bei statischer Suspensionssäule leicht ab. Deshalb wird zusätzlich ein scheinbarer Suspensionsspiegel über die gemessenen Drücke und der gemessenen Dichte berechnet (Zeitraum ab gestrichelter Linie). Damit kann dann auch eine Suspensionsspiegelhöhe aus den gemessenen Drücken beim Ablassen der Suspension ermittelt werden (gemessener Druck zum Zeitpunkt des Ablassens als Referenz).

Zusätzlich werden am Massendurchflussmesser noch die relevanten Suspensionsparameter Dichte, Viskosität und Temperatur kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet (Abbildung 6-185, Abbildung 6-186, Abbildung 6-187).

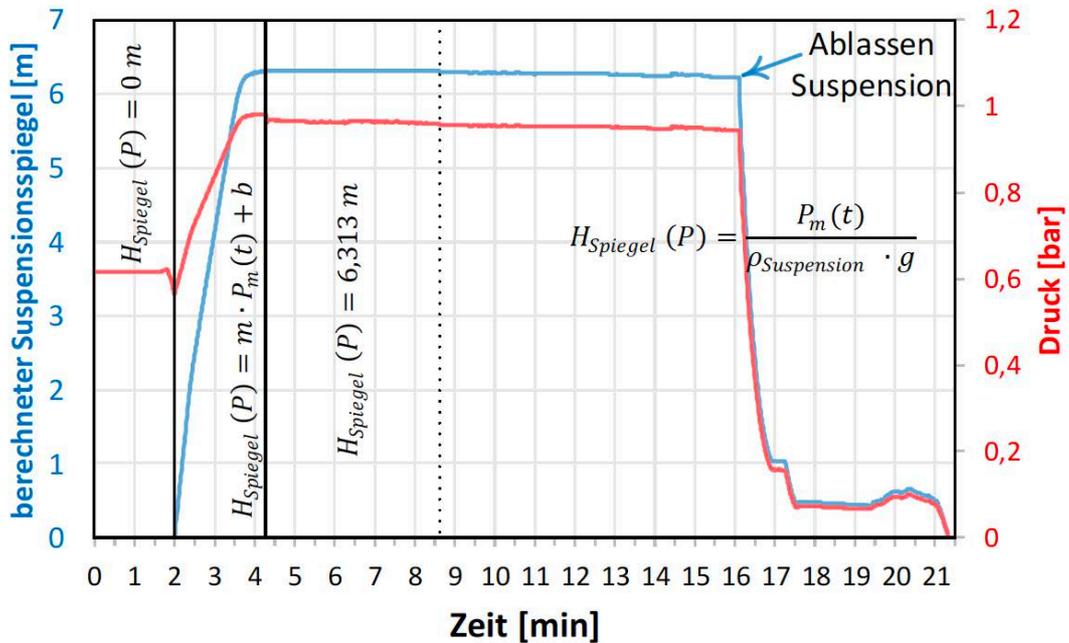


Abbildung 6-184: berechnete Suspensionspiegelhöhen aus den Druckwerten während des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

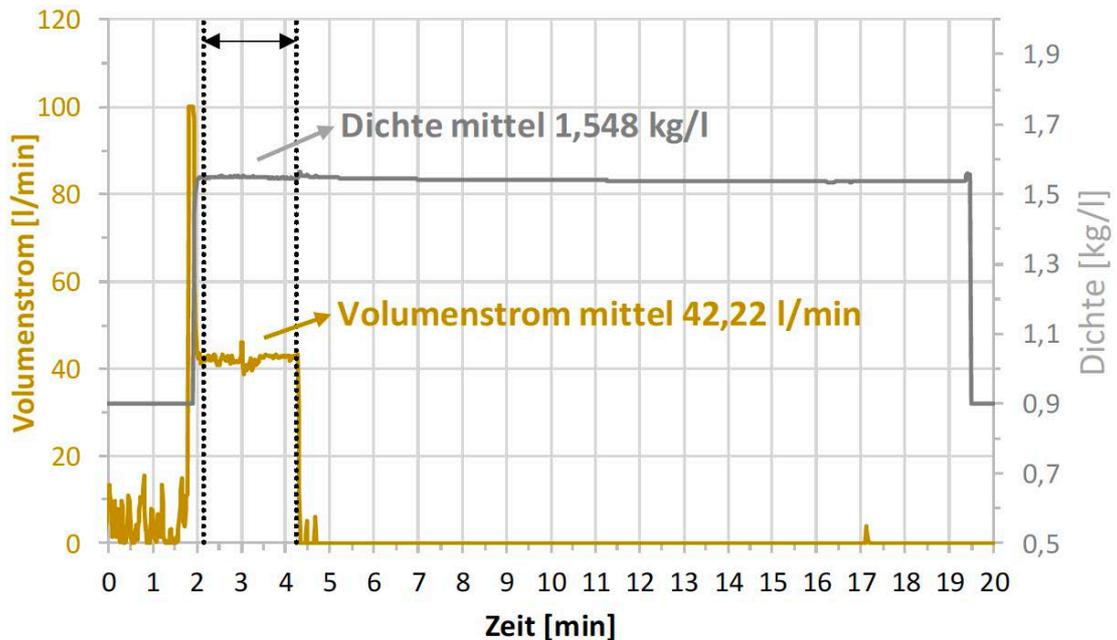


Abbildung 6-185: Volumenstrom und Dichte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom, gemessen am Massendurchflussmesser)

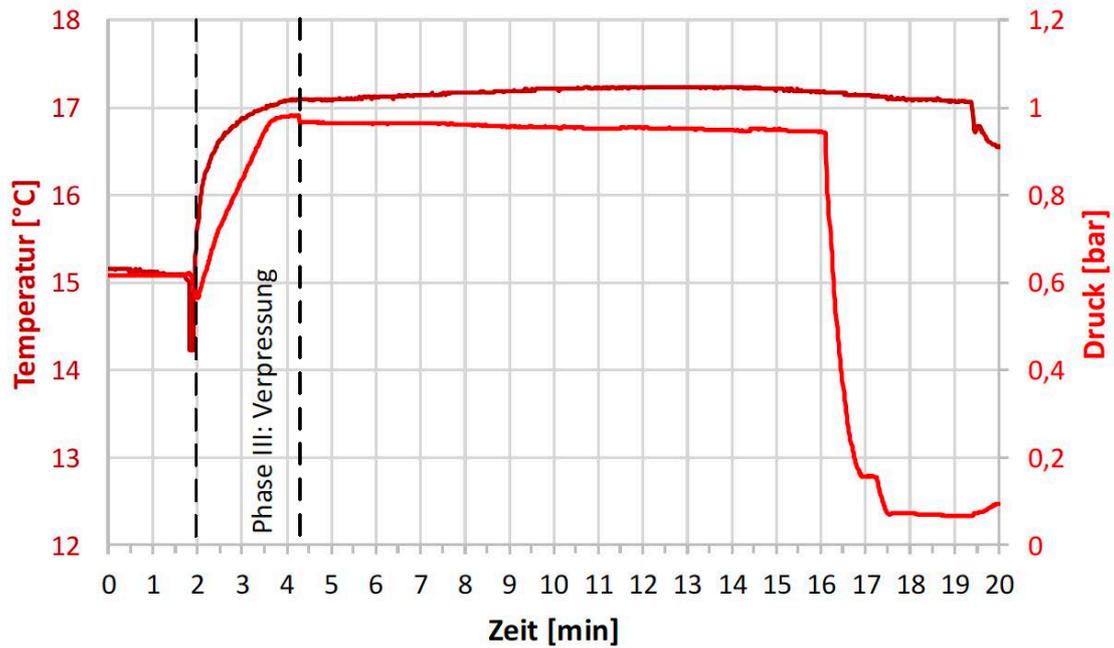


Abbildung 6-186: Druck- und Temperaturverläufe des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

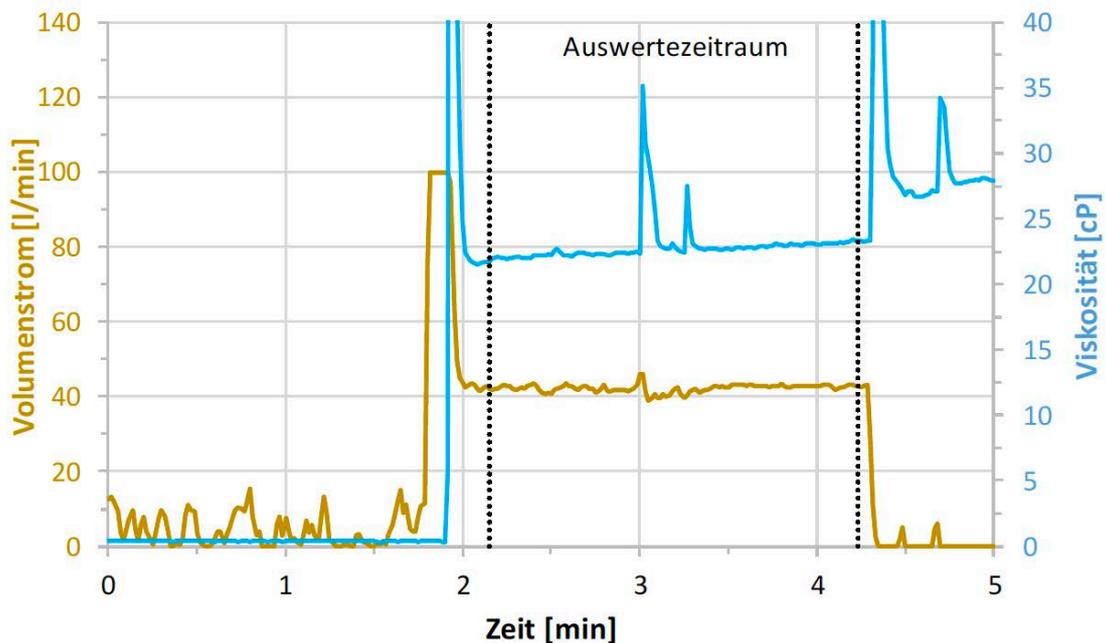


Abbildung 6-187: Volumenstrom und Viskosität des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d, Fokus ersten 5 Minuten (~40 l/min Volumenstrom, Daten vom Massendurchflussmesser)

Zur Auswertung und Vergleichbarkeit werden jeweils die Mittelwerte der Dichte, Viskosität (aus Massendurchflussmesser) und Volumenstrom für jeden Versuch aus individuellen Zeiträumen

ermittelt, da die Zeiträume für konstante Messwerte für die jeweiligen Versuche individuell unterschiedlich sind. Am Mischer selbst kann kein fein justierbarer Volumenstrom eingestellt werden (es wurde die Stufe 4 am Mischer eingestellt). Im Beispiel des Baustoff 15d ergab sich einen Volumenstrom im Mittel von 42,22 l/min und damit etwas über den geplanten 40 l/min. Diese relative Ungenauigkeit ist vernachlässigbar.

Die individuellen rheologischen Eigenschaften des Hinterfüllmaterials, zeitlich sich veränderlichen Füllhöhen im Chargenmischer, ein nicht hundertprozentiger Gleichlauf der Verpresspumpe sowie ein nicht komplett homogen aufgeschlossenes Hinterfüllmaterial, Messungenauigkeiten im Durchflussmesser, etc. können die leichten Schwankungen im Volumenstrom während des Verpressvorgangs bedingen. Die mittlere Dichte über den Auswertzeitraum (entspricht ~Verpresszeitraum) betrug im Falle des Baustoffs 15d (~40 l/min Volumenstrom) aus dem Massendurchflussmesser 1,548 kg/l, während mit der Dichtewaage ein Wert von 1,56 kg/l gemessen wurde. Zum Vergleich kann zudem aus der bekannten Auslaufhöhe und dem gemessenen Druck in der Säule ein weiterer Dichtewert berechnet werden (siehe Gleichung (6-1 unten), der in diesem Fall mit 1,564 kg/l berechnet werden kann (siehe auch in Tabelle 6-49). Der gemessene Wert aus der Dichtewaage ist der Referenzwert (größter Wahrheitsgehalt). Die geringe Abweichung zum berechneten Wert zeigt (nur 0,004 kg/l Unterschied), dass der Drucksensor mit hoher Qualität misst. Diese Vergleichsrechnungen dienen einer Plausibilitätsprüfung und Evaluierung des Versuchsaufbaus und -ablaufs sowie der ausgewählten Komponenten. Festgehalten muss aber, dass im Rahmen dieses Vorhabens vor allem die Bewertung der magnetischen Suszeptibilitätsmessungen im Vordergrund steht. Deshalb werden die anderen zahlreich erhaltenen Parameter nur dann intensiv diskutiert, wenn sie für Interpretation der magnetischen Suszeptibilitätsmessungen relevant sind.

Die Temperatur mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom) entwickelte sich entsprechend der Unterschiede des eingefüllten Wassers und der Suspensionstemperatur (Abbildung 6-186). Da die Suspensionstemperatur (Anmischtemperatur) während des Verpressens höher als die Wassertemperatur war, ist die Temperatur sukzessive während des Verpressens angestiegen. Der weitere Anstieg nach Verpressende kann auf bereits beginnende Hydratationsprozesse und/oder steigende Umgebungstemperaturen zurückzuführen sein.

Die Viskositätsdaten steigen während des Verpressens leicht an und korrelieren mit den Schwankungen im Volumenstrom (Abbildung 6-187). Die Heterogenität und Anstieg in der Viskosität deutet auf ein nicht komplett homogenes Aufschließen des Baustoffes hin. Heterogenität in der Strömungsgeschwindigkeit wirkt sich auf die Scherrate und damit auch auf die Viskosität aus. Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, dass der Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom) mit der verwendeten Charge sich wenig sedimentationsstabil zeigt, belegt durch ein hohes Absetzmaß von 4% sowie unterschiedliche Marsh-Restlaufzeiten (siehe Tabelle 6-49). Die Viskositäten vor und nach dem Verpressen sind analog zum Volumenstrom keine realen Messwerte, da für die Messung eine Durchströmung des Massendurchflussmessers vorliegen muss.

Mit dem Volumenstrom, dem Querschnitt und/oder der Verpresszeit können zudem Verpressgeschwindigkeiten berechnet werden (Abbildung 6-188). Im Falle einer virtuellen 100 m Sonde würde damit ein Hinterfüllen einer Doppel-U-Sonde ungefähr 30 Minuten dauern. In der Praxis werden üblicherweise solche Größenordnungen erreicht, so dass der gewählte Volumenstrom im Versuch näherungsweise normale Verpressbedingungen widerspiegelt.

In der Tabelle 6-49 können die Versuchsbedingungen, wichtige gemessene und berechneten Parameter des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (siehe ~40 l/min Volumenstrom) entnommen werden (nicht alle Daten werden ausführlich diskutiert).

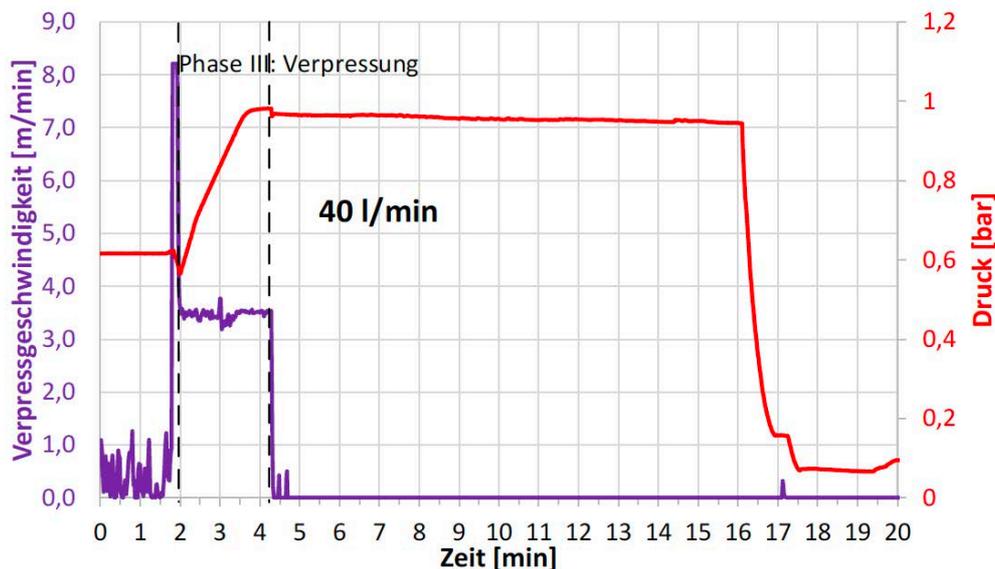


Abbildung 6-188: Druck und Verpressgeschwindigkeiten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

Die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten wurden für jeden Versuch kontinuierlich aufgezeichnet. Der höhenverstellbare Messring für die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten wurde während des Verpressvorgangs sukzessive entlang des sich entwickelten Suspensionsspiegels bzw. entlang der Übergangszone zwischen Suspension und überstehender Wassersäule nach oben gezogen (Abbildung 6-189, siehe auch Abbildung 5-14).

Die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten während des Verpressvorgangs sollen Aufschluss darüber geben, ob überhaupt und wie plausibel ein Suspensionsspiegel detektiert werden kann:

- Kann ein ausreichendes Signal überhaupt detektiert werden? Ist es aussagekräftig und interpretierbar?
- Können Messbereiche bzw. Werte identifiziert werden, die eine eindeutige Zuordnung zu einem Füllstand erlauben?
- Wie wirken sich unterschiedlich starke Dotierungen aus?
- Wie verschieden verhalten sich die jeweiligen Baustoffe?
- Bei unterschiedlichen Verpressgeschwindigkeiten?
- Wie wirken sich zu hoch gewählte W/F Verhältnisse (unzulässige Verdünnungen) aus?
- Wie können die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten mit den CemTrakker-Werten korreliert werden (was ist mit dem CemTrakker-Wert 2 als ausreichendes Signal)? Geht das überhaupt?

Angemerkt werden muss, dass der Messring in diesem Vorhaben ausdrücklich nicht automatisch anhand eines vorgegeben magnetischen Messsignals nach oben geführt wurde, da dies auch

nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht sinnvoll wäre. Die kommerziellen Fertigmischungen variieren in ihrer volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und CemTrakker-Werten teilweise sehr stark. Auch sind die individuellen Baustoffe je nach Charge unterschiedlich in ihren Werten und Verhalten (siehe auch Kapitel 6.6.1.6). Zudem beeinflussen der verwendete Sonden-einbau (Doppel-U-Rohr als Standard, einmal Koaxialsonde, jeweils mit Verpressschlauch), Durchmesser des Messringes, Abstand zwischen Messring und Säulenrohr, etc. die magnetischen Resonanzmessungen. Es wurden auch keine Abstandshalter und Zentrierhilfen oder Ähnliches verwendet, die eine bessere Geometrie und Symmetrie im Versuchsaufbau ergeben könnten und damit eventuell eine eindeutigere Einordnung der Messungen erlauben würde. Eine nicht eindeutige Raumlage der Erdwärmesondenrohre spiegelt aber realitätsnahe Hinterfüllungen von Erdwärmesonden wider und wurde deshalb auch bewusst so gewählt. Aus allen diesen Gründen konnte vorab für die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitätsmessungen keine Wertebereiche für ein automatisches Hochziehen festgelegt werden. Vielmehr dient der Versuchsaufbau zur grundlegenden Überprüfung magnetischer Füllstandkontrollmessverfahren (in einem weiteren Vorhaben wäre eine Weiterentwicklung denkbar). Der Messring wurde für die jeweiligen Versuche entsprechend des sich entwickelten magnetischen Signals und, falls visuell erkennbar, entlang des sich entwickelten Suspensionsspiegel nach oben gezogen. Im Falle eines nicht offensichtlich erkennbaren Spiegels wurde anhand ansteigender und abfallender magnetischer Messsignale die Hochziehgeschwindigkeit angepasst.

In der Abbildung 6-189 repräsentiert die schwarze Kurve die gemessene volumetrische magnetische Suszeptibilität entsprechend der Position des Messringes (grüne Kurve, unterste Position liegt bei 0,593 m, die höchstmögliche Position bei 5,648 m, siehe Abbildung 5-14). Der erste signifikante Anstieg des magnetischen Signals ist etwas vor dem berechneten stabilen Suspensionseintritt in die Säule (linke schwarze gestrichelte vertikale Linie liegt etwas vor dem Suspensionseintritt in die Säule bei 2 Minuten). Während des Verpressvorgangs bildet sich eine diffuse Durchmischungs- und Übergangzone, in der Partikel in die überstehende Wassersäule auf und absteigen (Konvektionszellen, Wirbelzonen). In dem Versuch konnte durch die diffuse Durchmischung auch kein eindeutiger Suspensionsspiegel ausgemacht werden. Als Anhaltspunkt für die ungefähre Lage kann die Abweichung zwischen dem Hochziehen und dem berechneten Suspensionsspiegel herangezogen werden. Ist der Messring unterhalb des virtuellen Suspensionsspiegel (blaue Kurve) steigen die magnetischen Suszeptibilitäten eher an, während sie tendenziell abfallen, wenn der Messring oberhalb des virtuellen Suspensionsspiegel geführt wird. Der Schnittpunkt zwischen den beiden Kurven bei ca. drei Minuten markiert in diesem Falle den ungefähren magnetischen Suszeptibilitätswert für die Lage des Suspensionsspiegels.

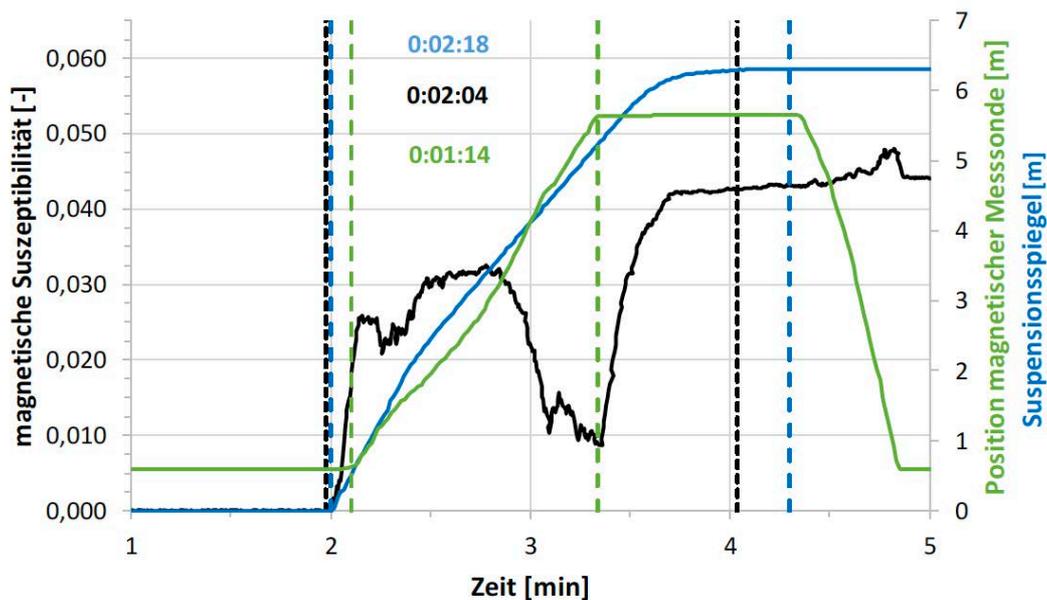


Abbildung 6-189: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom, Fokus Verpressphase)

Der Messring wurde schneller hochgezogen als der eigentliche Suspensionsspiegel. Die zweite schwarze horizontale Linie markiert das Erreichen einer quasi vollständigen Befüllung der Säule mit Suspension. Das eigentliche Verpressen dauerte etwas länger (zweite vertikale blaue gestrichelte Linie), um eine möglichst stabile Suspensionssäule erhalten zu können. Ein gewisses Nachverpressen mit konstanter Dichte und Volumenstrom spiegelt sicherlich auch realitätsnahe Bedingungen wider, denn im Feld sollte solange nachverpresst werden bis die vorgegebenen Dichtewerte erreicht werden. Die magnetischen Suszeptibilitätswerte am höchsten Messpunkt steigen während und nach dem Abschalten an, d. h. zu diesem Zeitpunkt indizieren die Messwerte ein Magnetitabsetzen und eine noch instabile Suspensionssäule (unmittelbares Entmischen, etc.). Nach Beenden des Verpressen wurde mehrmals höhenorientierte volumetrische magnetische Suszeptibilitätsmessungen durchgeführt (Abbildung 6-190). Auch bei statischer Suspensionssäule zeigen sich die heterogenen höhenpezifischen Suszeptibilitäten. Im Falle des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom) ergibt sich Maximum von 0,0478 beim erstmaligen Herunterfahren des Messringes bei einer Messhöhe von 0,919 m (eigens für das Vorhaben wurden diverse umfangreiche automatisierte Auswerteroutinen entwickelt, die eine Auswertung auch für spätere Vorhaben erleichtern soll). Das bedeutet, dass die magnetischen Suszeptibilitätswerte indizieren, dass Entmischungsvorgänge, Partikel- und Materialseparationen und Sedimentationsvorgänge unmittelbar beim und nach dem Verpressen stattfinden. Festgehalten werden kann, dass keine homogene Verpresssäule zumindest in Bezug auf die magnetischen Suszeptibilität erhalten wurde. Ausgeschlossen werden können irgendwelche Störeinflüsse anderer magnetischer, metallischer Gegenstände und dergleichen auf die Messungen, da vor jedem Versuch mehrere höhenpezifische Blindmessungen durchgeführt wurden (blaue Kurven in Abbildung 6-191).

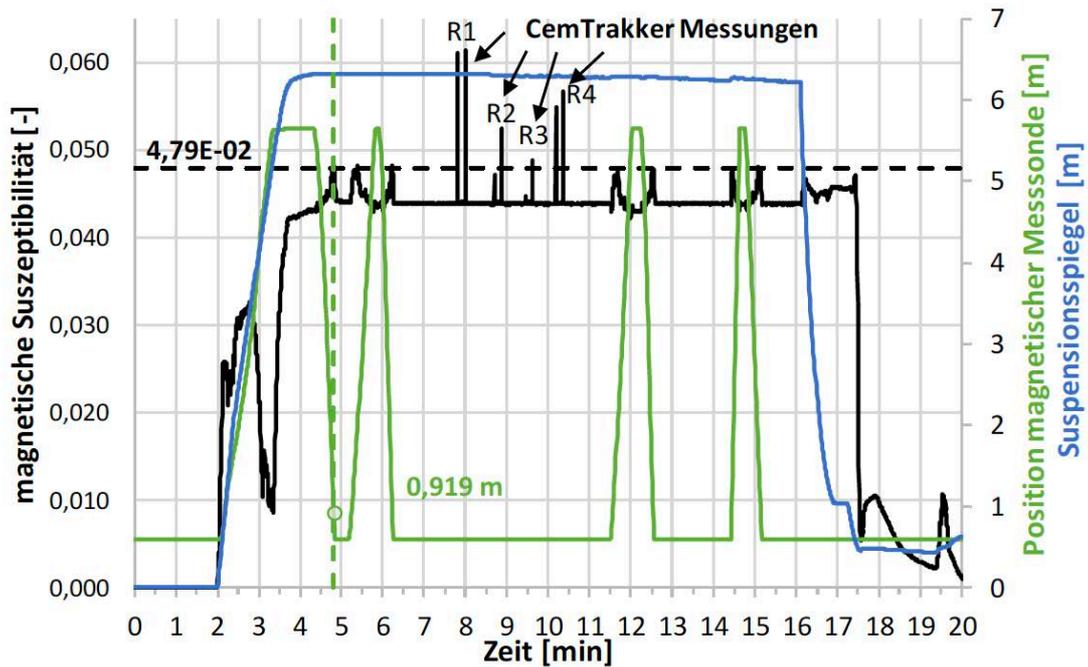


Abbildung 6-190: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

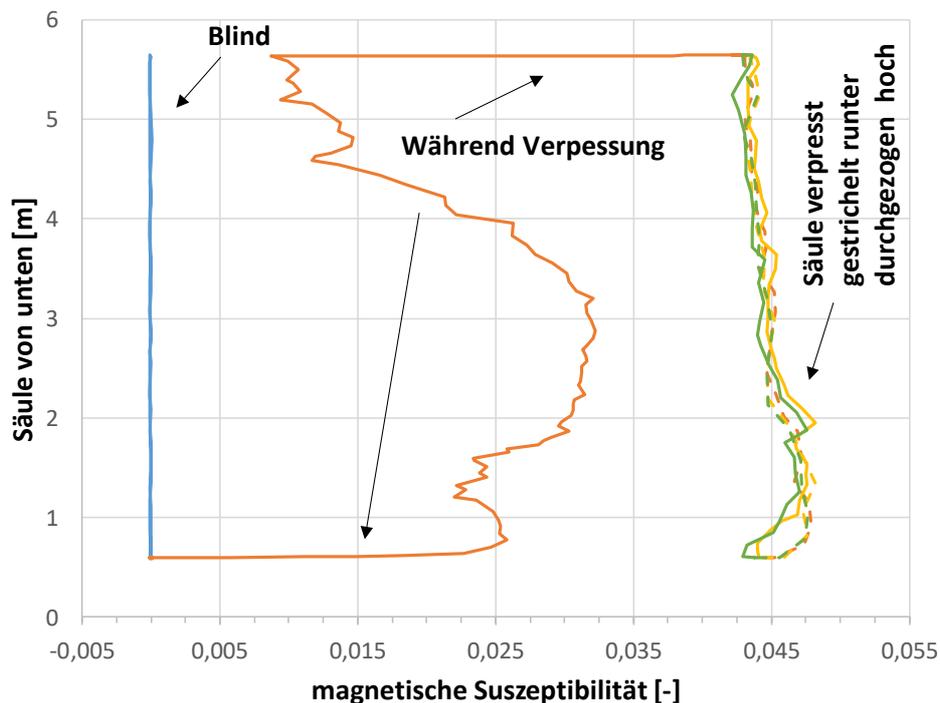


Abbildung 6-191: Höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

Die Berücksichtigung dieser Hintergrundwerte hat keinerlei Einfluss auf die Auswertung der gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten (ohne Relevanz, viel zu gering). In der

Abbildung 6-191 sind die magnetischen Messungen höhenspezifisch für die jeweiligen zeitveretzten Hoch- und Runterfahrzyklen des Messringes dargestellt. Gut erkennbar ist, dass gegen Ende des Verpressens der Messring oberhalb des eigentlichen Suspensionsspiegels geführt wurde, da am obersten Messpunkt die Werte bis zum Beginn des Herunterfahrens noch weiter angestiegen sind. Wenn die einzelnen Hoch- und Runterfahrzyklen näher betrachtet werden, liegen die Maxima in einem Bereich zwischen 1 und 2 Meter (Abbildung 6-192).

Die Unterschiede in den Maxima beim Hoch- und Runterfahren liegen daran, dass das Hochfahren mit einer geringeren Geschwindigkeit durchgeführt wurde als das Runterfahren (durch geringere Steigung in erkennbar). Die Herunterfahrgeschwindigkeit wurde so schnell durchgeführt, dass eine gewisse Verschiebung in der Zuordnung der Messhöhe wahrscheinlich ist. Das langsamere durchgeführte Hochziehen wird daher eher die höhenspezifischen Suszeptibilitäten widerspiegeln (eher Gleichgewichtszustände in der Messung erreicht). Insgesamt nehmen aber die Werte von oben nach unten ab, wobei der höchste Wert nicht am untersten Messpunkt liegt. Ein solches Verhalten würde man erwarten, wenn der Magnetit homogen absinken würde. Das Sedimentationsverhalten, heterogene Strömungsgeschwindigkeiten, das Auf- und Absinken und eine Separation des Magnetits im Zusammenspiel mit dem physikochemischen Suspensionsverhalten scheint sehr komplex zu sein. Der Einfluss von Partikelgrößen, Aggregationen verschiedener Partikel und Viskositäten, etc. sind, wenn überhaupt, nur mit einem enormen Untersuchungsaufwand quantifizierbar (im Rahmen dieses Vorhabens nicht leistbar).

Angemerkt werden muss, dass aufgrund unterschiedlicher Messintervalle in dieser Darstellung nicht eine komplette Höhenauflösung wiedergegeben werden kann. Die magnetische Suszeptibilität wurde in Millisekunden gemessen, während die Höhe des Messringes in Sekundenintervallen aufgezeichnet wurde, d. h. in einer betrachteten Höhe kann kein eindeutiger Messwert zugeordnet werden, sondern es handelt sich vielmehr um jeweilige Suszeptibilitätswertebereiche. Deshalb kann ein eindeutiger Trend über eine verstärkte Entmischung über die Zeit aus dieser Art Diagramm nicht immer zwingend abgeleitet werden.

Neben dem volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten wurden zudem in den vier Sondenrohren bei statischer Suspensionssäule höhenspezifische CemTrakker-Werte gemessen (Abbildung 6-193, es ergeben sich 2 Peaks durch das Hoch- und Runterfahren des CemTrakkers). Der Zeitpunkt der Messungen kann aus der Abbildung 6-190 anhand der eindeutigen Peaks in den volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten entnommen werden. Die CemTrakker Messungen wurde bei aktiver volumetrischer magnetischer Suszeptibilitätsmessung durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass es keinen Unterschied macht, ob die Bartingtonsonde aktiv misst oder nicht. Es ergaben sich immer exakt die gleiche Ausprägung und Reichweite des Einflussbereichs der Bartingtonsonde auf die CemTrakker Messungen. Die Zuordnung der Messungen zu der Säulenhöhe erfolgt über die Position des Bartington-Messringes bei 0,593 Meter. Der Messring ist identifizierbar mit negativen bzw. minimalen CemTrakker-Werten im unteren Bereich der Säule (Abbildung 6-193 und Abbildung 6-194). Der Einfluss der metallischen Befestigungsmanschette ist durchweg bei allen Versuchen größer als der Einfluss der Bartingtonsonde. Das zeigt sich durch insgesamt niedrigere CemTrakker-Werte im Bereich der Manschette (Abbildung 6-194 links, Erklärung zu niedrigen Werten siehe auch 6.6.1.7).

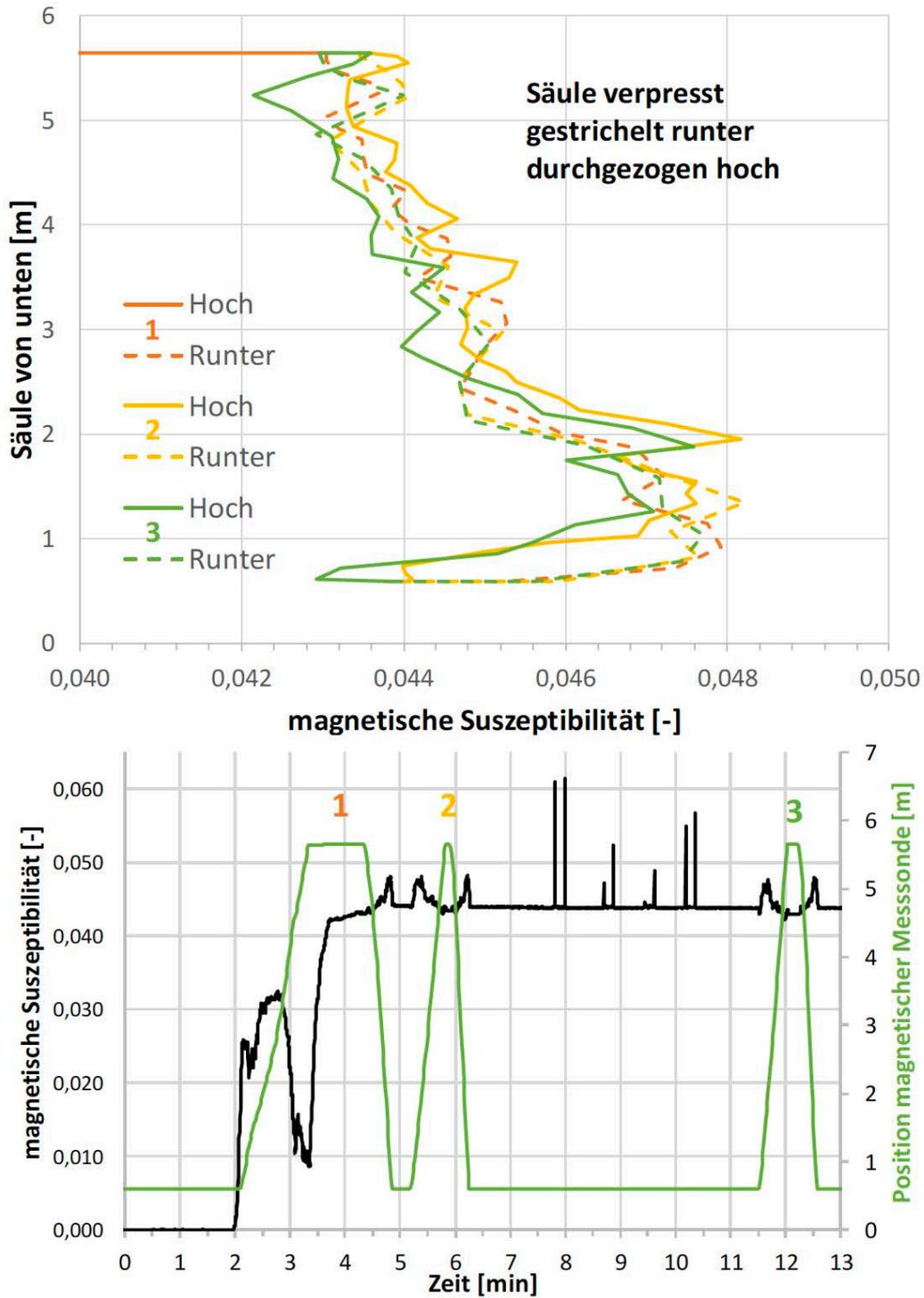


Abbildung 6-192: Volumetrische magnetische Suszeptibilitäten (oben: Höhen zugeordnet, unten: über die Zeit) des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

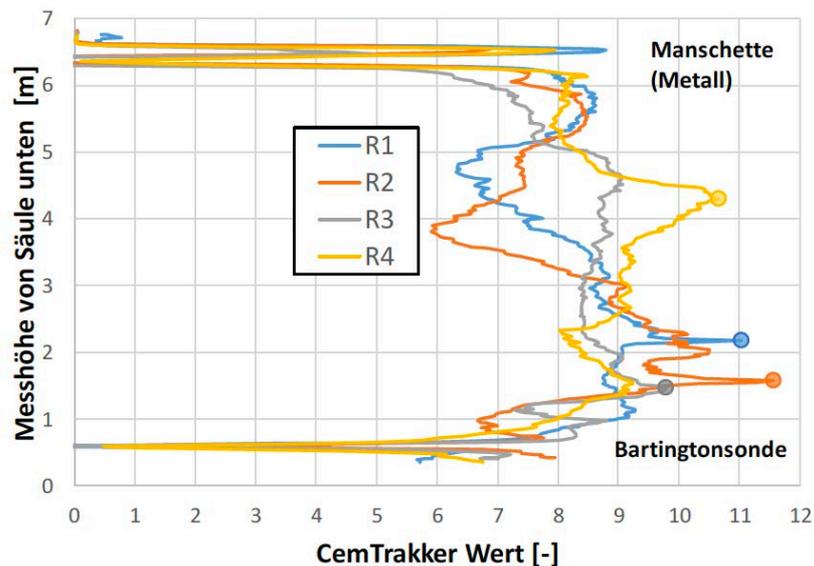


Abbildung 6-193: Höhenpezifische CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

Die Einflussbereiche (blaue transparente Rechtecke) sind in der Abbildung 6-194 für beide Störsignale maximal mit 40 cm qualitativ angegeben, wobei die Bartingtonsonde, wie oben schon erwähnt, die CemTrakker-Messungen weniger stark beeinflussen. Umso negativer die CemTrakker-Werte, desto geringer wird vermutlich der Abstand der Messsonde zum Bartingtonmessring oder zur Manschette sein. Im Falle des Versuches mit Baustoffes 15d (~40 l/min Volumenstrom) ergibt sich eine Abfolge mit ansteigenden Abstand zur Manschette über Rohr 3, Rohr 1, Rohr 2 zu Rohr 4. Im Bereich des Bartingtonmessringes haben Rohr 1 und Rohr 3 einen ähnlichen Abstand, dann folgt mit größerem Abstand Rohr 3 gefolgt von Rohr 4. Diese Messungen zeigen, dass die Sondenrohrverlauf in der Säule analog zu realen Bedingungen in ihrer Raumlage variieren („Korkenziehereffekt“). Die Nullmessungen zeigen auch, dass auch unter realen Bedingungen vor dem Verpressen einer Erdwärmesonde es sinnvoll ist, Blindmessungen durchzuführen, um vorab Einflüsse auf die CemTrakker-Werte ausschließen bzw. berücksichtigen zu können (siehe auch Kapitel 6.6.1.17). Nach Verpressen des Baustoffes erhöht sich der Messwert aufgrund des positiven Signaleffekts des Magnetits (Abbildung 6-195).

Im Bereich der Manschette nimmt der Wert im Bereich des Mittelwertes über die Höhe zu (Größenordnung ~8,2), im Bereich der Manschette kann man einer ähnlichen Hinterfüllung der Rohre gerechnet werden wie in ungestörten Bereichen. In der Praxis bedeutet, dass, wenn eine Blindmessung z. B. metallische Gegenstände anzeigt, sollte der CemTrakker-Wert sich um einer ähnlichen Deltawert erhöhen wie die ungestörten Bereiche. Die CemTrakker-Werte am Messring steigen nicht in allen Rohren in derselben Größenordnung an. Die Erhöhung am Rohr 2 deutet darauf auf eine Anreicherung von Magnetit hin, wohingegen der niedrigere Anstieg am Rohr 4 auf eine Abreicherung oder eher auf einer Rohrlage am Rand der Säule oder auf einem Rohr zu Rohr Kontakt (Plastik, etc.) zurückzuführen ist.

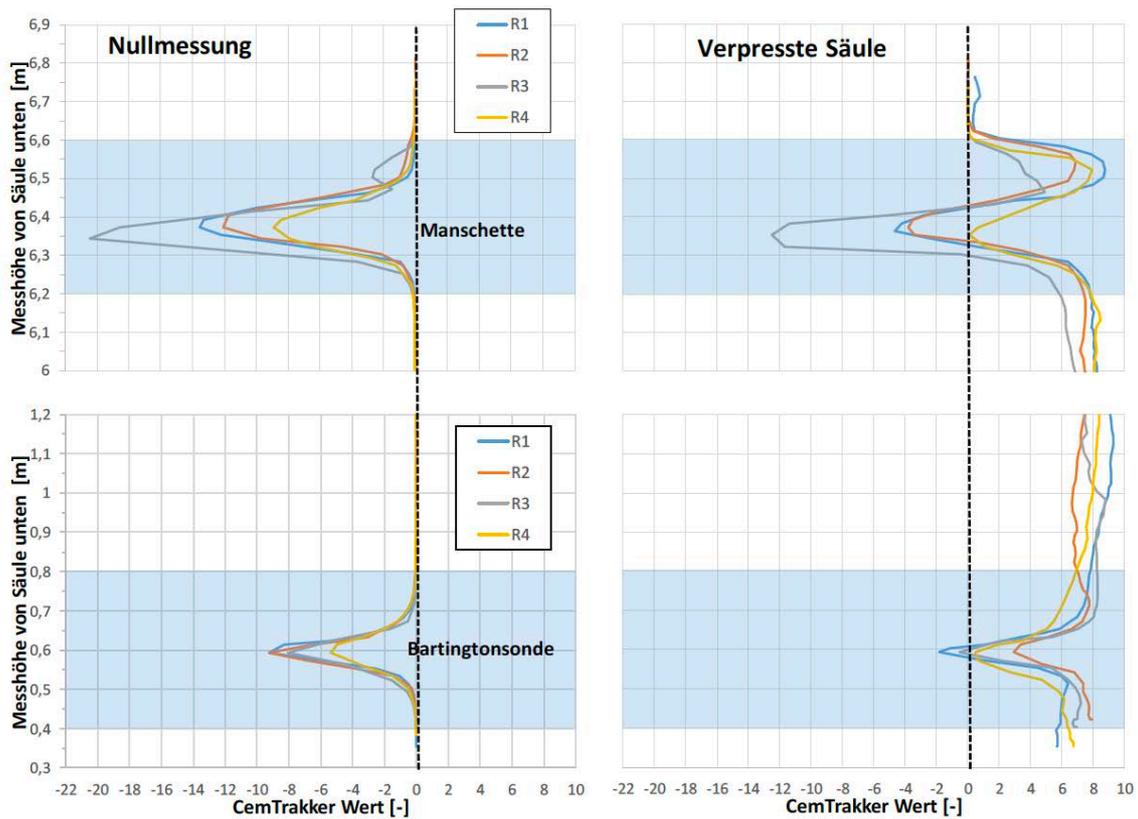


Abbildung 6-194: Einflussbereich der CemTrakker-Werte durch den Aufbau des Füllstandkontrollversuchs am Beispiel des Baustoffs 15d (~40 l/min Volumenstrom), oben: Fokus auf Manschette (Halterung für Säule), unten: Bartington-Messring, links: Nullmessung, rechts: Verpresste Säule

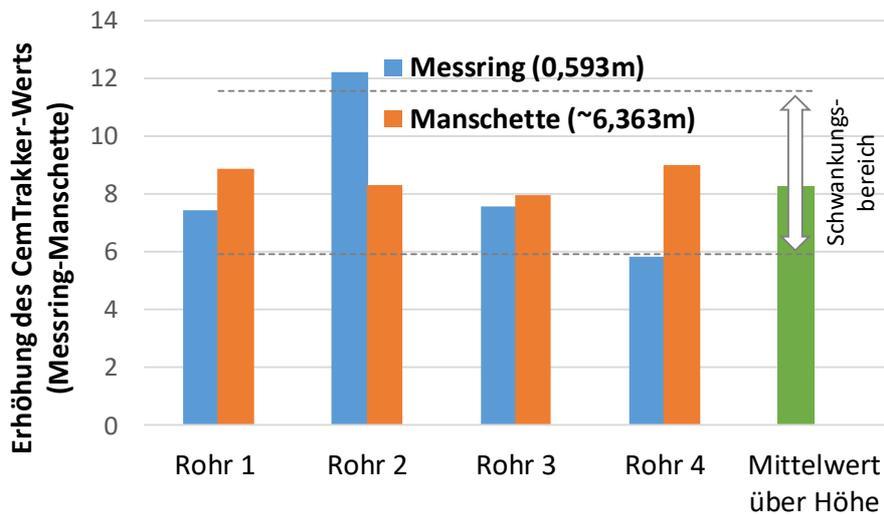


Abbildung 6-195: Erhöhung des minimalen CemTrakker-Werts nach Verpressen des Baustoffs 15d (~40 l/min Volumenstrom) am Messring und der Manschette, grüne Säule mit Mittelwert über die Höhe der ungestörten Messungen mit Maximal- und Minimalbereich

Die Werte bewegen sich aber wohl im Rahmen der schwankenden höhen-spezifischen CemTrakker-Werte der unbeeinflussten Messbereiche, die für jedes Rohr individuell doch sehr variieren (siehe Abbildung 6-193). Die Gründe dafür sind, wie schon erwähnt, die Lage der Rohre (am Rand, in der Mitte der Säule, Rohr zu Rohr Kontakt, etc.), die Reichweite der Sonde (~2mm) und mögliche Ab- und Anreicherungen von Magnetit. Trotz dieses heterogenen Verlaufs ergeben sich zumindest für drei Rohre Maxima im ähnlichen Bereich wie für die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitätsmessungen mit dem Bartington-Messring und deutet auf eine Magnetitentmischung, -sedimentation und -separation innerhalb der Säule hin (Abbildung 6-196, siehe auch Abbildung 6-192 oben).

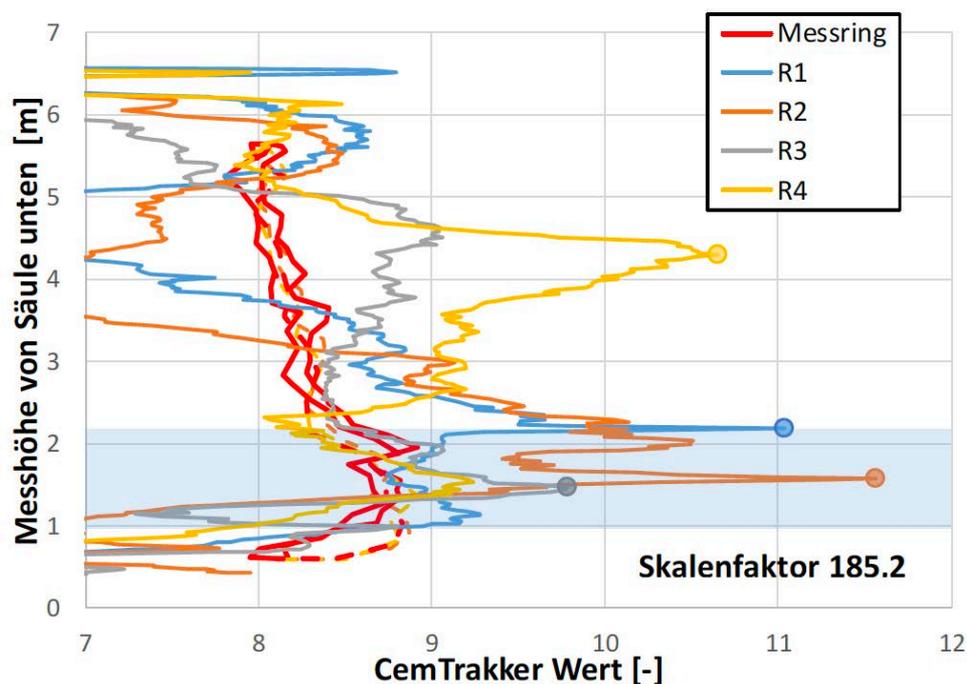


Abbildung 6-196: Umgerechnete volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Baustoffs 15d (~40 l/min Volumenstrom)

Die volumetrische magnetische Suszeptibilitäten der Bartingtonsonde Messungen wurden anhand der jeweiligen Hoch- und Runterfahrzyklen mit dem CemTrakker-Mittelwert über die Höhe quasi in äquivalente CemTrakker-Werte umgerechnet (angegebener Umrechnungsfaktor in Diagramm, siehe auch Abbildung 6-130). Der Umrechnungsfaktor ist für jeden Versuch individuell ermittelt worden und erhebt nicht den Anspruch einer absoluten Genauigkeit, denn sicherlich wären mehr Hoch- und Runterfahrzyklen notwendig, um beispielsweise bessere Grundlagen für statistische Bewertungen zu ermöglichen. Es hat sich aber gezeigt, dass sich die Umrechnungsfaktoren für alle Füllstandkontrollversuche mit dem Doppel-U-Rohr sich in derselben Größenordnung bewegen (siehe auch Tabelle 10-9 im Anhang). Die volumetrische magnetische Suszeptibilitäts-sonde erfasst den gesamten Innenraum des Messrings und somit einen integralen Wert über die 4 Sondenrohre, Verpressschlauch, Hinterfüllung und Säule. Der CemTrakker erfasst dagegen nur eine gewisse Reichweite (ca. 2 cm, siehe Kapitel 6.6.1.10) im Umfeld eines befahrenen Roh-

res. Dementsprechend schwanken die Messringwerte weniger als die CemTrakker-Werte. Wendet man den Umrechnungsfaktor auf den zeitlichen Verlauf und den höhenspezifischen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten an, erkennt man, dass die Dotierung im Baustoff 15d zumindest in dieser Charge insgesamt sehr hohe Werte liefert (Abbildung 6-197 und Abbildung 6-198).

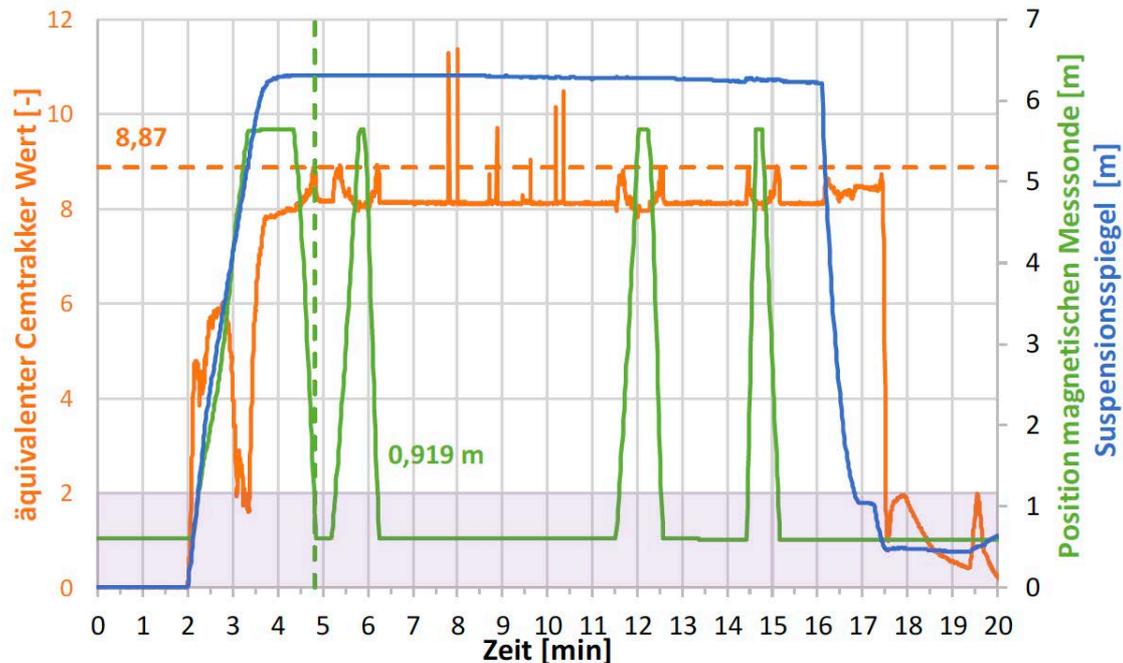


Abbildung 6-197: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und äquivalente CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

Liegt man den Wert 2 als den Wert zugrunde, der als Kriterium in der Praxis für eine vollständige Suspensionssäule herangezogen wird, ist der Wert 2 für die hohe Dotierung des Baustoffes 15d zu gering gewählt, da schon während der Verpressphase in der Übergangszone zwischen Baustoff und überstehendem Wasser Werte größer als 2 gemessen werden (Abbildung 6-199). Oberhalb des Suspensionsspiegels wurden auch Werte oberhalb 2 gemessen. In der Praxis könnte das bedeuten, dass mit dem Wert 2 ein Erreichen einer vollständigen Hinterfüllung angenommen wird, obwohl man sich noch oberhalb des eigentlichen Suspensionsspiegels mit der Messsonde befindet. Bei statischer Säule hat der Baustoff 15d in der Charge einen CemTrakker-Wert im Mittel von ~8,2. Aus diesem Grunde sollte das Kriterium für ein Erreichen eines Suspensionsspiels für den Baustoff 15d mit mindestens 4,1 festgesetzt werden (>50% Erreichen des Endwertes, entspricht im Diagramm ca. dem Schnittpunkt zwischen der Suspensionsspiegelkurve und der Höhenlagekurve der Bartingtonsonde). Zudem sollte nicht nur das Erreichen eines bestimmten Wertes als Kriterium herangezogen werden, sondern es sollten zusätzlich, nach Erreichen dieses Zielwertes, ein weiteres Ansteigen des Messwertes erkennbar sein. Erst dann kann man davon ausgehen, dass die Suspensionsspiegelhöhe tatsächlich bereits erreicht wurde. Erst danach sollte die Sonde weiter nach oben gezogen werden.

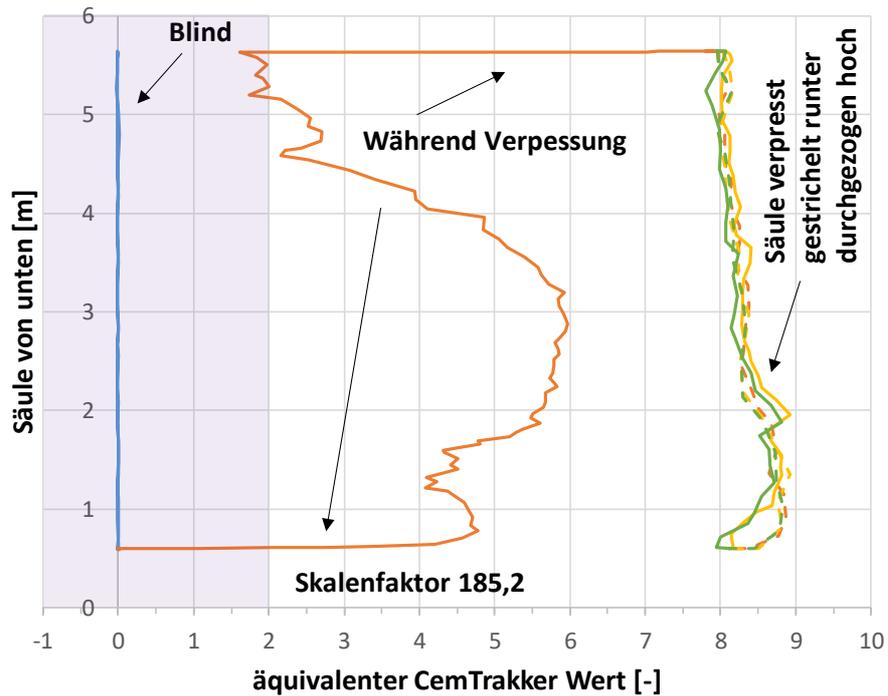


Abbildung 6-198: Höhenspezifische äquivalente CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

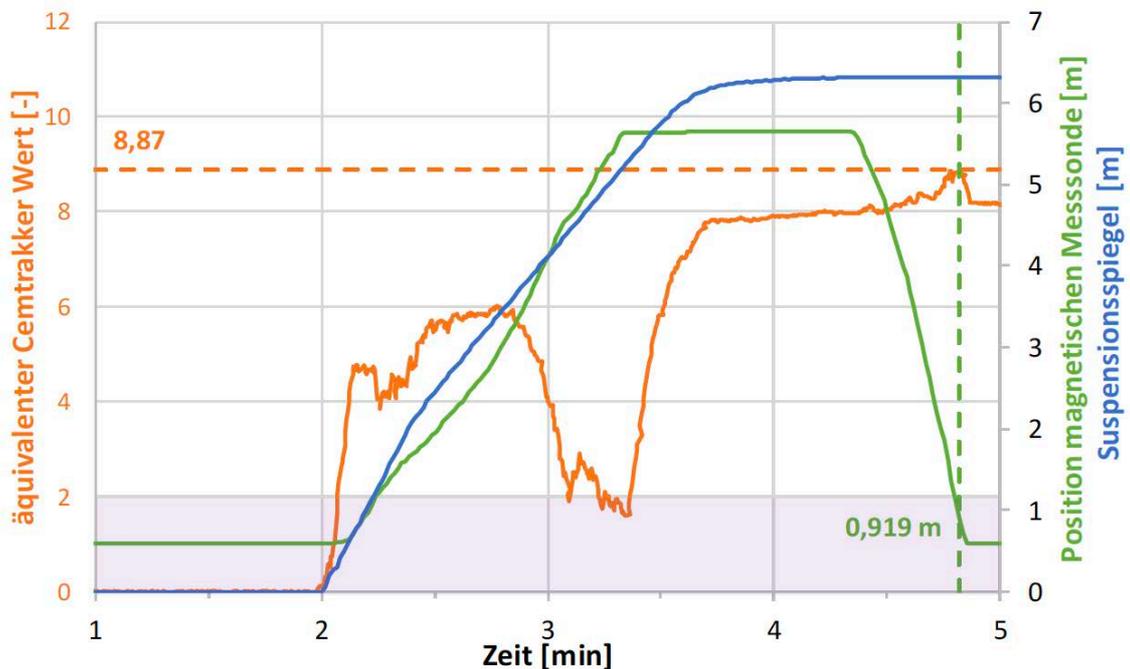


Abbildung 6-199: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und äquivalente CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom, Fokus Verpressphase)

Die gesonderte Auswertung der Maxima und Minima aus den zeitlichen Verläufen der volumetrischen Suszeptibilitäten der Hoch- und Runterfahrzyklen zeigt, dass tendenziell ein Absetzen bzw. Anreicherung des Magnetits von oben nach unten stattfindet (Abbildung 6-200 und Tabelle 6-43, siehe zusätzlich Abbildung 6-192 mit der Auswertung über die Höhe). Die Maxima (Mittelwerte der Hoch- und Runterfahrzyklen) liegen aber nicht am tiefsten Messpunkt. Auch die Minima sind im Mittel etwas unterhalb des höchsten Messpunktes. Das Zusammenspiel zwischen Anreichern, Sedimentieren, etc. ist scheinbar sehr komplex (siehe dazu auch Erläuterungen zu Abbildung 6-192). Der Unterschied in der Auswertung liegt in der Zuordnung der Messhöhen zu den volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten, in der Abbildung 6-192 wird ein Messbereich bzw.-zeitraum den Höhen zugeordnet.

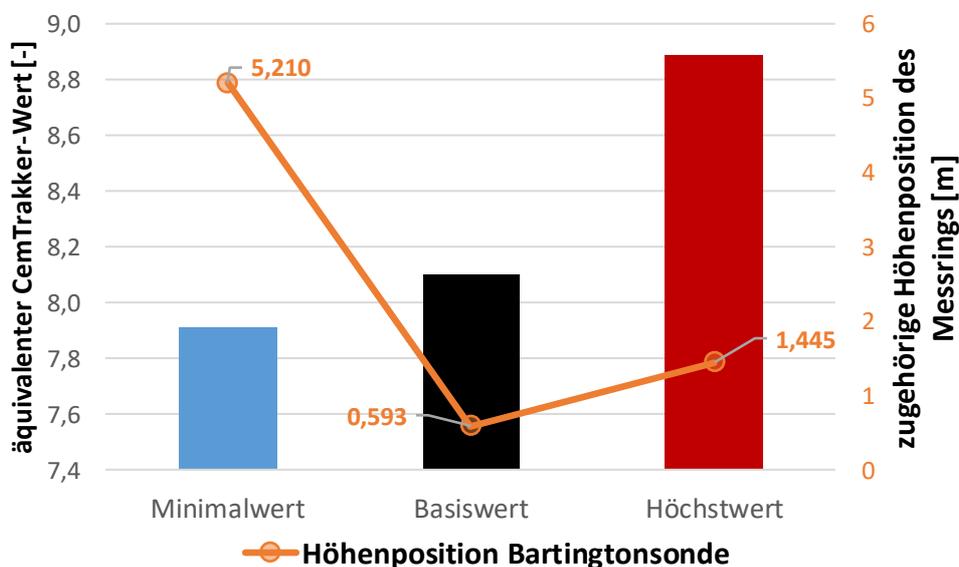


Abbildung 6-200: Äquivalente CemTrakker-Werte mit zugehörigen Messhöhen des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom, Fokus Verpressphase)

Tabelle 6-43: Maxima und Minima der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und umgerechneten CemTrakker Äquivalenten des Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom)

	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. H_{Bart} [m]	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. H_{Bart} [m]	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}
Verpressph. und runter 1	0,0480*	8,8968*	0,7202*	0,0086*	1,5947#	5,6318#	0,0394#	7,3021#
hoch 2	0,0482	8,9214	2,0983	0,0429	7,9430	5,3918	0,0053	0,9784
runter 2	0,0482	8,9279	1,0674	0,0431	7,9744	4,4919	0,0051	0,9535
hoch 3	0,0476	8,8121	2,0550	0,0421	7,8052	5,4214	0,0054	1,0069
runter 3	0,0480	8,8842	1,2861	0,0428	7,9293	5,5347	0,0052	0,9549
Mittelwert	0,0480	8,8885	1,4454	0,0359	7,9130	5,2100	0,0053	0,9734

*runterfahren Zyklus 1

#während Verpressphase, Beginn unterhalb Suspensionsspiegel

Im Prinzip passt das Verhalten zum hohen Absetzmaß von 4% (<2 ist erlaubt nach LQS EWS Baden-Württemberg). Zumindest für den Baustoff 15 d in der Charge korreliert das Absetzmaß mit dem offensichtlichen Magnetitabsetzen, d. h. genauere magnetische Untersuchungen nach Verpressen einer Erdwärmesonde können Anhaltspunkte für eine Sedimentationsstabilität eines Baustoffes liefern. Dazu reichen sicherlich keine CemTrakker-Messungen nur in einem Rohr, wie sie üblicherweise in der Praxis durchgeführt werden. Messungen in allen 4 Sondenrohren, idealerweise mehrmals, sind deshalb aus unserer Sicht empfehlenswert, wenn man mit den CemTrakker-Werten Aussagen über die Sedimentationsstabilität und Hinterfüllqualität treffen möchte (siehe auch Kapitel 6.6.1.17).

Mit der Analyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes, ohne Berücksichtigung der Hoch- und Runterfahrzyklen und der CemTrakker beeinflussten Messungen, kann mit einer Gradientenanalyse zumindest qualitativ abgeschätzt werden, ob sich weitere Veränderungen in der statischen Suspensionssäule entwickeln, oder nicht (Abbildung 6-201, Tabelle 6-44).

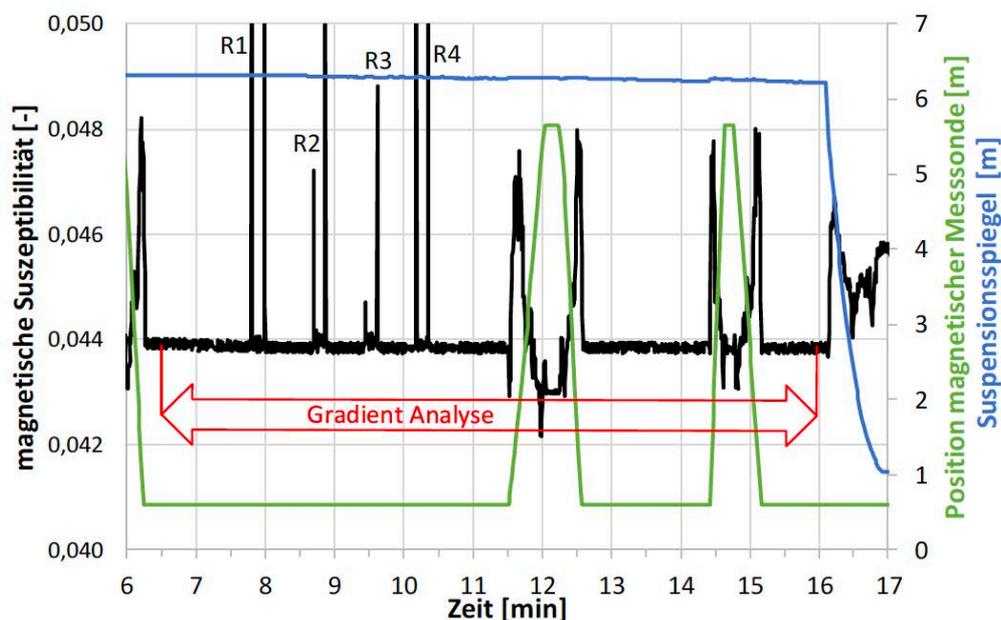


Abbildung 6-201: Analyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom, statische Säule)

Tabelle 6-44: Trend aus der Gradientenanalyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom, statische Säule)

	$\Delta X/\text{min}$	$\Delta X/\text{h}$	$\Delta X/2\text{h}$	$\Delta X/\text{d}$
Trend X_{Bart}	-2,3E-05	-0,0014	-0,0028	-0,0335
Trend X_{cem}	-0,0043	-0,2588	-0,5176	-6,2111

Im Falle des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom) nimmt die Basislinie über die Zeit leicht ab. Das bedeutet, dass tendenziell nach Beendigung des Ver-

pressvorgangs an der Ruheposition unmittelbar keine weitere Sedimentation von Magnetitpartikeln zu erkennen ist. Scheinbar scheint eher eine Abreicherung von der Basis weiter nach unten stattzufinden. Dass es sich um eine tatsächliche Abreicherung von Magnetit handelt, kann nicht definitiv ausgesagt werden. Eine Drift in den Messungen kann nicht ausgeschlossen werden, die eine scheinbare Abreicherung vortäuschen würde. Trotz dieser Unsicherheit liefert der Gradientenvergleich eine zusätzliche Option, die jeweiligen Versuche miteinander vergleichen zu können. Insbesondere ein starkes Ansteigen des Messsignales über die Zeit (positiver Trend) in der Ruheposition würde ein starkes Entmischen des Baustoffes anzeigen. Leicht negative Gradienten sind deshalb weniger kritisch zu sehen, d.h. der Baustoff 15d (~40 l/min Volumenstrom) zeigt nach dem Verpressvorgang bei statischer Suspensionssäule relativ stabile volumetrische magnetische Suszeptibilitäten. Es zeigt sich zwar, belegt durch die Hoch- und Runterfahrzyklen, ein offensichtliches Magnetitabsetzen, das sich aber scheinbar schon beim und unmittelbar nach dem Verpressvorgang einstellt. Wenn man analog zum Absetzmaß die Änderungen für 1h, 2h und 24 hochrechnet, ergeben sich die hypothetischen Veränderungen in den volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten bzw. äquivalenten CemTrakker-Werten, die in der Tabelle 6-44 angegeben sind. Wie oben schon erwähnt, dient der Gradientenvergleich einer zusätzlichen Vergleichsmöglichkeit der verschiedenen Versuche. In der Realität wird der startende Abbindevorgang ein Absetzen über mehrere Stunden in den meisten Fällen verhindern. Insgesamt zeigt der Baustoff 15d in der Charge bei einem Volumenstrom ~40 l/min ein nicht zulässiges Absetzmaß, heterogene Viskositäten sowie ein erkennbares Magnetitabsetzen. Die Charge ist zudem sehr hoch dotiert.

6.7.1.2. ~60 l/min Volumenstrom

Die Versuche mit höheren Volumenstrom dienen zu Klärung der Frage, ob höhere Verpressgeschwindigkeiten andere Messergebnisse liefern als die normalerweise verwendeten Geschwindigkeiten. In der Tabelle 6-49 können die Versuchsbedingungen, wichtige gemessene und berechnete Parameter des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (siehe ~60 l/min Volumenstrom) entnommen werden. Der Versuch Baustoff 15d mit dem erhöhten Volumenstrom zeigt sehr konstante Volumenströme, Dichten und Verpressgeschwindigkeiten während dem Hinterfüllvorgang (Abbildung 6-202, Verpressgeschwindigkeiten siehe Anhang Abbildung 10-8). Beim Versuch 15d mit dem erhöhten Volumenstrom von ~60 l/min sind die Viskositäten geringer als beim Versuch 15d mit ~40 l/m (keiner ~5,8 cP). Im Falle des Versuchs 15d mit einem Volumenstrom von ~60 l/min sind die Viskositäten über die Zeit relativ konstant und fallen im Gegensatz zum Versuch mit ~40 l/min ganz leicht während des Verpressens (Abbildung 6-203). Etwas geringere Viskositäten können sicherlich mit erhöhten Verpressgeschwindigkeiten und damit höheren Scherraten erklärt werden. Eine schnellere Verpressgeschwindigkeit könnte zudem hilfreich sein bei der längeren Beibehaltung der Eigenschaften des im Mischer aufgeschlossenen Materials. Vermutlich spielen aber Unterschiede in der Qualität der Chargen eine noch größere Rolle. Eigentlich sollte zwischen den Versuchen keine Unterschiede im Absetzmaß und den Marsh-Zeiten vorhanden sein, da sie exakt gleich durchgeführt wurden, d.h. am selben Tag, mit praktisch identischen Temperaturen, denselben W/F Verhältnissen sowie mit den identischen Mischbedingungen. Die verwendete Charge bei dem Versuch 15d (Volumenstrom ~60 l/min) erfüllt gerade noch das Kriterium für das Absetzmaß <2 nach LQS EWS Baden-Württemberg,

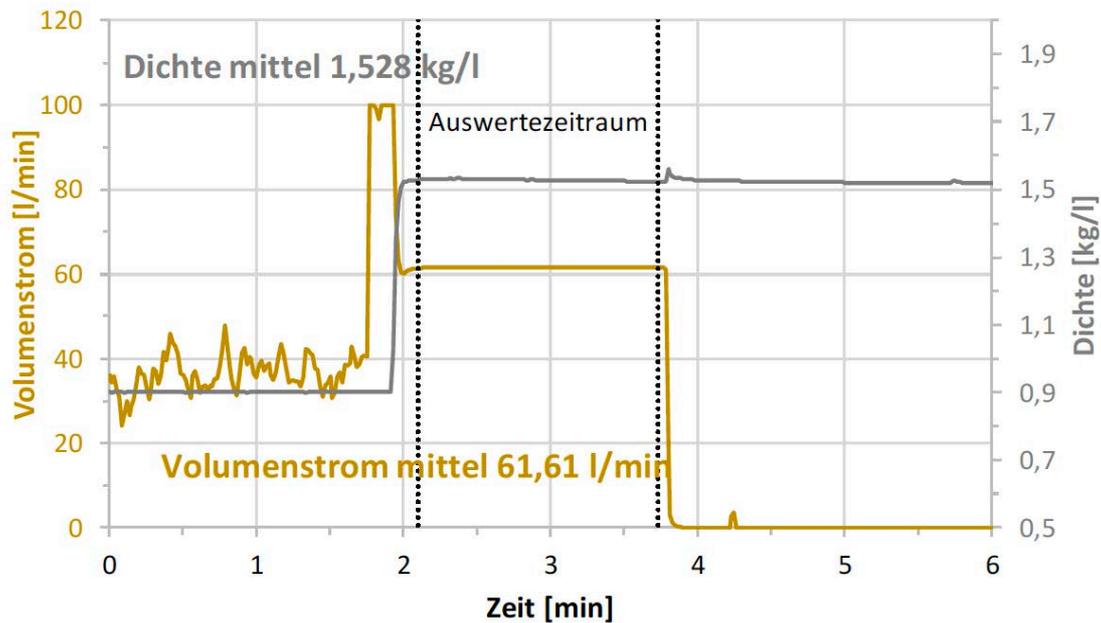


Abbildung 6-202: Volumenstrom und Dichte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom, gemessen am Massendurchflussmesser)

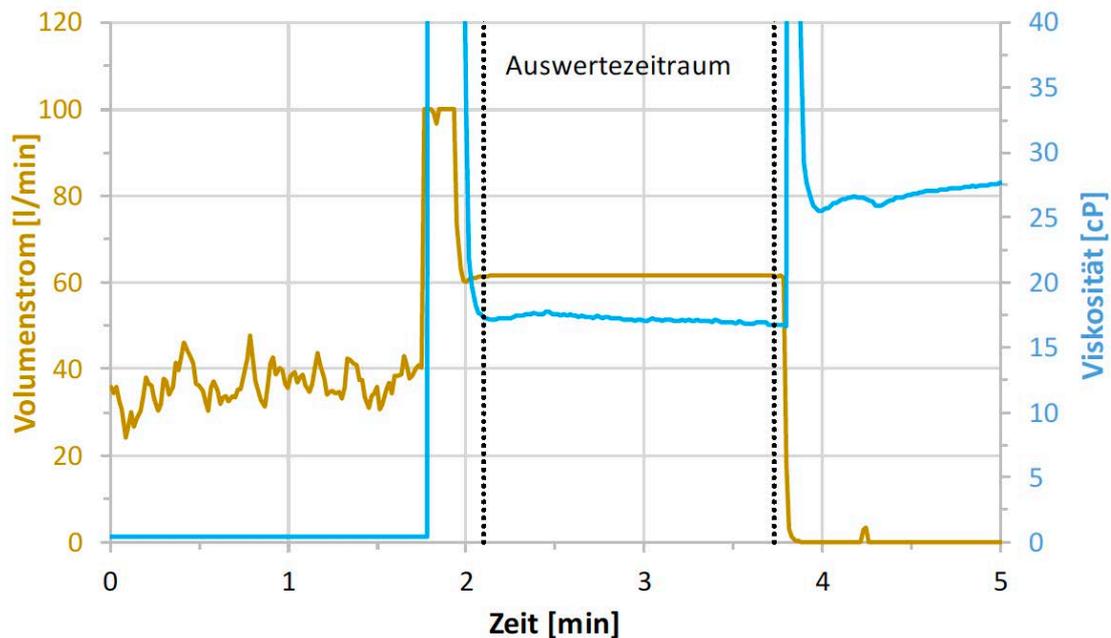


Abbildung 6-203: Volumenstrom und Viskosität des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d, Fokus ersten 5 Minuten (~40 l/min Volumenstrom, Daten vom Massendurchflussmesser)

die Charge des Versuchs mit ~40 l/min Volumenstrom ergab dagegen ein Absetzmaß von 4. Beide Chargen haben geringe Marshzeiten (unter 50 Sekunden) und erfüllen damit nicht die Vorgaben der LQS EWS. Die Versuche sind ein Paradebeispiel für unterschiedlicher Chargenqualitäten und zeigen die zwingende Notwendigkeit verbesserten Qualitätskontrollen direkt bei der

Herstellung des Baustoffs. Allein aus diesem Hintergrund ist die in der LQS EWS geforderte Vorgehensweise beim Hinterfüllen einer EWS mehr als sinnvoll. Die Angabe der verwendeten Charge oder des Herstellungsdatums in der Dokumentation einer EWS Hinterfüllung scheint zudem aus unsere Sicht angebracht (zwecks Rückverfolgung ungenügender Chargen, Hersteller bekommen Feedback, Verhinderung, dass Charge weiterverwendet wird, etc.). Die Temperatur steigt nach dem Verpressende aufgrund startender Hydrationsprozesse oder ansteigender Umgebungstemperaturen analog zum Versuch mit 40 l/min leicht an (siehe Abbildung 10-7 im Anhang). Trotz der höheren Verpressgeschwindigkeiten lag der Suspensionsspiegel oberhalb der Position des Messringes (Abbildung 6-204).

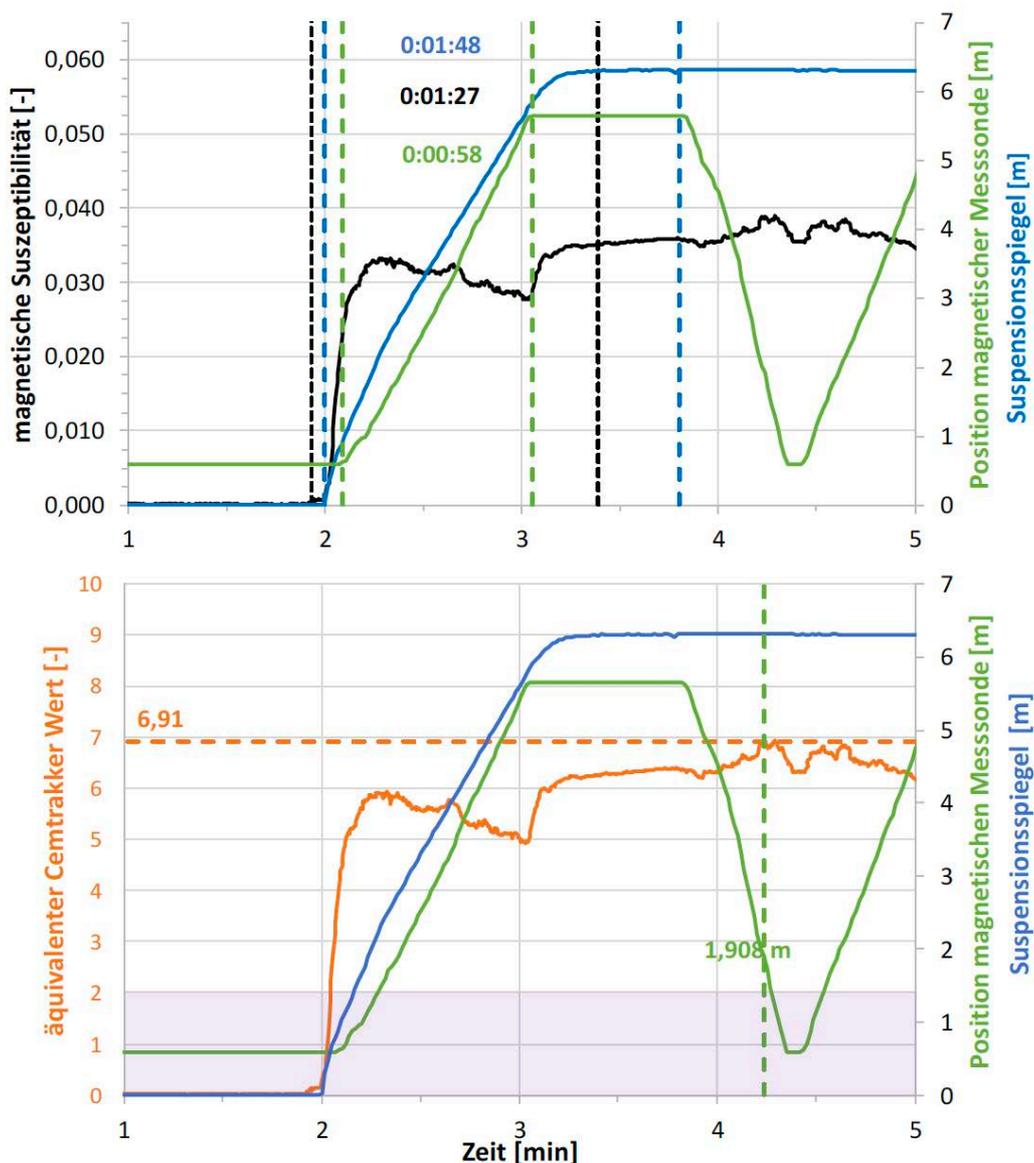


Abbildung 6-204: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und volumetrische magnetische Suszeptibilitäten (oben) sowie äquivalente CemTrakker-Werte (unten) des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom, Fokus Verpressphase)

Demnach haben zumindest in diesem Versuchsaufbau höhere Volumenströme keinen negativen Einfluss auf die Detektion eines Suspensionsspiegels des Baustoffs 15d. Die gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten passen sehr gut zur Position des Messringes und der berechneten Suspensionsspiegelhöhen. Je näher der Messring zum Suspensionsspiegel geführt wird, desto geringer wird die gemessene Suszeptibilität. Nach Beenden des Verpressen wurden höhenorientierte volumetrische magnetische Suszeptibilitätsmessungen sowie CemTrakker Messungen (Peaks) durchgeführt (Abbildung 6-205: Darstellung der äquivalenten CemTrakker Werte, höhen spezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten in der Abbildung 10-9 im Anhang).

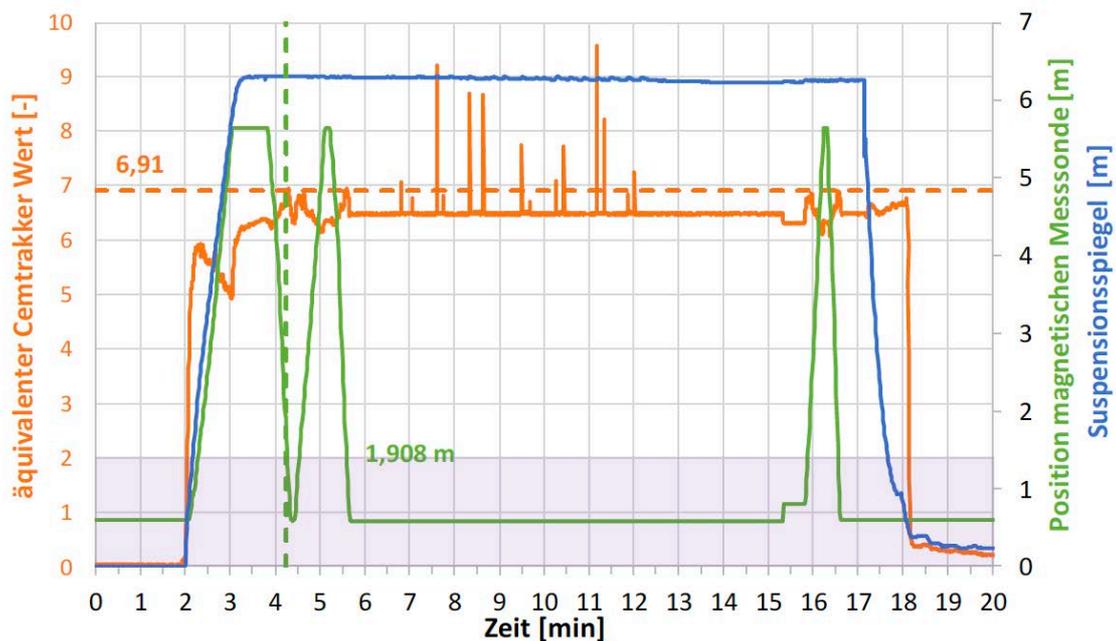


Abbildung 6-205: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und äquivalente CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom)

Die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten bzw. CemTrakker Äquivalente sind in der Charge deutlich geringer als in der verwendeten Produktcharge für den Versuch bei einem Volumenstrom von 40 l/min (kleiner 1,5 im CemTrakker Wert). Wenn man bedenkt, dass ein CemTrakker-Wert von 2 einen Suspensionsspiegel anzeigen soll, ist das schon ein gravierender Unterschied. Die mit der Dotierung erreichte magnetische Suszeptibilität ist aber trotzdem noch sehr hoch, denn auch hier würde ein CemTrakker-Wert von 2 nicht das Erreichen eines Suspensionsspiegels anzeigen. Wenn man den Zielwert mit 50% des Endwertes (Mittelwert) festlegt, müsste das Hochziehkriterium bei einem Wert $>3,25$ gewählt werden.

Die Suspensionssäule zeigt analog zum Versuch bei 40 l/min Volumenstrom höhen spezifische Magentitanreicherungen und -abreicherungen. Die Werte nehmen tendenziell von oben nach unten zu und sind ein Indiz für eine Entmischung des Baustoffes (Abbildung 6-207, Abbildung 6-208, Abbildung 6-208, Tabelle 6-45). Wie beim Versuch mit 40 l/min Volumenstrom sind die Maxima aber nicht am niedrigsten Messpunkt und die Minima auch nicht am höchsten Messpunkt

gemessen worden. Die Höhenprofile der CemTrakker-Werten in den jeweiligen Rohren sind ähnlich in ihrer Ausprägung wie die beim Versuch mit 40 l/min Volumenstrom.

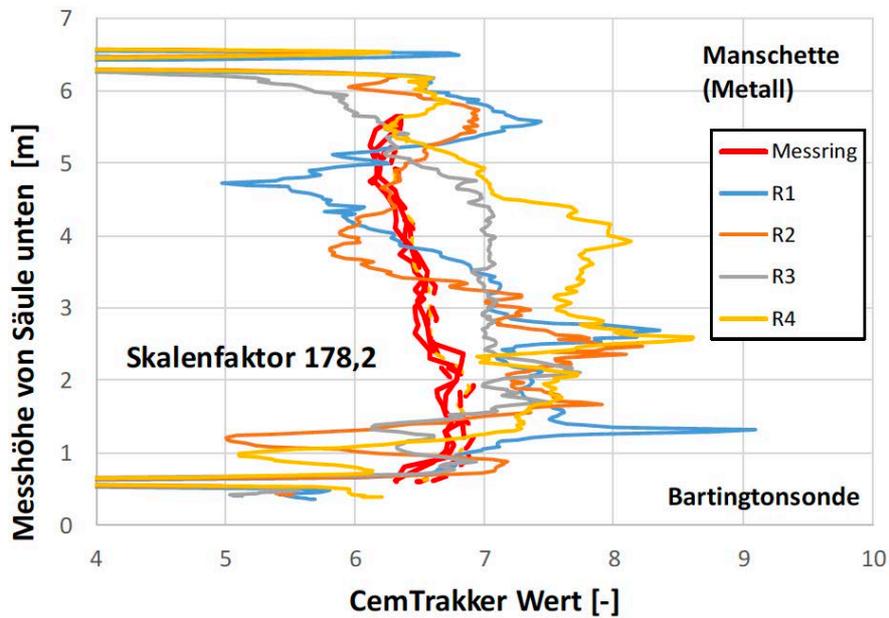


Abbildung 6-206: Umgerechnete volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Baustoffs 15d (~60 l/min Volumenstrom)

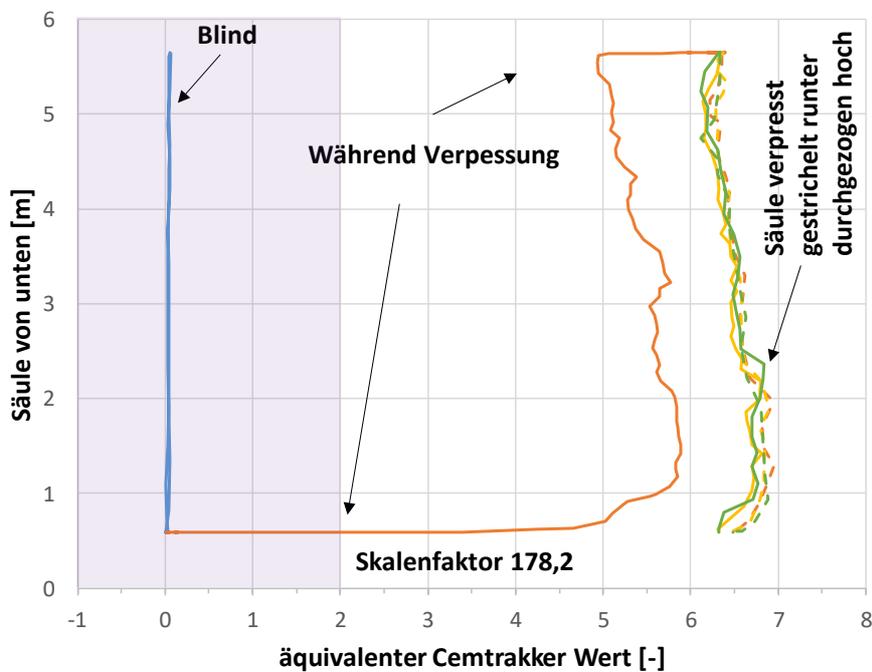


Abbildung 6-207: Höhenspezifische äquivalente CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom)

Auch der Versuch mit 60 l/min Volumenstrom zeigt, dass, wenn man mit dem CemTrakker Messungen Aussagen über die Verfüllqualität machen möchte, immer Messungen in allen Sondenschenkeln durchgeführt werden sollten. Die Einflüsse der Manschette und des Messringes auf die CemTrakker-Messungen sind vergleichbar mit dem Versuch bei 40 l/min Volumenstrom (siehe Abbildung 10-10 und Abbildung 10-11 im Anhang).

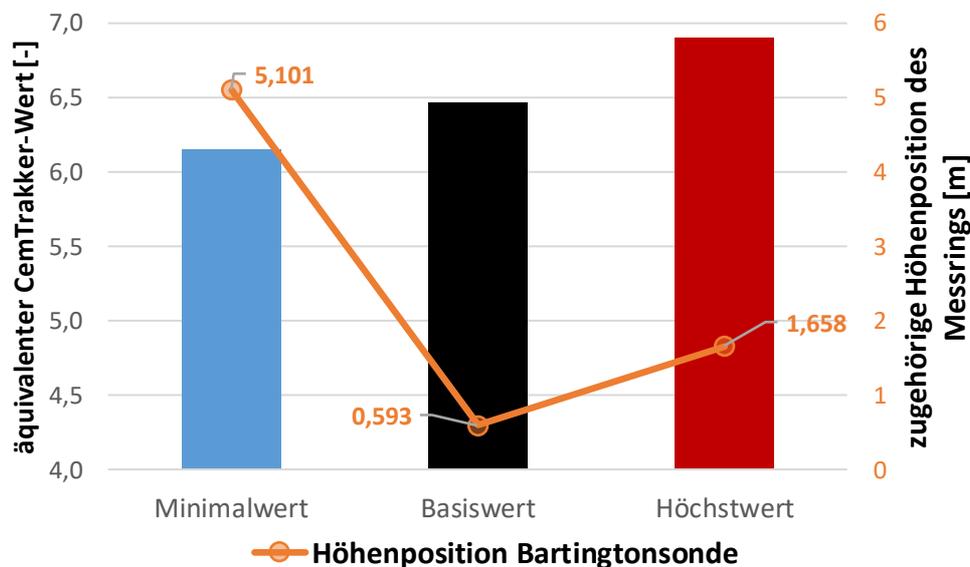


Abbildung 6-208: Äquivalente CemTrakker-Werte mit zugehörigen Messhöhen des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom)

Tabelle 6-45: Maxima und Minima der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und umgerechneten CemTrakker Äquivalenten des Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom)

	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. H_{Bart} [m]	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. H_{Bart} [m]	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}
Verpressph. und runter 1	0,0390*	6,9467*	1,0935*	0,0019*	0,3381#	0,5930#	0,0371#	6,6087#
hoch 2	0,0384	6,8505	2,1848	0,0344	6,1339	5,2716	0,0040	0,7165
runter 2	0,0390	6,9459	1,1046	0,0352	6,2783	4,9329	0,0037	0,6677
hoch 3	0,0385	6,8683	2,3676	0,0342	6,1002	5,4544	0,0043	0,7680
runter 3	0,0388	6,9078	1,5391	0,0341	6,0823	4,7459	0,0046	0,8255
Mittelwert	0,0387	6,9038	1,6579	0,0280	6,1487	5,1012	0,0042	0,7444

*runterfahren Zyklus 1

#während Verpressphase, Beginn unterhalb Suspensionsspiegel

Insgesamt ist der Unterschied in den maximalen und minimalen äquivalenten CemTrakker-Werten bei ~0,74 im Vergleich zu ~0,97 beim Versuch mit 40 l/min. Dieses kleinere Delta würde zu dem geringen Absatzmaß in der verwendeten Charge für den Füllstandkontrollversuch mit dem Baustoff 15d bei ~60 l/min Volumenstrom passen.

Die Gradientenanalyse ergibt einen kleinen Anstieg der Werte über die Zeit. Dieser geringer Wert deutet ein marginales weiteres Absetzen über die Zeit hin und scheint irrelevant (Tabelle 6-46).

Tabelle 6-46: Trend aus der Gradientenanalyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom, statische Säule)

	$\Delta X/\text{min}$	$\Delta X/\text{h}$	$\Delta X/2\text{h}$	$\Delta X/\text{d}$
Trend X_{Bart}	6,7E-06	0,0004	0,0008	0,0096
Trend X_{cem}	0,0012	0,0714	0,1429	1,7143

Insgesamt hat der Baustoff 15d in der Charge bei einem Volumenstrom ~60 l/min ein gerade noch zulässiges Absetzmaß und zeigt auch ein erkennbares Magnetitabsetzen. Die Charge ist zudem relativ hoch dotiert. Einen negativeren Einfluss infolge höherer Verpressgeschwindigkeiten konnte nicht festgestellt werden. Eine Vergleichbarkeit der Versuche wird durch die Chargenunterschiede erschwert. Angemerkt werden muss, dass solche Chargenunterschiede in der Praxis fatal sind, denn wenn so große Variationen vorhanden sind, ist eine einmalige Prüfung der Mischtechnik mit einem gegebenen Baustoff (Abnahmeprüfung laut LQS EWS) nicht aussagekräftig. Auch die großen Schwankungen in den Suszeptibilitäts- und CemTrakker-Werten erfordern eigentlich eine individuelle volumetrische magnetischen Suszeptibilitätsmessung von jeder Charge.

6.7.1.3. Erhöhtes W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom)

Die Versuche mit höheren Wasser/Feststoffverhältnisses dienen zu Klärung der Frage, inwieweit erkennbar höhere W/F Verhältnisse sich negativ auf die magnetischen Messungen und der Hinterfüllqualität auswirken. In der Tabelle 6-49 können die Versuchsbedingungen, gemessene und berechneten Parameter des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (siehe ~ 40 l/min Volumenstrom, W/F erhöht) entnommen werden. Der Versuch Baustoff 15d mit dem erhöhten W/F Verhältnis schwanken die Volumenströme zu Beginn etwas und sind dann aber mehr oder weniger konstant (Abbildung 6-209, Verpressgeschwindigkeiten, Temperaturmessungen, siehe Abbildung 10-12 und Abbildung 10-13 im Anhang). Diese Schwankungen zeigen sich auch bei den Viskositäten und Dichtewerten aus dem Massendurchflussmesser (Abbildung 6-209, Abbildung 6-210). Nicht verwunderlich ist, dass die Dichte und Viskosität kleiner sind als die entsprechend dem Datenblatt angerührten Suspensionen. Die Schwankungen in den Werten zu Beginn des Verpressvorgangs deuten auf Instabilitäten der Suspension hin. Aufgrund des erhöhten Wasseranteils ist auch eine heterogene Suspension zu erwarten. Der Einsatz eines Coriolis Massendurchflussmesser kann in der Praxis auf der Baustelle wichtige Dienste erweisen. Aufgrund der gleichzeitigen Aufzeichnung des Volumenstroms, Dichte und Viskosität können nicht sachgerechte Suspensionen automatisch ohne eine zusätzliche Messung erkannt werden. Beispielsweise könnte man eine angerührte Charge über einen Bypass zirkulieren lassen und die Kennwerte analysieren und prüfen, bevor man die Charge in den Untergrund verpressen würde. Damit könnte ohne großen Aufwand eine lückenlose Dokumentation erhalten und Gewährleistung der Hinterfüllparameter erreicht werden.

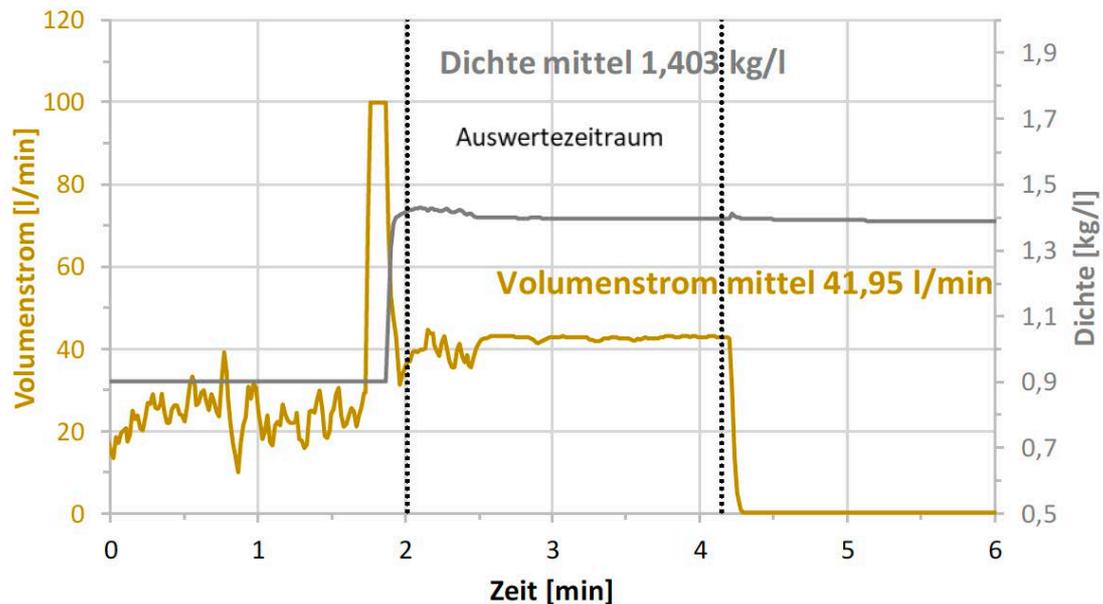


Abbildung 6-209: Volumenstrom und Dichte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom, gemessen am Massendurchflussmesser)

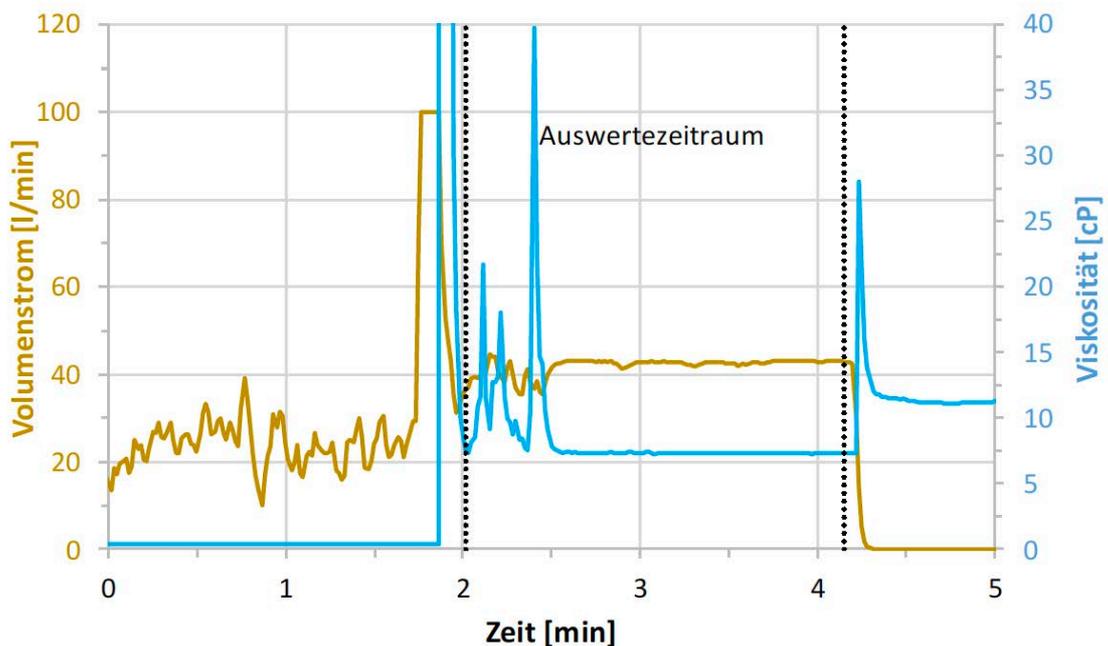


Abbildung 6-210: Volumenstrom und Viskosität des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom, gemessen am Massendurchflussmesser)

In der Tabelle 6-49 können die Versuchsbedingungen, wichtige gemessene und berechneten Parameter des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (siehe ~40 l/min, W/F erhöht) entnommen werden.

In den höhenspezifischen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitätsmessungen kann das erhöhte und nicht sachgerechte W/F Verhältnis während des Verpressvorgangs nicht offensichtlich erkannt werden, wenn man die Messschwelle von 2 für den CemTrakker Wert zugrunde legt (Abbildung 6-211).

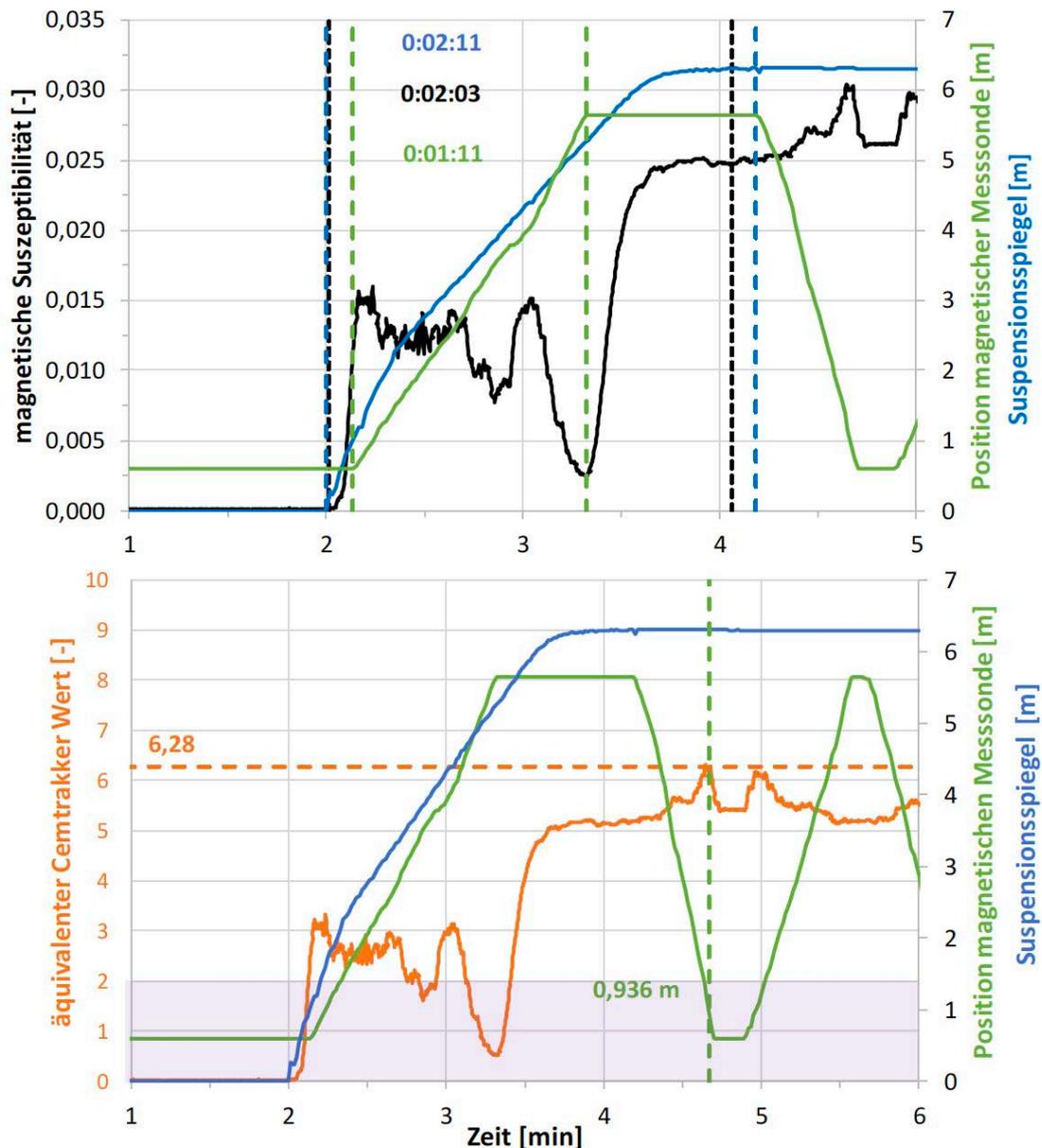


Abbildung 6-211: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und volumetrische magnetische Suszeptibilitäten (oben) sowie äquivalente CemTrakker-Werte (unten) des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom, Fokus Verpressphase)

Das Verhalten bei höheren W/F Verhältnissen ähnelt dem Versuch bei 40 l/min mit sachgerechter Wasseranteilen. Der Messring wurde etwas schneller als der sich entwickelnde Suspensionsspiegel.

spiegel hochgezogen. Dementsprechend fallen die Messwerte tendenziell während des Verpressvorgangs. Die Werte fallen dann auch unter den Schwellenwert für den CemTrakker von 2. Wenn man aber analog zu den vorherigen Versuchen mit dem Baustoff 15d den Zielwert mit 50% des Endwertes (Mittelwert) festlegt, müsste das Hochziehkriterium bei einem Wert $>2,73$ gewählt werden. Leider hat sich gezeigt, dass die Baustoffchargen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die verwendete Charge beim Versuch mit 40 l/min Volumenstrom kann deshalb nur bedingt mit den Versuchen bei 60 l/min Volumenstrom und bei erhöhtem W/F Verhältnis verglichen werden. Entsprechend des höheren Wassergehaltes zeigt der Versuch mit höheren W/F Verhältnis geringere volumetrische magnetische Suszeptibilitäten. Diese sind aber immer so hoch, dass man nicht offensichtlich ein nicht sachgerechtes W/F Verhältnis erkennen würde (siehe dazu Kapitel 6.7.1.4 Baustoff 15d, Vergleich der Versuche). Der Schwellenwert von 2, der in der Praxis den Suspensionsspiegel anzeigen soll, wird auch mit den erheblichen höheren Wassergehalten erreicht, d.h. der Baustoff 15d ist für den Schwellenwert von 2 insgesamt zu hoch dotiert. Nach Beenden des Verpressen wurden höhenorientierte volumetrische magnetische Suszeptibilitätsmessungen sowie CemTrakker Messungen (Peaks) durchgeführt (Abbildung 6-212: Darstellung der äquivalenten CemTrakker Werte, höhenspezifische volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten Abbildung 10-14 im Anhang). Die Basismesswerte in der Ruheposition nach dem Verpressen steigen kontinuierlich an und sind heterogener als bei den Versuchen mit sachgerechtem W/F Verhältnis.

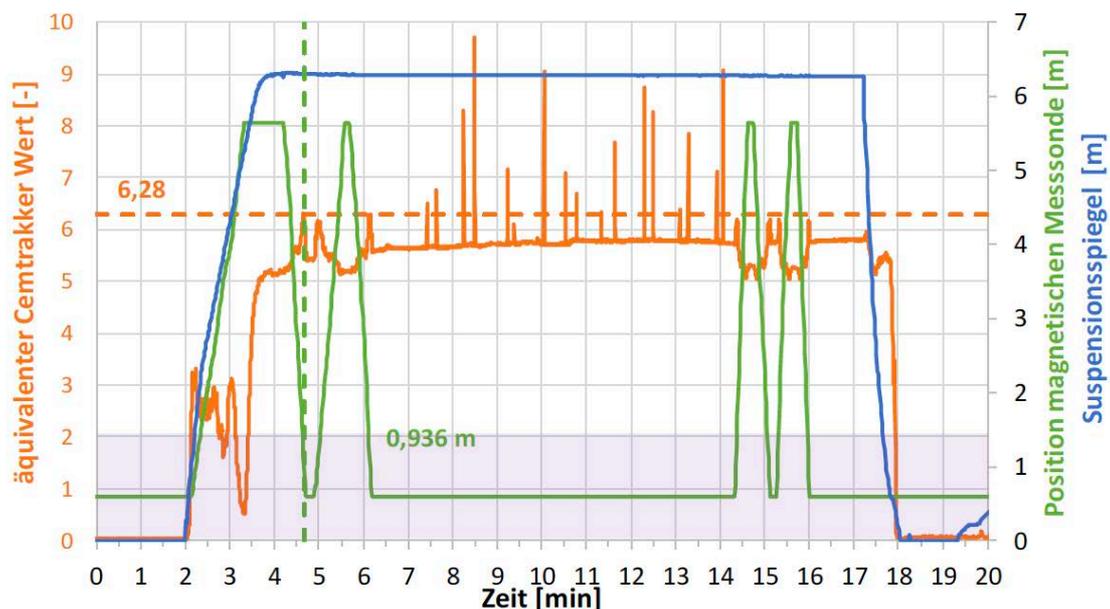


Abbildung 6-212: Lage des Suspensionsspiegels, Position der Messsonde und äquivalente CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom)

Die Suspensionssäule zeigt analog zu den anderen Versuchen höhenspezifische Magentitanreicherungen und –abreicherungen. Die Werte nehmen aber von oben nach unten stärker ab und sprechen für eine starke Entmischung (Abbildung 6-213, Abbildung 6-214, Abbildung 6-215, Ta-

belle 6-47). Wie bei den anderen Versuchen sind die Maxima aber nicht am niedrigsten Messpunkt und die Minima auch nicht am höchsten Messpunkt gemessen worden. Die Abreicherung nach unten ist aber in den höhenspezifischen CemTrakker-Werten und den volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten stärker ausgeprägt.

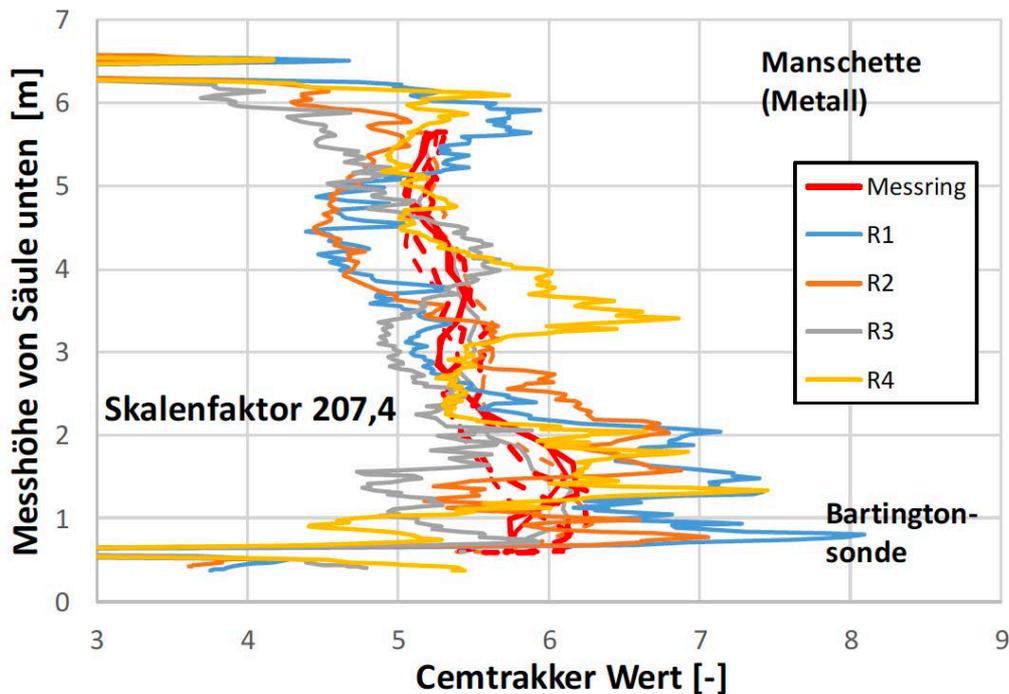


Abbildung 6-213: Umgerechnete volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Baustoffs 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom)

Insgesamt ist der Unterschied in den maximalen und minimalen äquivalenten CemTrakker-Werten insgesamt mit ~1,13 am größten im Vergleich zu den anderen Versuchen. Die Messwerte korrelieren mit dem extrem hohen Absetzmaß nach einer Stunde von 28. In den Versuchen ergibt sich somit eine Korrelation zwischen dem Absetzmaß und dem Delta aus minimalen und maximalen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten. Im Falle des Baustoffes 15d können somit magnetische Suszeptibilitätsmessungen hilfreich sein, um Sedimentationsverhalten in der Suspension beurteilen zu können.

Die Gradientenanalyse zeigt, dass bei nicht sachgerechtem W/F Verhältnis ein erhebliches Abfallen der Werte über die Zeit stattfindet, d.h. selbst an der Ruheposition bei 0,593 m findet bei statischer Säule ein weiteres Absetzen über die Zeit statt. Diese hoher Wert ist damit ein deutliches Zeichen für ein nicht tolerierbares Absetzen (Tabelle 6-48).

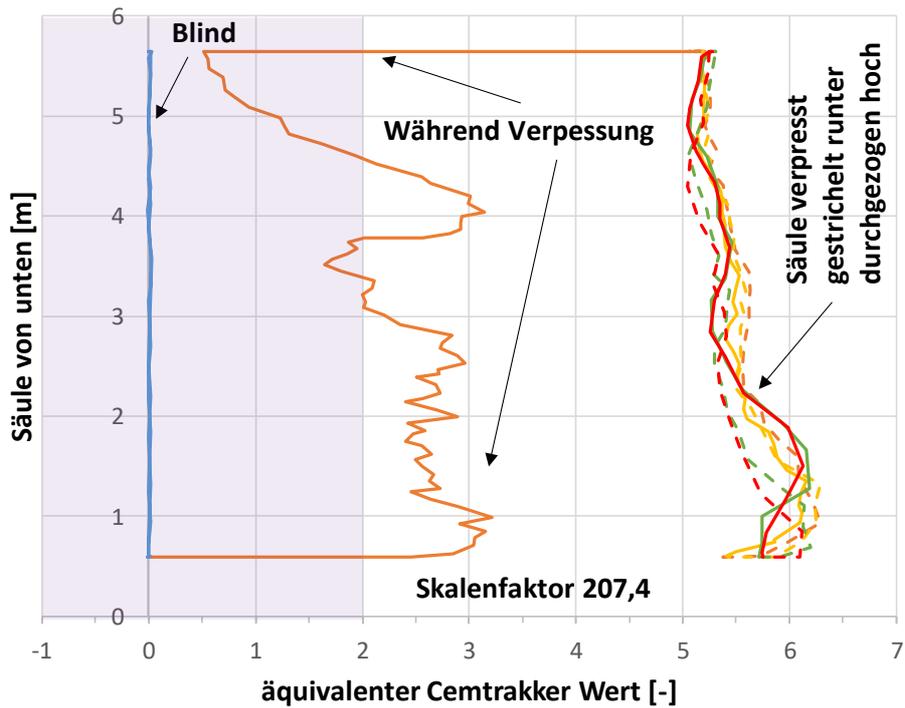


Abbildung 6-214: Höenspezifische äquivalente CemTrakker-Werte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom)

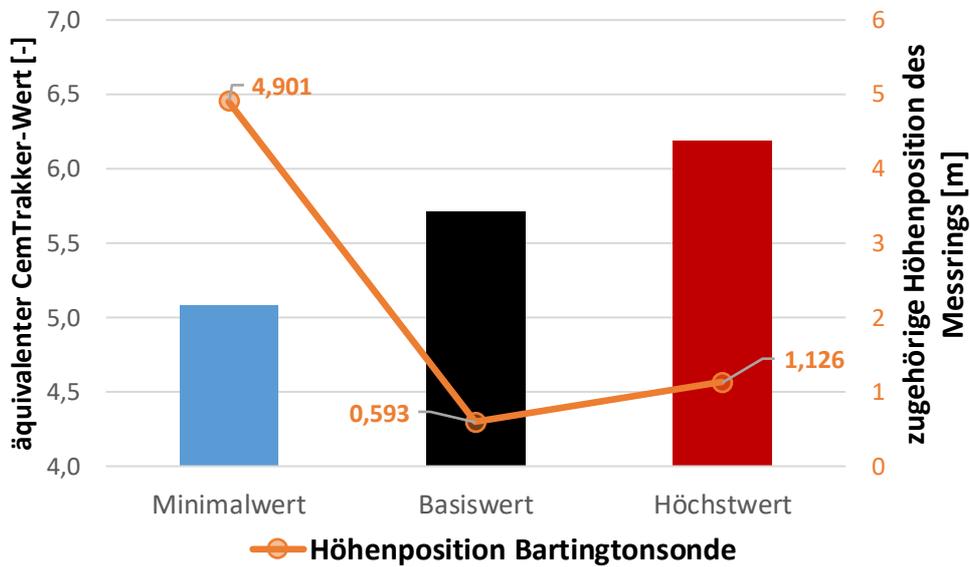


Abbildung 6-215: Äquivalente CemTrakker-Werte mit zugehörigen Messhöhen des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom)

Tabelle 6-47: Maxima und Minima der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und umgerechneten CemTrakker Äquivalenten des Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom)

	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. H_{Bart} [m]	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. H_{Bart} [m]	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}
Verpressph. und runter 1	0,0304*	6,3110*	1,1390*	0,0000#	0,0062#	0,5930#	0,0304#	6,3049#
hoch 2	0,0298	6,1832	1,0272	0,0248	5,1373	4,9779	0,0050	1,0458
runter 2	0,0304	6,2952	1,1205	0,0248	5,1484	5,2139	0,0055	1,1468
hoch 3	0,0298	6,1892	1,6580	0,0244	5,0546	5,1605	0,0055	1,1346
runter 3	0,0299	6,1959	0,5930	0,0243	5,0404	4,3461	0,0056	1,1556
hoch 4	0,0298	6,1866	1,5068	0,0243	5,0420	5,0828	0,0054	1,1446
runter 4	0,0297	6,1684	0,8536	0,0243	5,0387	4,6218	0,0055	1,1297
Mittelwert	0,0300	6,2185	1,1283	0,0245	5,0769	4,9005	0,0054	1,1262

*runterfahren Zyklus 1

#während Verpressphase, Beginn unterhalb Suspensionsspiegel

Tabelle 6-48: Trend aus der Gradientenanalyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom, statische Säule)

	$\Delta X/\text{min}$	$\Delta X/\text{h}$	$\Delta X/2\text{h}$	$\Delta X/\text{d}$
Trend X_{Bart}	0,0001	0,0062	0,0124	0,1485
Trend X_{cem}	0,0214	1,2834	2,5668	30,8018

Insgesamt hat der Baustoff 15d mit dem gewählten nicht sachgerechten W/F Verhältnis von 1,2 ein extrem hohes Absetzmaß, das mit einem deutlichen Magnetitabsetzen korreliert. Da die Baustoffcharge aber relativ hoch dotiert ist, kann mit dem in der Praxis verwendeten CemTrakker-Schwellenwert von 2 der deutlich zu hoch gewählte Wasseranteil nicht offensichtlich erkannt werden. Dies wäre nur möglich, wenn für den Baustoff individuelle spezifische Schwellenmesswerte vorab bestimmt worden wären.

6.7.1.4. Baustoff 15d, Vergleich der Versuche

Im Folgenden werden nochmals die Versuche für den Baustoff 15d miteinander verglichen. In der Abbildung 6-216 und Abbildung 6-217 sind die Verläufe der gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten dargestellt. Bis auf die Höhe der magnetischen Messwerte ergeben sich keine signifikanten Unterschiede bei den Versuchen mit 40 und 60 l/min Volumenstrom. Beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis ergeben sich, entsprechend der Verdünnung, geringere magnetische Messwerte als in der vergleichbaren Charge des Versuchs mit 60 l/min Volumenstrom. Zudem werden magnetische Signale beim Versuch mit höheren W/F Verhältnis nach Starten des Verpressvorgangs in einer gewissen Zeitverzögerung gemessen (siehe Abbildung 6-217 zum Zeitpunkt 2 Minuten). Dies spiegelt auch den inkonstanten Volumenstrom und Viskositätsverlauf zum Beginn des Hinterfüllvorgangs wider (siehe Abbildung 6-210).

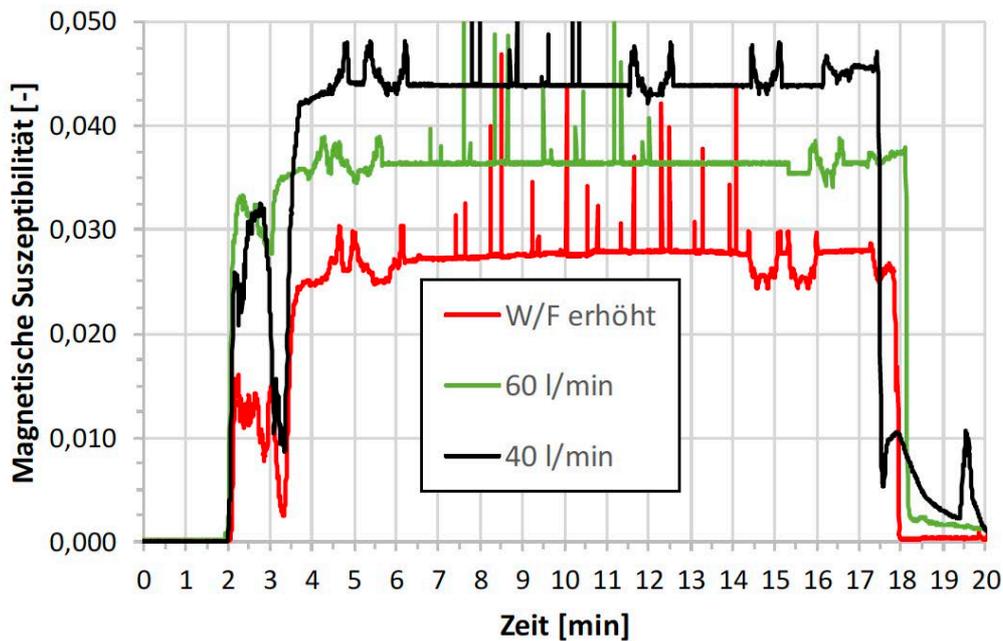


Abbildung 6-216: Verlauf der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d im Vergleich

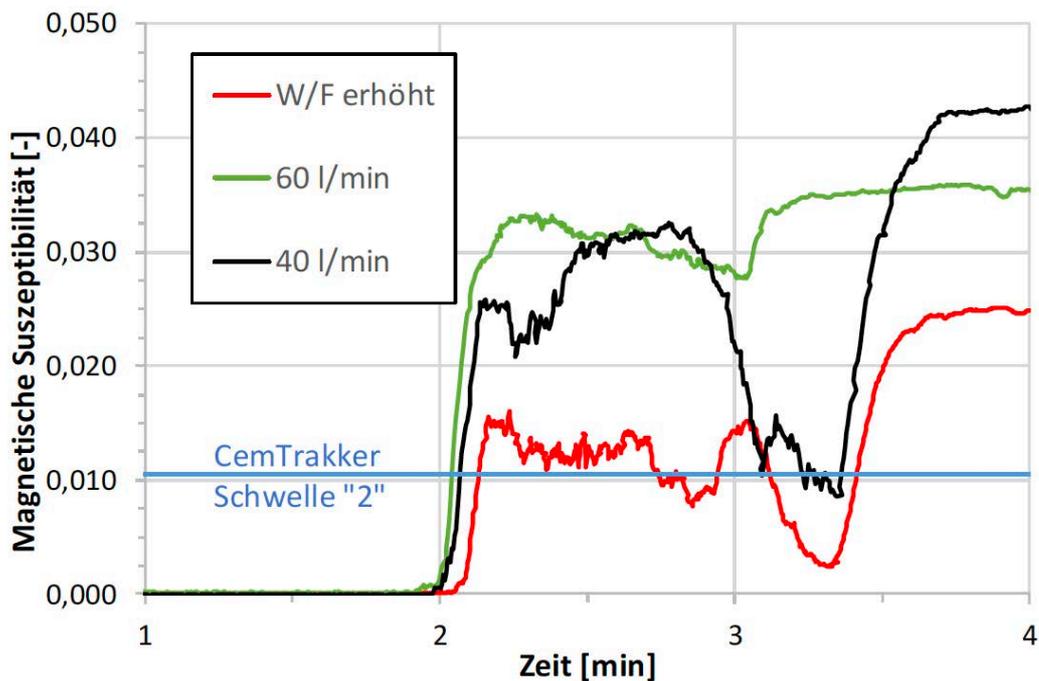


Abbildung 6-217: Verlauf der volumetrische magnetische Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d im Vergleich, Fokus Verpressphase

Die dazugehörigen wesentlichen Parameter und Daten für die Versuche mit dem Baustoff 15d können der Tabelle 6-49 entnommen werden.

Tabelle 6-49: Vergleich von gemessenen und berechneten Parametern der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d

Bezeichnung	Einheit	~40 l/min „normal“	~60 l/min „schnell“	~ 40 l/min, W/F erhöht
Baustoff		02 d	02 d	02 d
Dauer Verpressen	min:sec	02:18	01:48	02:11
Eintritt Bart. - Signal bei Säulenaustritt	min:sec	02:04	01:27	02:03
Dauer Verpressen in Säule (EWS)	min:sec	01:50	01:15	01:51
Dauer Hochfahren Sonde	min:sec	01:14	00:58	01:11
Differenz (Säule - Hochfahren)	min:sec	00:36	00:17	00:40
ρ_{Waage} (Dichtewaage)	g/cm ³	1,560	1,550	1,405
ρ_{Vorgabe} (Datenblatt)	g/cm ³	1,550	1,550	1,550
ρ_{Druck} (P_{mess} (statisch und Höhe))	g/cm ³	1,564	1,530	1,399
ρ_{Coriolis}	g/cm ³	1,548	1,528	1,403
Differenz ($\rho_{\text{W}} - \rho_{\text{C}}$)	g/cm ³	0,012	0,022	0,002
Differenz ($\rho_{\text{W}} - \rho_{\text{D}}$)	g/cm ³	-0,004	0,020	0,006
Differenz ($\rho_{\text{W}} - \rho_{\text{V}}$)	g/cm ³	0,010	0,000	-0,145
P (ρ_{W} + bekannte Höhe)	bar	0,966	0,960	0,870
P_{C} (ρ_{C})	bar	0,959	0,947	0,850
P_{mess}	bar	0,968	0,948	0,867
Differenz (P - P_{C})	bar	0,007	0,013	0,020
Differenz (P - P_{mess})	bar	-0,002	0,012	0,004
H_{Ablauf} (Höhe)	m	6,313	6,313	6,313
H_{Waage} (ρ_{W})	m	6,327	6,233	6,287
H_{Druck} (ρ_{C})	m	6,375	6,321	6,298
Differenz ($H_{\text{A}} - H_{\text{W}}$)	m	-0,014	0,080	0,026
Differenz ($H_{\text{A}} - H_{\text{D}}$)	m	-0,062	-0,008	0,015
mittlerer Volumenstrom	l/min	42,224	61,606	41,947
mittlere Viskosität	cP	22,960	17,194	8,445
mittlere Verpressgeschwindigkeit	m/min	3,444	5,025	3,421
Dauer Verpressen virtuelle 100 m Sonde	min:ss	29:02	19:54	29:14
Chargenbezeichnung	-	KW33/2019	KW38/2019	KW38/2019
Absetzmaß nach 1h	%	4	2	28
Absetzmaß nach 24h	%	4	2	36
Suspensionstemperatur	°C	16	15	15
Wasser/Feststoff Verhältnis	-	0,8	0,8	1,2
Auslaufzeit (Marsh-Trichter)				
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 1	min:sec,ss	41,96	00:44:13	00:32:40
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 2	min:sec,ss	01:07,5	-	-
Restlaufzeit, Messung 1	min:sec,ss	43,72	00:37:22	00:00:23
Restlaufzeit, Messung 2	min:sec,ss	01:24,2	-	-

Die Gegenüberstellung mit dem Fokus auf die Verpressphase zeigt, dass keine wesentlichen Unterschiede bei einer Suspensionsspiegelerkennung erkannt werden können (Abbildung 6-218). Der Messring wurde vermeidlich an einem visuell erkennbaren Suspensionsspiegel nach oben gezogen. Der diffuse Übergangsbereich ließ aber keine eindeutige Zuordnung eines solchen Spiegels zu erkennen. Nur beim Versuch mit erhöhten Volumenstrom (60 l/min) wurde der Messring unterhalb des eigentlichen Suspensionsspiegels geführt, bei den anderen Versuchen mit 40 l/min Volumenstrom und erhöhtem W/F Verhältnis wurde der Messring schneller hochgezogen als der sich entwickelnde Suspensionsspiegel. Der Charakter der Kurven unterscheiden sich aber nicht, d. h. die Messsignale sind abhängig von Abstand des Messringes zum Suspensionsspiegel. Deshalb kann abschließend festgehalten werden, dass der höher gewählte Volumenstrom sowie das hohe nicht sachgerechte W/F Verhältnis sich beim Erkennen eines Suspensionsspiegels beim Baustoff 15d nicht signifikant auswirken. Die Baustoffchargen zeigen relevante Unterscheide in den magnetischen Messwerten, d. h. eigentlich können deshalb nur die beiden Versuche mit dem erhöhten Volumenstrom und dem höheren W/F Verhältnis in Bezug auf die magnetischen Messwerte miteinander im Detail verglichen werden. Der Baustoff ergibt in den zwei verschiedenen Baustoffchargen unterschiedlich hohe Messwerte, wobei auch die Baustoffcharge, die in den Versuchen mit 60 l/min und hohen W/F Verhältnis verwendet wurde, so hohe Messwerte liefert, dass der CemTrakker Schwellenwert von 2 selbst bei nicht sachgerechtem W/F Verhältnis zu niedrig angesetzt wäre. In der Praxis bedeutet das, dass trotz eines nicht sachgerechtem W/F Verhältnis der Schwellenwert eine vollständige Suspensionssäule angenommen würde, obwohl die CemTrakker Messsonde immer oberhalb des Suspensionsspiegels nach oben gezogen worden wäre.

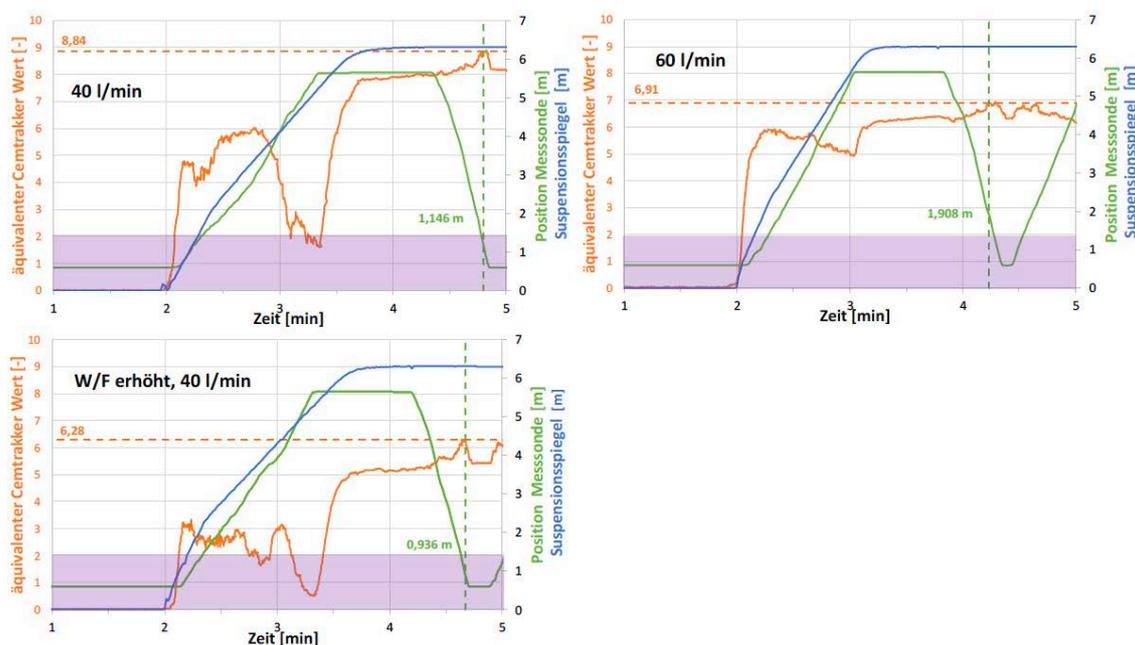


Abbildung 6-218: Verlauf der äquivalenten CemTrakker-Werte der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d im Vergleich, Fokus Verpressphase

Die höhenspezifischen CemTrakker-Werte und Äquivalente sind für die Versuche bei 40 und 60 l/min sehr ähnlich in ihrer Ausprägung, wohingegen der Versuch mit hohem W/F Verhältnis ein deutlich stärkeres Magnetitabsetzen zeigt (Abbildung 6-219).

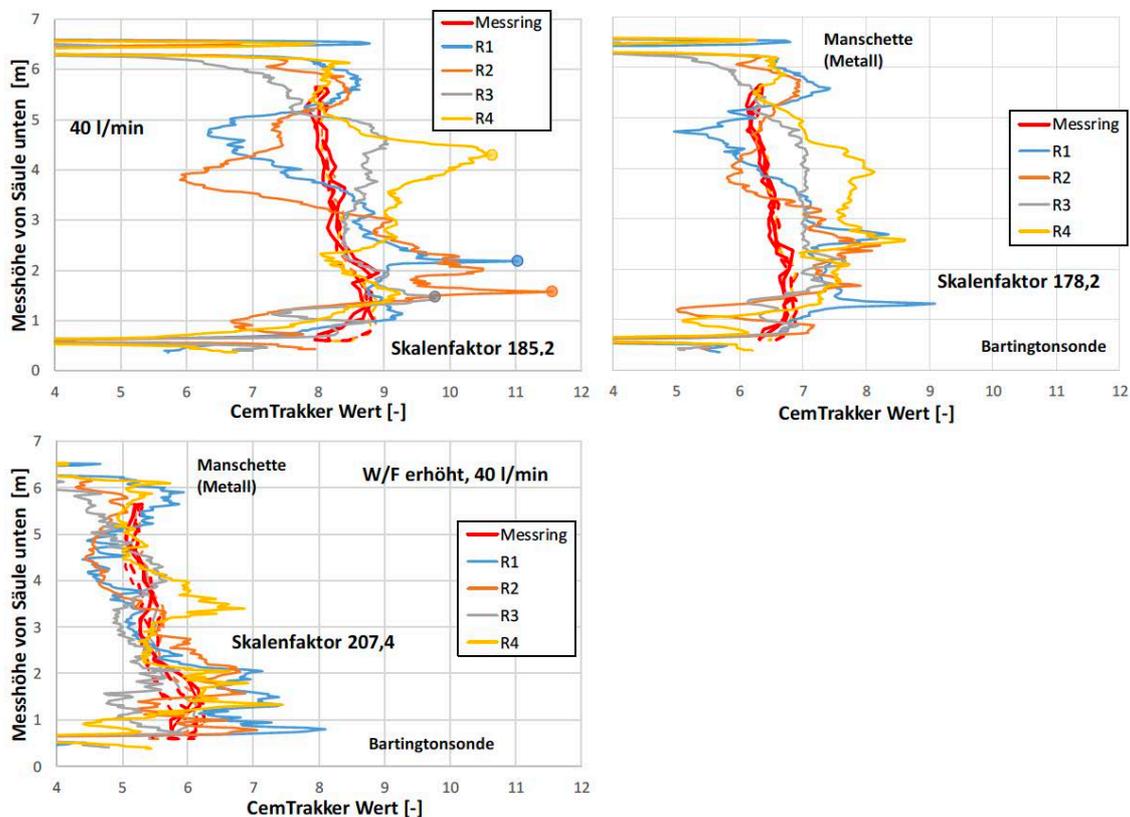


Abbildung 6-219: Umgerechnete höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Baustoffs 15d im Vergleich

Im Detail betrachtet ergibt sich aber für den Versuch bei 40 l/min, entsprechend seinem höheren Absetzmaß, ein stärkeres Absetzverhalten als beim Versuch mit 60 l/min (Abbildung 6-220). Insgesamt korrelieren die Absetzmaßwerte mit den berechneten Werten aus den Gradientenanalyse und der Differenz zwischen Hoch- und Minimalwerten. Damit wäre bei bekannten magnetischen Messwerten eine Qualitätsprüfung möglich und es könnten Indizien für ein hohes Absetzen anhand solcher Messwerte abgeleitet werden.

Problematisch, wie schon mehrmals erwähnt, sind die Baustoffchargenunterschiede in Hinblick auf die Höhe der magnetischen Messungen (Abbildung 6-221). Die Mittelwerte der magnetischen Messwerte bei den Versuchen sollten eigentlich nahezu übereinstimmen. Diese Tatsache macht eine Baustellenprüfung im Falle des Baustoffes sinnvoll, wenn man mit einer Füllstandkontrolle mehr Aussagen treffen möchte als dass der Baustoff da ist oder nicht.

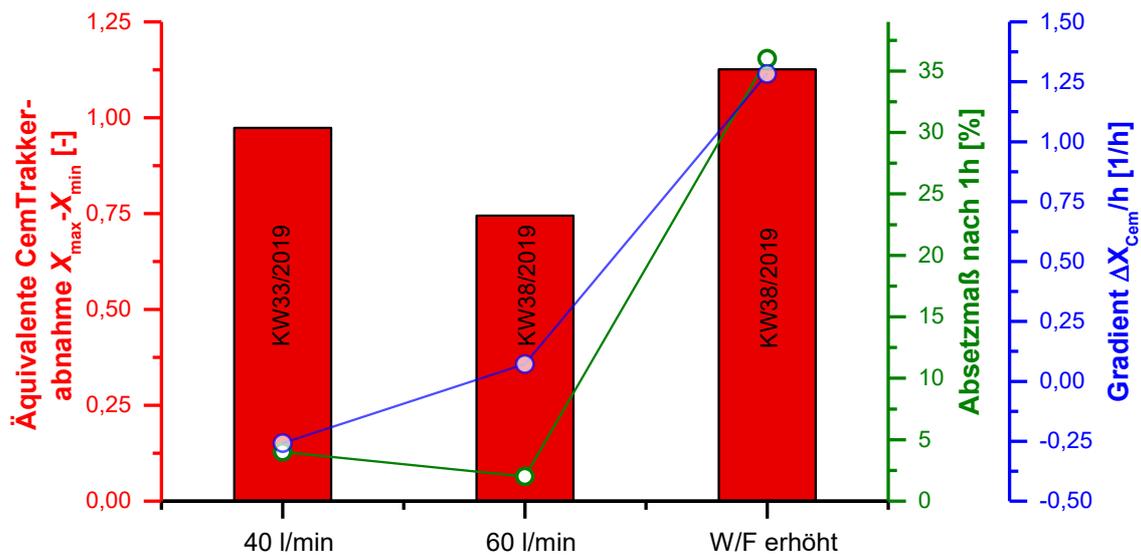


Abbildung 6-220: Gegenüberstellung der Differenz in den äquivalenten CemTrakker-Werten, den Absetzmaßen und der Werten aus der Gradientenanalyse der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d im Vergleich

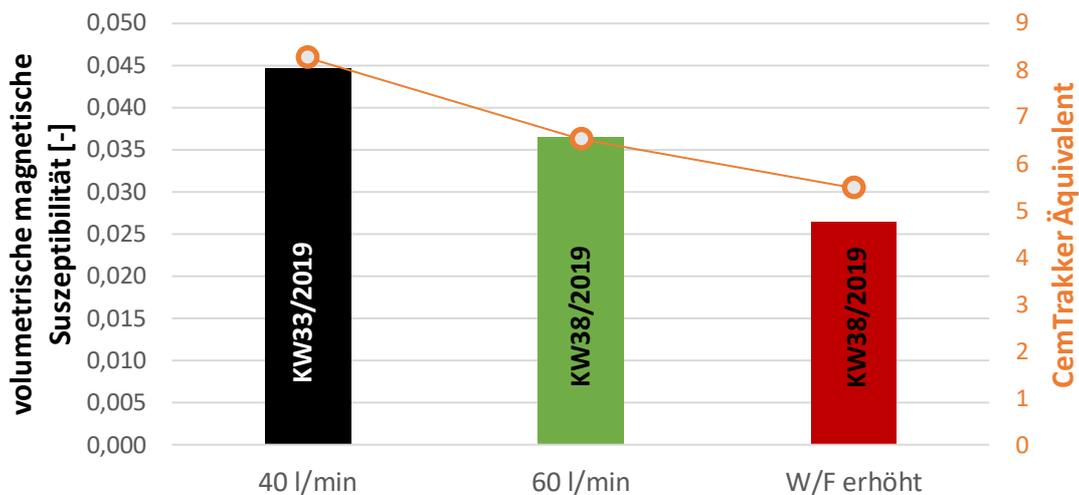


Abbildung 6-221: Mittlere volumetrische magnetische Suszeptibilitäten und dazugehörige CemTrakker Äquivalente der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 15d im Vergleich

Mit den gemessenen Suspensionsdichtewerten, der Dichte von Wasser und den angesetzten W/F Verhältnissen kann eine Korrelation zwischen Dichte und den Wasseranteilen für die Baustoffcharge KW38/2019 erstellt werden (Abbildung 6-222). Mit der Gegenüberstellung kann ausgesagt werden, dass die Baustoffmischung in richtigem Verhältnis angemischt wurde. Die Beziehung kann auch dazu genutzt werden, Werte für die Dichte bzw. W/F Verhältnis zu berechnen. In der Praxis können dann z. B. gemessene Dichtewerte in W/F Verhältnisse umgerechnet werden oder umgekehrt.

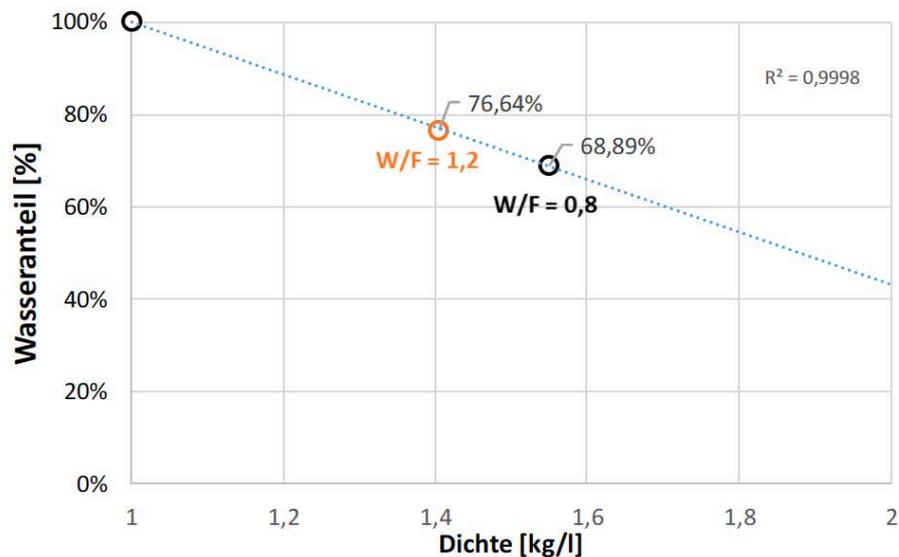


Abbildung 6-222: Korrelation zwischen den gemessenen Dichtewerten und W/F Verhältnissen für die Baustoffcharge KW38/2019 (15d)

Eine ähnliche Korrelation kann durchgeführt werden, um die magnetischen Messwerte überprüfen, bewerten und nutzen zu können (Abbildung 6-223). Dazu werden die äquivalenten CemTrakker-Werte unter Berücksichtigung der W/F Verhältnisse gegenüber dem Magnetitgehalt im Wasser + Feststoff Gemisch bzw. gegenüber dem Magnetitgehalt im Feststoff aufgetragen. Wenn der Magnetitanteil im Feststoff bekannt ist, können dann definierte Zielwerte für den CemTrakker und die dazu benötigten Magnetitanteile berechnet werden. In der Abbildung 6-223 wurde davon ausgegangen, dass der Magnetitgehalt im Feststoff 5% beträgt. Möchte man unter dieser Annahme den CemTrakker Zielwert auf einen Wert von 4 reduzieren, müsste man einen Magnetitanteil im Feststoff von ~3,04% wählen.

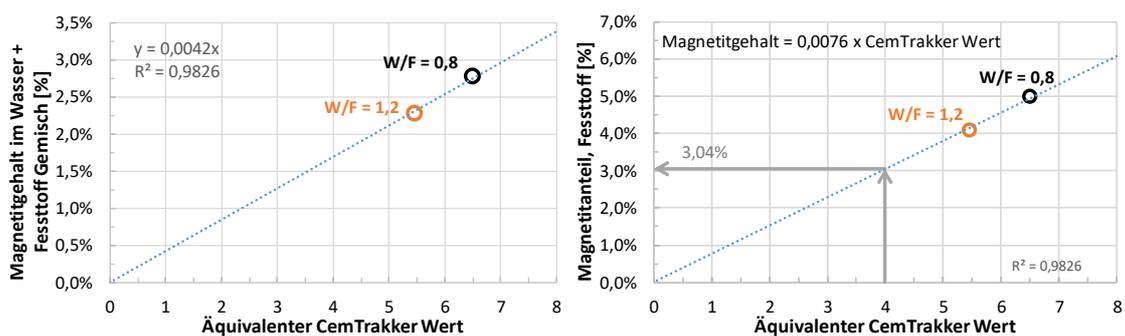


Abbildung 6-223: Korrelation der äquivalenten CemTrakker Werte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen W/F Verhältnisse für den Baustoff 15d (Annahme 5% Magnetit)

Zu betonen gilt, dass der Wert für R^2 ist für alle angenommenen fiktiven Magnetitgehalte sich nicht ändert. Die lineare Regression schneidet den Nullpunkt, die äquivalenten CemTrakker-Werte sind fixe Messwerte. Die Zuordnung zu den Magnetitgehalten erfolgt über die angesetzten W/F Verhältnisse. Demnach ändert sich bei anderen angenommenen Magnetitgehalten nur die Steigung.

Die Auswertung zeigt, dass man wohl für den Baustoff 15d annehmen kann, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Magnetitanteil und gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten vorhanden ist. Diese Beziehung kann dem Hersteller helfen, gezielt die Dotierung seines Baustoffes zu optimieren. Voraussetzung wäre dabei aber, dass der verwendete Magnetit die gleichen Eigenschaften aufweist als der verwendete Magnetit in der Charge KW38/2019 (gleiche magnetische Suszeptibilitäten, Körnung, etc.). Denn die Unterschiede in den gemessenen magnetischen Messwerten in den Baustoffchargen KW33/2019 und KW38/2019 können durchaus durch unterschiedliche Eigenschaften (Heterogenitäten, Suszeptibilitäten, Partikelgrößen, etc.) des zugeschlagenen Magnetits hervorgerufen werden.

Der Versuch mit Baustoff 15d mit erhöhtem W/F Verhältnis macht deutlich, dass der Schwellenwert von 2 für den CemTrakker-Wert sehr problematisch ist. Im Falle des Baustoffes 15d wäre aufgrund der Chargenunterschiede sogar eine Messung jeder individuellen Baustoffcharge angebracht. Die magnetischen Messungen nach dem Verpressvorgang könnten bei genauen Kenntnis der spezifischen Werte als Indiz für die Verwendung sachgerechte W/F Verhältnisse herangezogen werden. Die Dotierung des Baustoff 15d ist sehr hoch angesetzt. Die Untersuchungen zeigen, dass auch geringere Dotierungen ausreichend wären, um Füllstandskontrollen mit dem derzeit gängigen CemTrakker Verfahren durchzuführen. Man sollte generell möglichst geringe Dotierungen anstreben, um zu vermeiden, dass hochwertiger Zuschlagstoffe in nicht notwendigen Mengen eingesetzt werden (Ressourcen schonender, nachhaltiger, etc.).

6.7.2. Baustoff 02d

Im Folgenden werden die Versuche mit dem Baustoff 02d direkt verglichen und auf eine umfangreiche Beschreibung jedes einzelnen Versuches verzichtet. Die gewählten Verpressbedingungen spiegeln sich in dem Verlauf der sich entwickelten Volumenströme und Viskositäten wider (Abbildung 6-224).

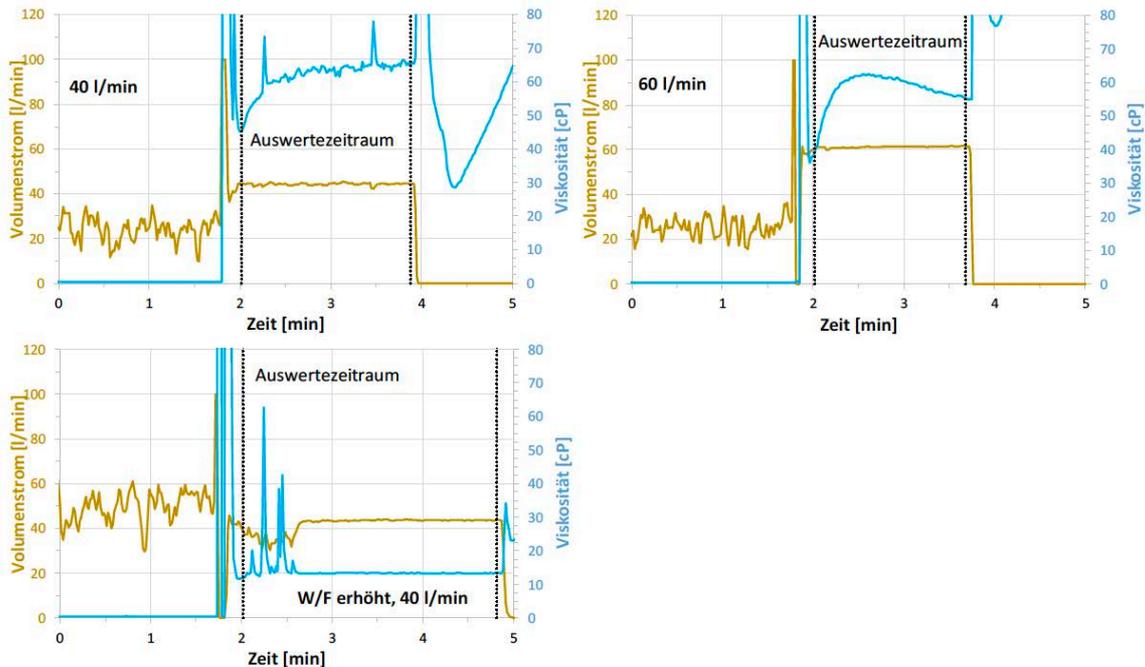


Abbildung 6-224: Volumenstrom und Viskosität des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 02d im Vergleich, Fokus Verpressphase

Es können ähnliche Erklärungsmuster herangezogen wie bei den Versuchen mit dem Baustoff 15d. Die Viskositäten steigen bei einem Volumenstrom von 40 l/min über die Zeit an, zeigen dabei leichte Schwankungen und besitzen im Mittel den höchsten Wert im Vergleich zu den anderen Versuchen. Der erhöhte Volumenstrom von 60 l/min scheint dazu führen, dass der Baustoff 02 etwas besser aufgeschlossen bleibt und liefert deshalb weniger schwankende Werte. Auffällig ist, dass die Viskosität bei konstantem und erhöhtem Volumenstrom sich ebenso über einen größeren Wertebereich erstreckt. Die Viskositäten fallen nach anfangs steigenden Werten mit der Zeit ab. Erhöhte Volumenströme führen auch beim Baustoff 02 zu konstanteren Verpressbedingungen und können somit eher positiv bewertet werden. Die Schwankungen in den Werten zu Beginn des Verpressvorgangs beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis deuten auf Instabilitäten der Suspension hin. Die sehr geringen Viskositätswerte können als eindeutiges Indiz für das nicht sachgerechte W/F Verhältnis von 1,1 herangezogen werden. Die Messwerte aus den drei Versuchen mit dem Baustoff 02d zeigen analog zum Baustoff 15d, dass der Einsatz eines Coriolis Massendurchflussmesser bei realen Erdwärmesondenhinterfüllungen mit Hilfe einer kontinuierlichen und zeitgleichen Aufzeichnung der Volumenströme, Dichte und Viskosität sehr einfach die Verfüllqualität gesteuert, bewertet und überprüft werden könnte.

Die dazugehörigen wesentlichen Parameter und Daten für die Versuche mit dem Baustoff 02d können der Tabelle 6-50 entnommen werden.

Tabelle 6-50: Vergleich von gemessenen und berechneten Parametern der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 02d

Bezeichnung	Einheit	~40 l/min „normal“	~60 l/min „schnell“	~ 40 l/min, W/F erhöht
Baustoff		02 d	02 d	02 d
Dauer Verpressen	min:sec	01:57	01:43	02:52
Eintritt Bart. - Signal bei Säulenaustritt	min:sec	01:47	01:27	01:59
Dauer Verpressen in Säule (EWS)	min:sec	01:45	01:16	01:51
Dauer Hochfahren Sonde	min:sec	01:11	01:07	01:11
Differenz (Säule - Hochfahren)	min:sec	00:34	00:09	00:40
ρ_{Waage} (Dichtewaage)	g/cm ³	1,620	1,625	1,430
ρ_{Vorgabe} (Datenblatt)	g/cm ³	1,590	1,590	1,590
ρ_{Druck} (P_{mess} (statisch und Höhe))	g/cm ³	1,613	1,628	1,474
ρ_{Coriolis}	g/cm ³	1,605	1,593	1,436
Differenz (ρ_{W} - ρ_{C})	g/cm ³	0,015	0,032	-0,006
Differenz (ρ_{W} - ρ_{D})	g/cm ³	0,007	-0,003	-0,044
Differenz (ρ_{W} - ρ_{V})	g/cm ³	0,030	0,035	-0,160
P (ρ_{W} + bekannte Höhe)	bar	1,003	1,006	0,886
P_{C} (ρ_{C})	bar	0,973	0,965	0,870
P_{mess}	bar	0,999	0,987	0,894
Differenz (P - P_{C})	bar	0,031	0,041	0,015
Differenz (P - P_{mess})	bar	0,005	0,019	-0,008
H_{Ablauf} (Höhe)	m	6,313	6,313	6,313
H_{Waage} (ρ_{W})	m	6,284	6,192	6,371
H_{Druck} (ρ_{C})	m	6,344	6,318	6,346
Differenz (H_{A} - H_{W})	m	0,029	0,121	-0,058
Differenz (H_{A} - H_{D})	m	-0,031	-0,005	-0,033
mittlerer Volumenstrom	l/min	44,333	61,243	41,766
mittlere Viskosität	cP	62,242	58,132	14,268
mittlere Verpressgeschwindigkeit	m/min	3,616	4,995	3,407
Dauer Verpressen virtuelle 100 m Sonde	min:ss	27:39	20:01	29:21
Chargenbezeichnung	-	12.06.2019	20.05.2019	09.08.2019
Absetzmaß nach 1h	%			2,4
Absetzmaß nach 24h	%	<1	0	6
Suspensionstemperatur	°C	16,6	16,2	13,6
Wasser/Feststoff Verhältnis	-	0,7	0,7	1,1
Auslaufzeit (Marsh-Trichter)				
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 1	min:sec:ss	00:49:51	01:00:32	00:32:41
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-
Restlaufzeit, Messung 1	min:sec:ss	01:44:44	04:23:41	00:55:13
Restlaufzeit, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-

Im Anhang können zu den jeweiligen Versuche die Verläufe der Dichte und Temperaturen entnommen werden (Abbildung 10-15 und Abbildung 10-16 im Anhang).

In der Abbildung 6-225 und Abbildung 6-226 sind die Verläufe der gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten dargestellt. Bis auf die Höhe der magnetischen Messwerte ergeben sich keine signifikanten Unterschiede bei den Versuchen mit 40 und 60 l/min Volumenstrom. Beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis ergeben sich entsprechend der Verdünnung geringere magnetische Messwerte.

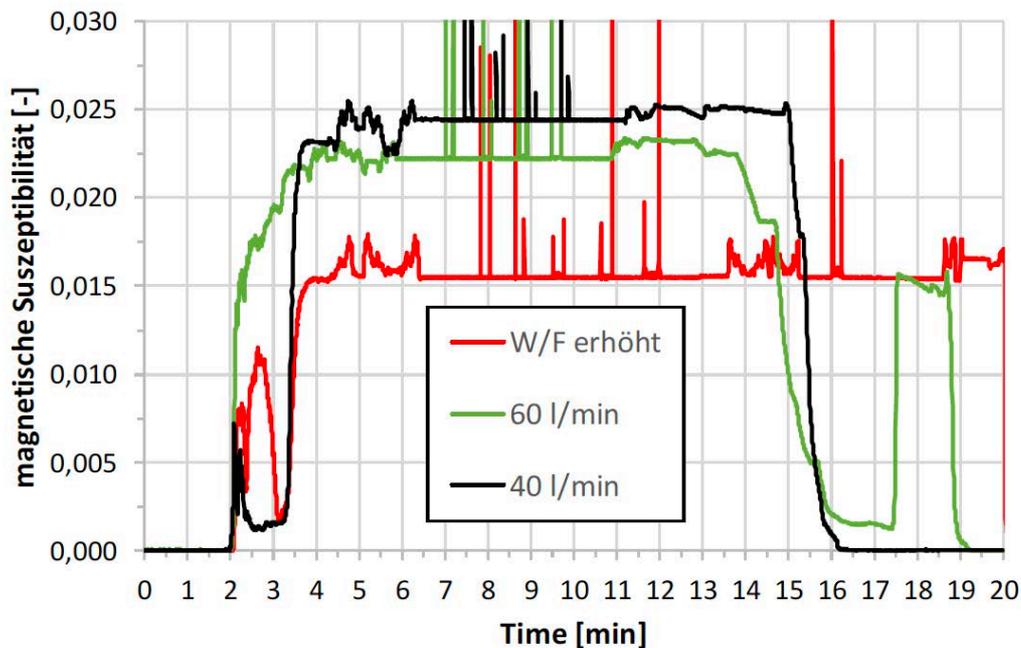


Abbildung 6-225: Verlauf der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 02d im Vergleich

Der Verlauf der Messwerte während der Verpressphase ist wiederum abhängig davon, ob der Messring unter- oder oberhalb des sich entwickelnden Suspensionsspiegel nach oben geführt wurde (Abbildung 6-227). Beim Versuch mit 40 l/min lag der Messring durchgehend oberhalb und beim Versuch mit 60 l/min immer unterhalb des Spiegels. Mit erhöhtem W/F Verhältnis wurde der Messring anfangs unterhalb und gegen Ende oberhalb des Spiegels geführt. Es kann demnach nicht abgeleitet werden, dass höhere W/F Verhältnisse und Volumenströme sich negativ auf das Erkennen eines Suspensionsspiegels auswirken. Wenn man die CemTrakker Schwelle von 2 bei 50% der mittleren volumetrischen CemTrakker Äquivalente festlegt, dann ist die Schwelle für den Baustoff 02d bei sachgerechter Anmischung richtig gewählt (Abbildung 6-228, Mittelwert $\sim 4,1$ für 40 und 60 l/min). Der Unterschied in den Messwerten in CemTrakker Äquivalente ist für den Baustoff $\sim 0,2$ bei einem höheren W/F Verhältnis $\sim 0,7$. Der Unterschied ist bei weitem nicht so relevant wie beim Baustoff 15d. Doch auch hier können Chargenunterschiede nicht ausgeschlossen werden.

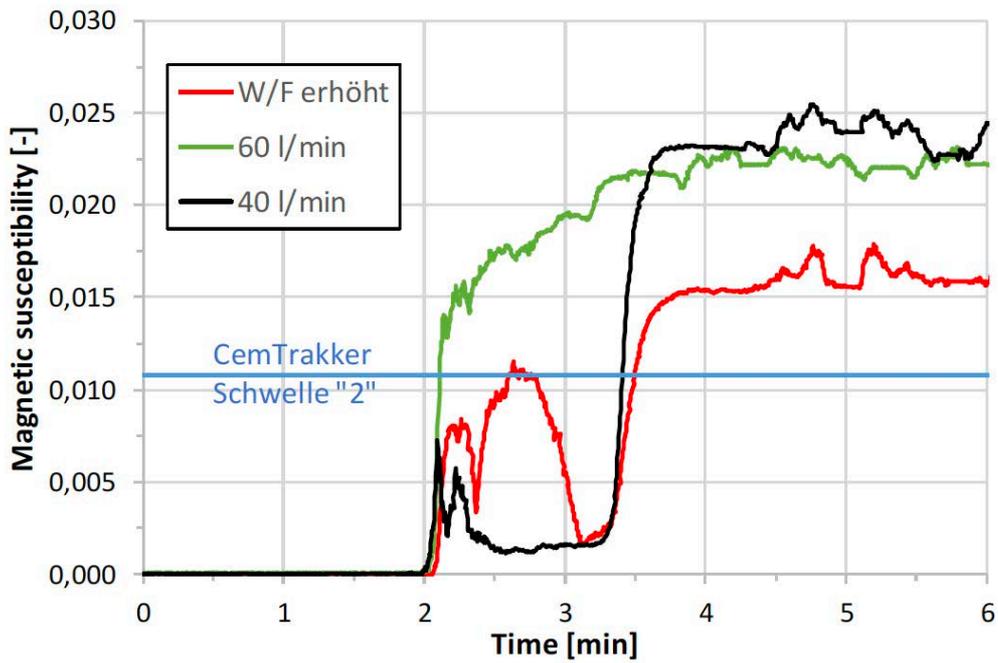


Abbildung 6-226: Verlauf der volumetrische magnetische Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 02d im Vergleich, Fokus Verpressphase

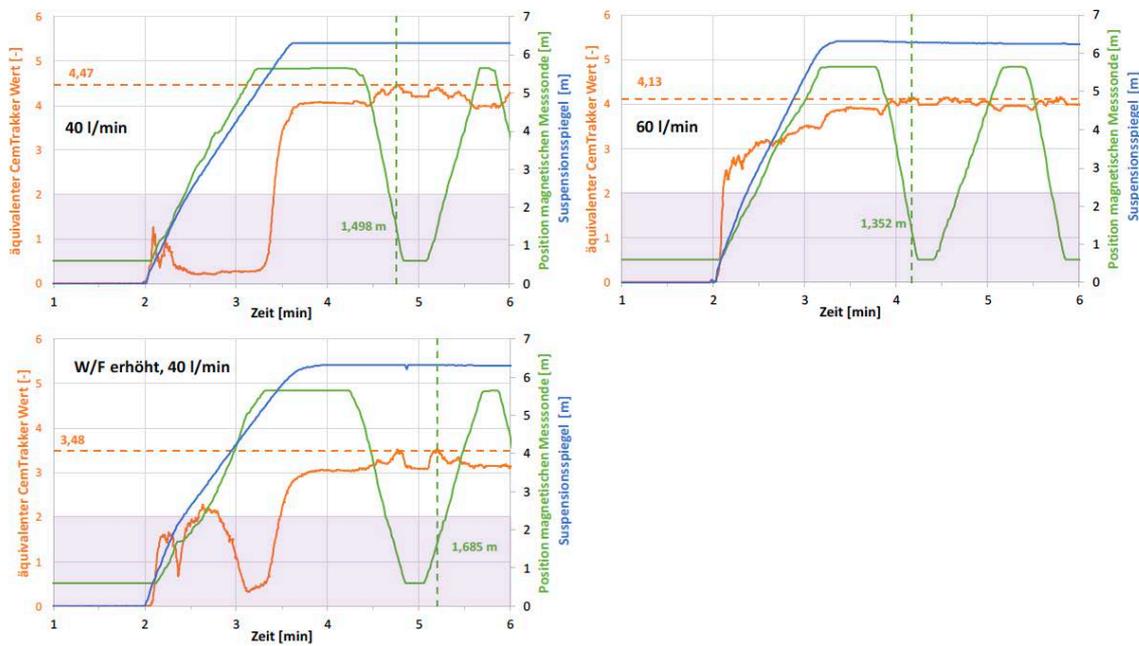


Abbildung 6-227: Verlauf der äquivalenten CemTrakker-Werte der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 02d im Vergleich, Fokus Verpressphase

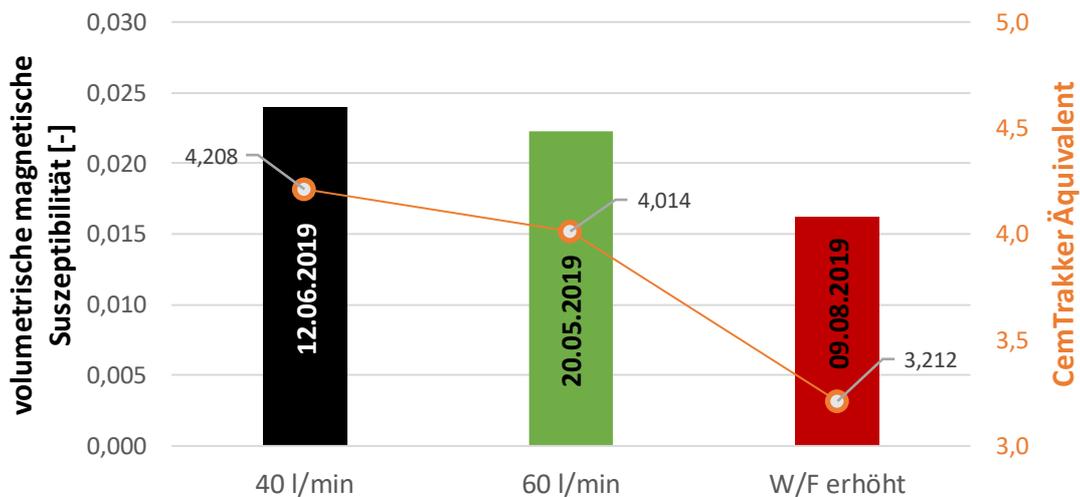


Abbildung 6-228: Mittlere volumetrische magnetische Suszeptibilitäten und dazugehörige CemTrakker Äquivalente der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 02d im Vergleich

Das erhöhte W/F Verhältnis führt lediglich dazu, dass die volumetrischen magnetischen Messwerte sich entsprechend der Verdünnung reduzieren. Der Charakter der Messkurven sind für alle drei Versuche mit dem Baustoff 15d ähnlich. Es gibt eine gewisse Abreicherung von Magnetit von oben nach unten (Abbildung 6-229). Erhöhte W/F Verhältnisse führen aber nicht zu einem höheren erkennbaren Magnetitabsetzen. Die größere Differenz aus Maximal- und Minimalwerten ergibt sich erstaunlicherweise beim Versuch mit 40 l/min. Eigentlich wäre zu erwarten gewesen, dass die größte Differenz beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis in Zusammenhang mit dem hohen gemessenen Absetzmaß zu beobachten wäre.

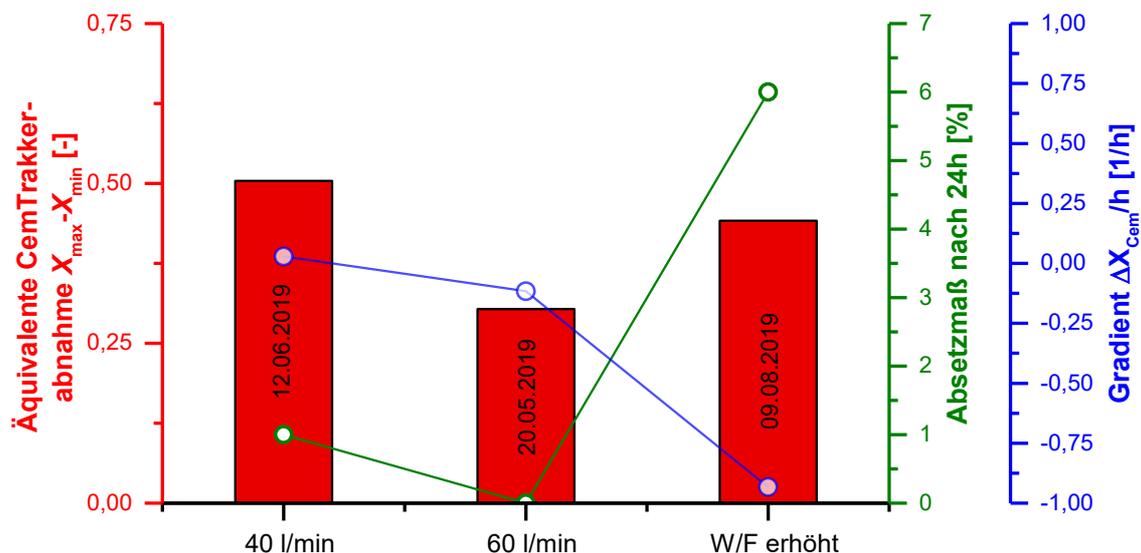


Abbildung 6-229: Gegenüberstellung der Differenz in den äquivalenten CemTrakker-Werten, den Absetzmaßen und der Werten aus der Gradientenanalyse der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 02d im Vergleich

Die Gradientenanalyse zeigt aber, dass beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis die größte Änderung an der Basislinie stattfindet. Dies korreliert mit einem hohen Absatzmaß. Schlussgefolgert werden kann, dass beim Baustoff 02 ein nicht sachgerechtes W/F Verhältnis anhand der Höhe der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitätsmesswerte erkannt werden kann. Die höhenspezifischen CemTrakker-Werte und Äquivalente sind für die Versuche bei 40 und 60 l/min sehr ähnlich in ihrer Ausprägung. Die CemTrakker Messprofile sind in jedem einzelnen Rohr vergleichbar und die Messwerte scheinen die Raumlage der jeweiligen Rohre widerzuspiegeln (Abbildung 6-230).

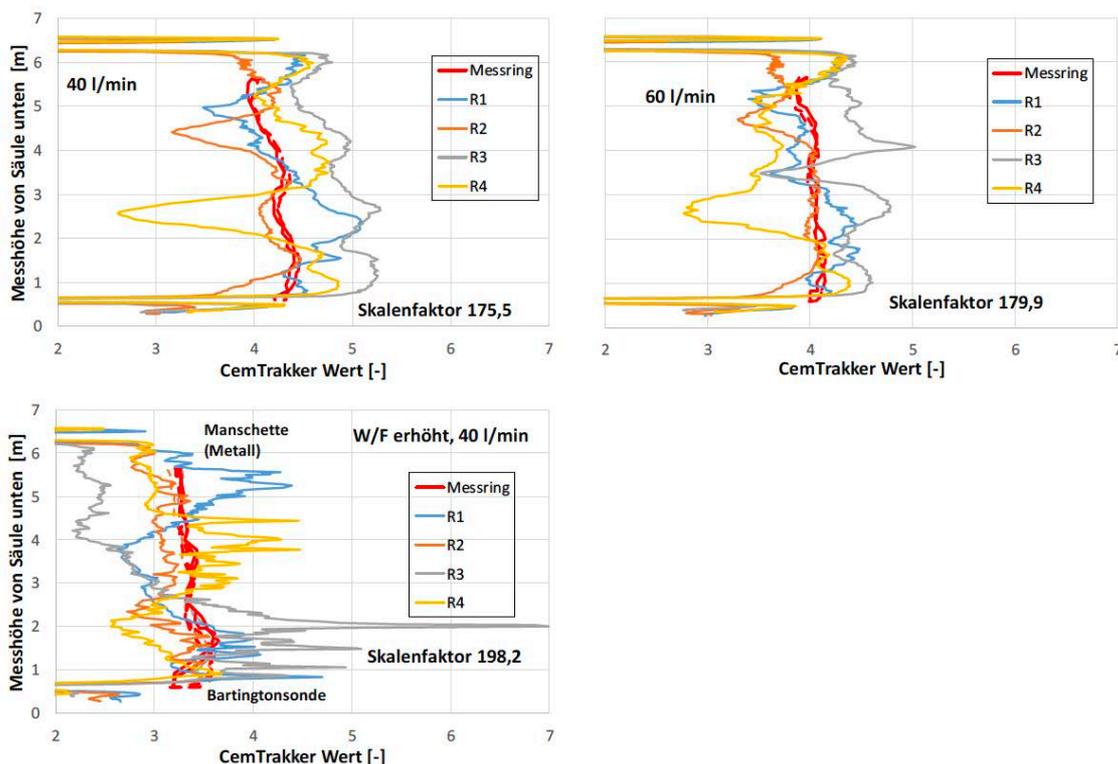


Abbildung 6-230: Umgerechnete höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Baustoffs 02d im Vergleich

Die Höhenprofile korrelieren auch in erster Annäherung mit dem Verlauf der volumetrischen magnetischen Äquivalentwerte, insbesondere beim Versuch mit 40 l/min. Dagegen unterscheiden sich die gemessenen CemTrakker Profile beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis in den jeweiligen Rohren sehr stark von den beiden anderen Versuchen. Die Messwerte sind viel schwankender (zappelig) und zeigen viele erkennbare Peaks. Dies deutet auf eine deutlich heterogene Verteilung der Magnetitpartikel in der Suspension hin. Mit den volumetrischen Messungen über den gesamten Querschnitt der Säule mit der Bartingtonsonde ist dies so nicht zu erkennen. Die Versuche zeigen, dass stark schwankende CemTrakker Messwerte im Falle des Baustoffes 02d als Indiz für nicht sachgerechte W/F Verhältnisse herangezogen werden können. Voraussetzung

ist aber, dass immer in allen Sondenschenkeln Messungen durchgeführt werden. Zu den magnetischen Messwerten siehe zudem die Abbildung 10-17, Abbildung 10-18, Abbildung 10-19 und Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2 im Anhang.

Die Korrelation der Dichte und den Wasseranteilen für den Baustoff 02d ist in der Abbildung 6-231 dargestellt. Mit der Gegenüberstellung kann ausgesagt werden, dass die Baustoffmischungen im richtigem W/F Verhältnis angemischt wurden.

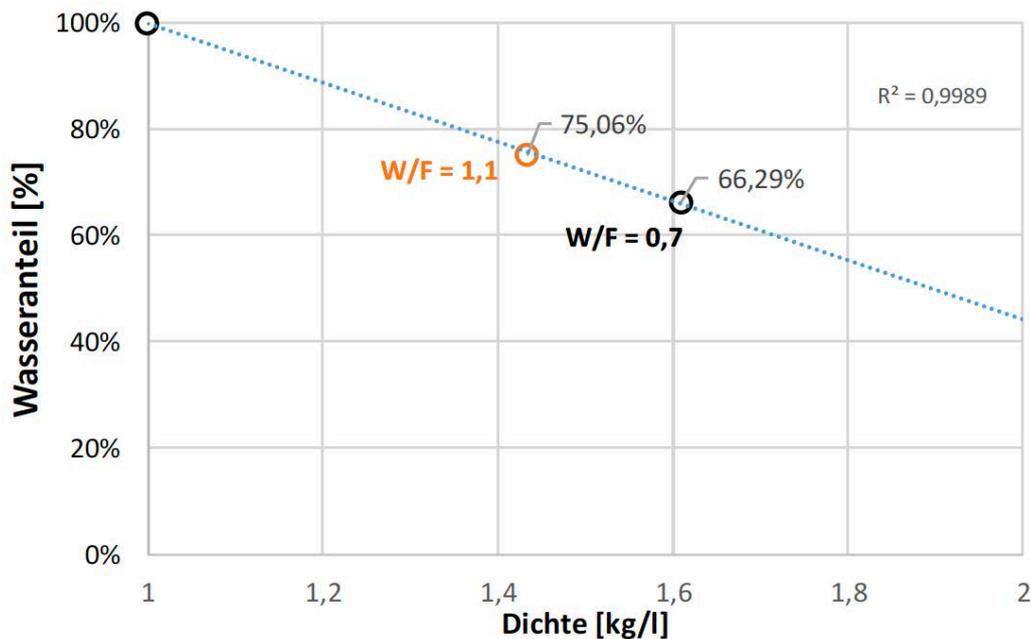


Abbildung 6-231: Korrelation zwischen den gemessenen Dichtewerten und W/F Verhältnissen des Baustoffes 02d

Die Korrelation der äquivalenten CemTrakker-Werte unter Berücksichtigung der W/F Verhältnisse ist in der Abbildung 6-232 aufgetragen. Wenn der Magnetitanteil im Feststoff bekannt ist, können dann definierte Zielwerte für den CemTrakker und die dazu benötigten Magnetitanteile berechnet werden. In der Abbildung 6-232 wurde davon ausgegangen, dass der Magnetitgehalt im Feststoff 2,5% beträgt (um ungefähr die Verhältnisse zum Baustoff 15d darzustellen). Möchte man unter dieser Annahme den CemTrakker Zielwert auf einen Wert von 4 einstellen, müsste man einen Magnetitanteil im Feststoff von ~2,50% wählen. Dies entspricht dem angenommenen Magnetitgehalt und soll verdeutlichen, dass im Baustoff 02d für den CemTrakker Schwellenwert von 2 eine gute Dotierung gewählt wurde.

Der Baustoff 02d ist ausreichend dotiert. Der Baustoff zeigt aber in allen Versuchen eine Ab- und Anreicherung von Magnetit über die Suspensionssäule. Auch im Baustoff 02d ist der Magnetit nicht homogen über die Höhe verteilt. Mit Hilfe von CemTrakker Messungen in allen Sondenrohren können Rückschlüsse auf nicht sachgerechte W/F Verhältnisse gezogen werden.

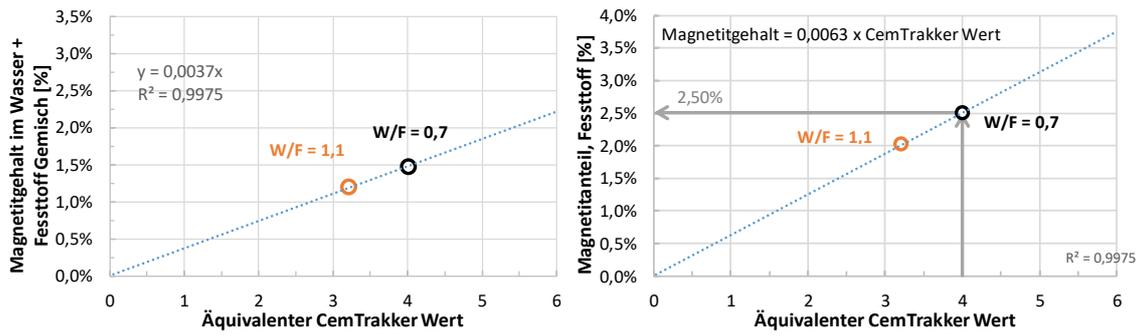


Abbildung 6-232: Korrelation der äquivalente CemTrakker Werte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen W/F Verhältnisse für den Baustoff 02d (Annahme 2,5% Magnetit, Mittelwerte der Chargen bei W/F 0,7)

6.7.3. Baustoff 07d

Im Folgenden werden die Versuche mit dem Baustoff 07d direkt verglichen und auf eine umfangreiche Beschreibung jedes einzelnen Versuches verzichtet. Die gewählten Verpressbedingungen spiegeln sich in dem Verlauf der sich entwickelten Volumenströme und Viskositäten wider (Abbildung 6-233). Der Baustoff 07d hat ein kleineres W/F Verhältnis und ein größere Dichte als die vorher beschriebenen Baustoffe 15d und 02d (Tabelle 6-51). Neben den Versuchen unter Standardbedingungen (40 l/min Volumenstrom), erhöhten Volumenstrom (60 l/min) und mit einem absichtlich zu hoch gewählten W/F Verhältnis (bei 40 l/min) wurde eine länger gelagerte, gealterte Baustoffcharge unter Standardbedingungen (40 l/min) untersucht.

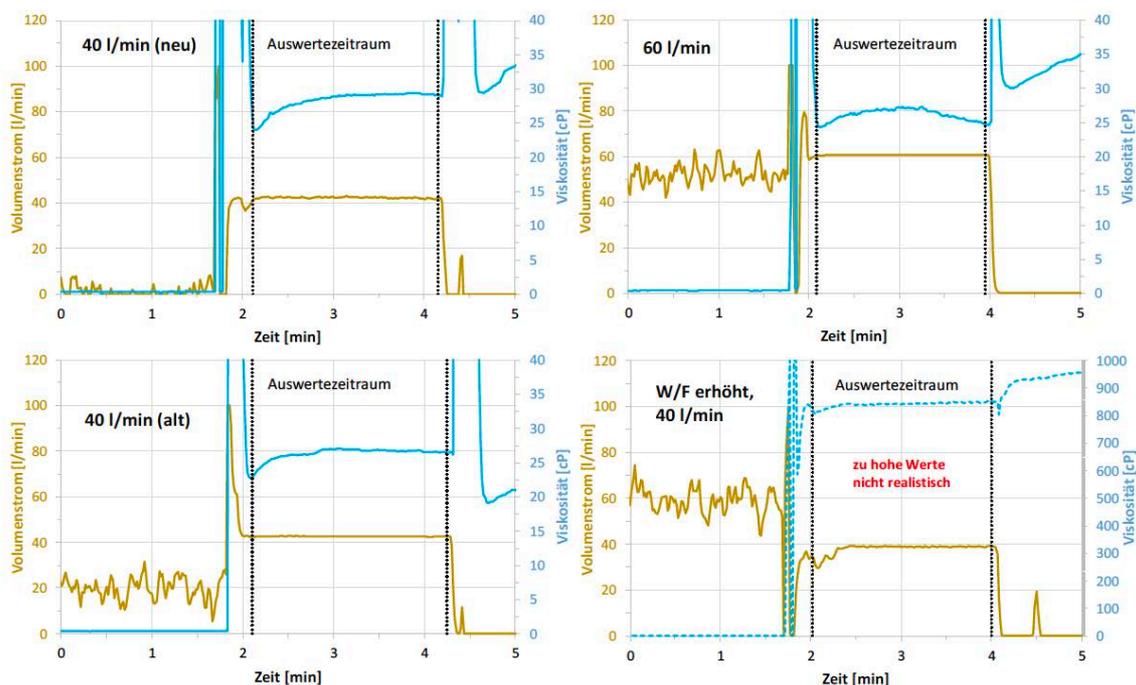


Abbildung 6-233: Volumenstrom und Viskosität des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d im Vergleich, Fokus Verpressphase

Die Viskositäten steigen bei einem Volumenstrom von 40 l/min über die Zeit leicht an und sind etwas höher im Mittel als die Viskositäten beim Volumenstrom von 60 l/min. Der Unterschied in der Viskositäten ist aber gegenüber den wenig dichteren Baustoffen 02d und 15d geringer. Größere Feststoffanteile bedingen größere Unterschiede in der generellen Zusammensetzung des Baustoffs 07d gegenüber den Baustoffen 02d und 15d. Der höhere Volumenstrom wirkt sich nicht signifikant auf das Aufschließverhalten des Baustoff 07d aus. Der Viskositätsverlauf ähnelt dem des Baustoffs 02d. Die Viskositäten fallen nach anfangs steigenden Werten mit der Zeit ab. Erhöhte Volumenströme führen auch beim Baustoff 02d zu konstanteren Verpressbedingungen und können somit positiv bewertet werden. Die alte Charge bei 40 l/min unterscheidet sich nicht wesentlich in der Viskosität, wobei im Mittel der niedrigsten Wert gemessen wurde. Der Unterschied ist aber wohl im Bereich der Messgenauigkeit, so dass die Alterung in puncto Viskositäts- und Volumenstromverlauf nicht erkannt werden kann.

Tabelle 6-51: Vergleich von gemessenen und berechneten Parametern der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 07d

Bezeichnung	Einheit	~40 l/min neu	~40 l/min alt	~60 l/min „schnell“	~ 40 l/min, W/F erhöht
Baustoff		07d	07d	07d	07d
Dauer Verpressen	min:sec	02:12	02:17	01:59	02:04
Eintritt Bart. - Signal Säulenaustr.	min:sec	02:00	02:04	01:18	02:02
Dauer Verpressen Säule (EWS)	min:sec	01:50	01:49	01:16	02:02
Dauer Hochfahren Sonde	min:sec	01:16	01:19	01:02	01:20
Differenz (Säule - Hochfahren)	min:sec	00:34	00:30	00:14	00:42
ρ_{Waage} (Dichtewaage)	g/cm ³	1,970	1,960	1,965	1,770
$\rho_{Vorgabe}$ (Datenblatt)	g/cm ³	1,940	1,940	1,940	1,940
ρ_{Druck} (P_{mess} (statisch und Höhe))	g/cm ³	1,989	2,020	2,005	1,810
$\rho_{Coriolis}$	g/cm ³	1,946	1,954	1,942	1,780
Differenz ($\rho_W - \rho_C$)	g/cm ³	0,024	0,006	0,023	-0,010
Differenz ($\rho_W - \rho_D$)	g/cm ³	-0,019	-0,060	-0,040	-0,040
Differenz ($\rho_W - \rho_V$)	g/cm ³	0,030	0,020	0,025	-0,170
P ($\rho_W +$ bekannte Höhe)	bar	1,220	1,214	1,217	1,096
P _C (ρ_C)	bar	1,179	1,185	1,177	1,079
P _{mess}	bar	1,206	1,224	1,215	1,097
Differenz (P - P _C)	bar	0,041	0,029	0,040	0,017
Differenz (P - P _{mess})	bar	0,014	-0,010	0,002	-0,001
H _{Ablauf} (Höhe)	m	6,313	6,313	6,313	6,313
H _{Waage} (ρ_W)	m	6,238	6,367	6,304	6,320
H _{Druck} (ρ_C)	m	6,317	6,386	6,379	6,285
Differenz (H _A - H _W)	m	0,075	-0,054	0,009	-0,007
Differenz (H _A - H _D)	m	-0,004	-0,073	-0,066	0,028
mittlerer Volumenstrom	l/min	42,295	42,620	60,716	38,037
mittlere Viskosität	cP	28,316	26,320	26,146	840,690
mittlere Verpressgeschw.	m/min	3,450	3,476	4,952	3,103
Dauer virtuelle 100 m Sonde	min:ss	28:59	28:46	20:12	32:14
Chargenbezeichnung	-	29.05.2019	07.05.2018	29.05.2019	29.05.2019
Absetzmaß nach 1h	%	0,4	0,4	0,4	1,2
Absetzmaß nach 24h	%	0,8	2,8	0,8	7,2
Suspensionstemperatur	°C	14	15,2	13,8	13,7
Wasser/Feststoff Verhältnis	-	0,3	0,3	0,3	0,45
Auslaufzeit (Marsh-Trichter)					
Zeit 1 Liter Durchlauf, Messung 1	min:sec:ss	01:36:31	01:18:47	01:32:00	00:37:50
Zeit 1 Liter Durchlauf, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-	-
Restlaufzeit, Messung 1	min:sec:ss	00:55:39	02:31:00	03:14:40	01:14:35
Restlaufzeit, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-	-

Auffällig ist, dass die Viskositätsmessung bei erhöhten W/F Verhältnis keine plausiblen Werte lieferte. Die Messwerte sind viel zu hoch und somit nicht realistisch. Eigentlich sollte die Viskosität bei höheren Wasseranteile geringere Werte annehmen. Ein Grund könnte sein, dass das Coriolis Massendurchflussmesser fehlerhafte Messwerte ermittelt hat. Möglicherweise wurde der Baustoff aber auch instabil aufgeschlossen und durch, z. B. die Separation von Bestandteilen, resultierten die unrealistischen Messwerte. Falls man mit den nicht plausiblen Messwerten eine nicht korrekte Mischung erkennen würde, wäre das, wie schon wie bei den anderen Versuchen erwähnt, von großem Vorteil. Mit der vorgeschlagen Vorabzirkulation einer Mischcharge bei gleichzeitiger Messung der Dichte, Viskosität, Temperatur und Volumenstrom vor dem eigentlichen Hinterfüllvorgang könnte mit einfachen Mitteln verhindert werden, dass dann eine solche nicht sachgerechte Suspension in den Untergrund gebracht werden würde. Im Anhang können zu den jeweiligen Versuchen die Verläufe der Dichte und Temperaturen entnommen werden (Abbildung 10-20 und Abbildung 10-21 im Anhang).

In der Abbildung 6-234 und Abbildung 6-235 sind die Verläufe der gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten dargestellt. Die magnetischen Messwerte bei den Versuchen mit 40 und 60 l/min Volumenstrom bei statischer Suspensionssäule sind nahezu identisch. Bei den Versuchen wurde die gleiche Baustoffcharge verwendet. Damit bestätigt sich die Aussage aus den Versuchen mit den Baustoffen 15d und 02d, dass bei erhöhten Volumenströme keine negativen Einflüsse auf die Messungen festgestellt werden kann. Die nahezu identischen Messwerte zeigen auch, dass mit den verwendeten Messverfahren, dem Versuchsaufbau und –prozedere reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden.

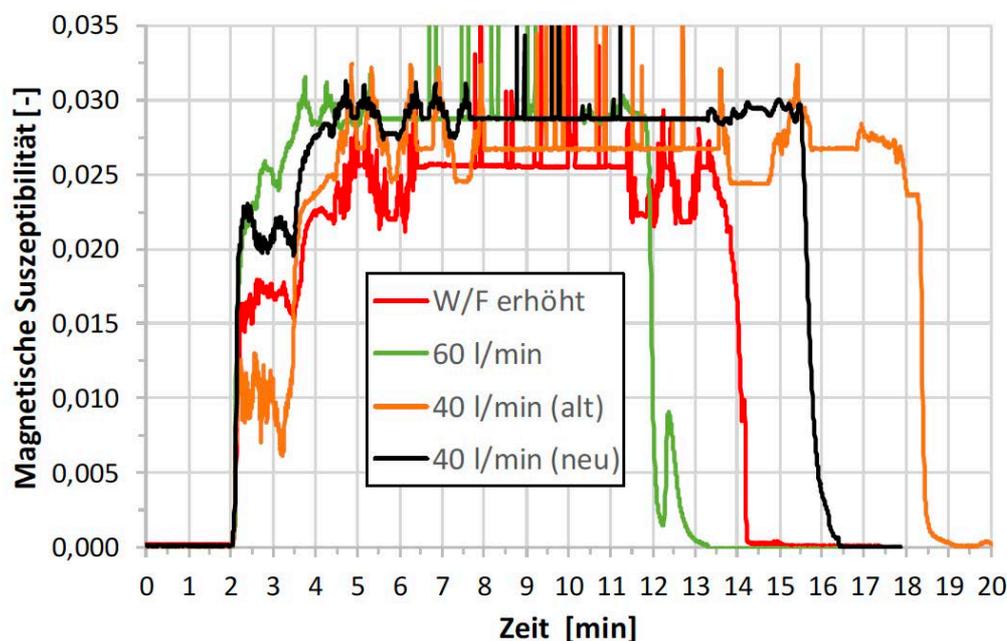


Abbildung 6-234: Verlauf der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 07d im Vergleich

Die alte Baustoffcharge ergibt insgesamt niedrigere Werte und auch schon deutlich erkennbare höhere Maxima und Minima. Beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis ergeben sich entsprechend der Verdünnung geringere magnetische Messwerte.

Der Verlauf der Messwerte während der Verpressphase ist wiederum abhängig davon, in welchem Abstand der Messring zum sich entwickelnden Suspensionsspiegel nach oben geführt wurde (Abbildung 6-236). Beim Versuch mit 40 l/min mit der alten Charge wurde der Messring mit dem kürzesten Abstand zum Suspensionsspiegel nach oben geführt. Insgesamt konnte beim Baustoff 07d der Suspensionsspiegel bei allen Versuchen visuell leichter erkannt werden als bei den anderen Versuchen. Die Dichteunterschiede zwischen dem überstehenden Wasser und der Suspension ergeben eine klarere Trennschicht als bei den Suspensionen mit kleinerer Dichte. Höhere W/F Verhältnisse, Volumenströme und unterschiedliche gealterte Baustoffchargen haben keinen Einfluss auf das Erkennen eines Suspensionsspiegels. Die Messwerte bei erhöhtem W/F Verhältnisse sind insgesamt instabiler als die in den anderen Versuchen.

Wenn man die CemTrakker Schwelle von 2 bei 50% der mittleren volumetrischen CemTrakker Äquivalente festlegt, dann ist die Schwelle für den Baustoff 07d bei sachgerechter Anmischung etwas zu hoch gewählt (Abbildung 6-237, Mittelwert $\sim 5,65$ für 40 (alt und neu sowie 60 l/min)). Das höhere W/F Verhältnis würde noch ausreichende Signale liefern, um bei einem CemTrakker Wert von 2 einen Suspensionsspiegel anzuzeigen. Der Unterschied in den Messwerten der CemTrakker Äquivalente ist für den Baustoff $< 0,41$ und bei einem höherem W/F Verhältnis bis zu 1,1.

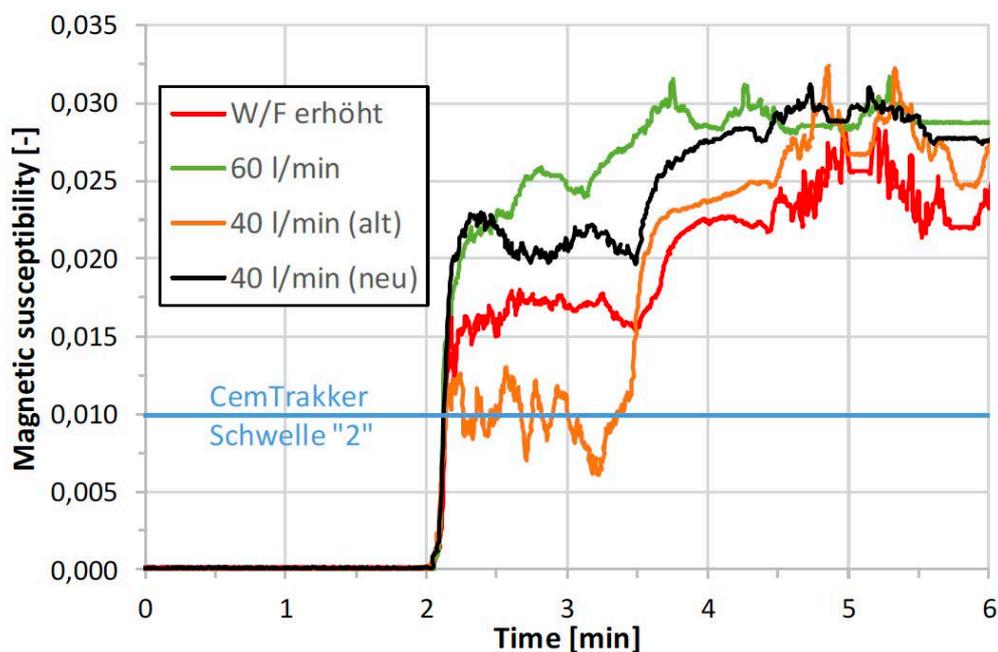


Abbildung 6-235: Verlauf der volumetrische magnetische Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 07d im Vergleich, Fokus Verpressphase

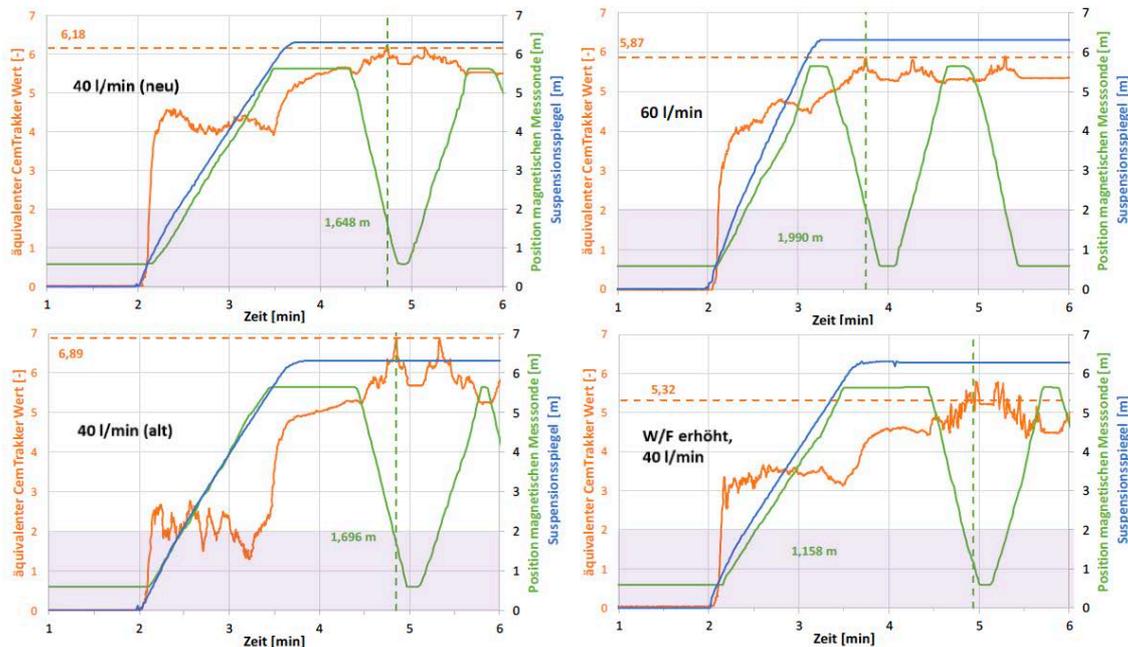


Abbildung 6-236: Verlauf der äquivalenten CemTrakker-Werte der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 07d im Vergleich, Fokus Verpressphase

Die mittleren volumetrischen Messwerte der Versuche mit 60 l/min und 40 l/min mit dem Bartingtonmessring (siehe Balkendiagramm in der Abbildung 6-237) sind praktisch identisch (der Unterschied ist nur $5,2E-05$). Das ist schon beeindruckend, wenn man bedenkt, dass über verschiedene Höhen und in unterschiedlichen Zeiträume in Millisekunden Intervallen gemessen wurde. Die Unterschiede in den äquivalenten CemTrakker Werte ergeben sich durch die individuell bestimmten Umrechnungsfaktoren.

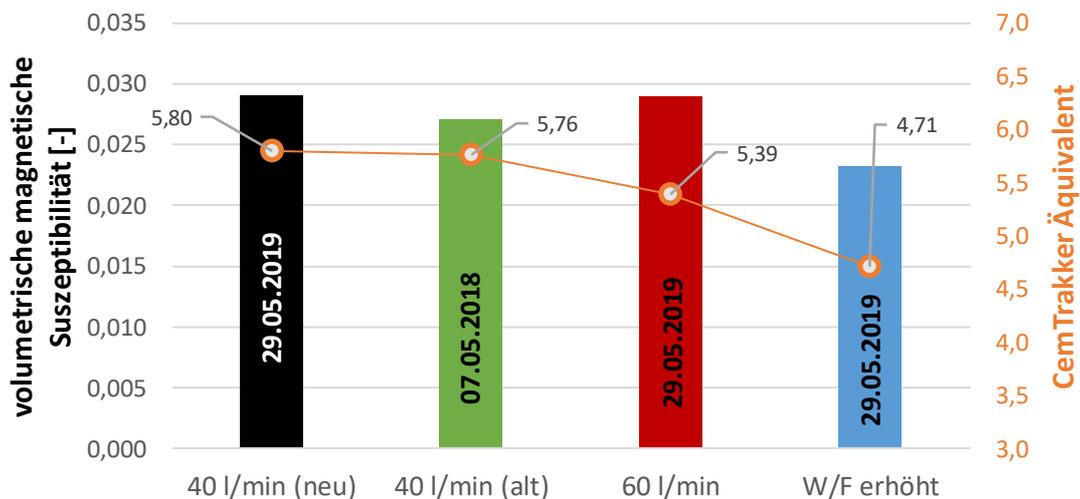


Abbildung 6-237: Mittlere volumetrische magnetische Suszeptibilitäten und dazugehörige CemTrakker Äquivalente der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 07d im Vergleich

Die CemTrakker Messungen sind weniger reproduzierbar, erfassen immer nur einen gewissen räumlichen Bereich um den jeweiligen Sondenstrang und sind somit weniger repräsentativ und fehlerbehafteter. Dies führt bei der Umrechnung in CemTrakker Äquivalente zu einer größeren Ungenauigkeit. Das erhöhte W/F Verhältnis führt lediglich dazu, dass die volumetrischen magnetischen Messwerte sich entsprechend der Verdünnung reduzieren.

Der Charakter der Messkurven sind für alle drei Versuche mit den Baustoffen 15d und 02d ähnlich. Es gibt eine Abreicherung von Magnetit von oben nach unten (Abbildung 6-238).

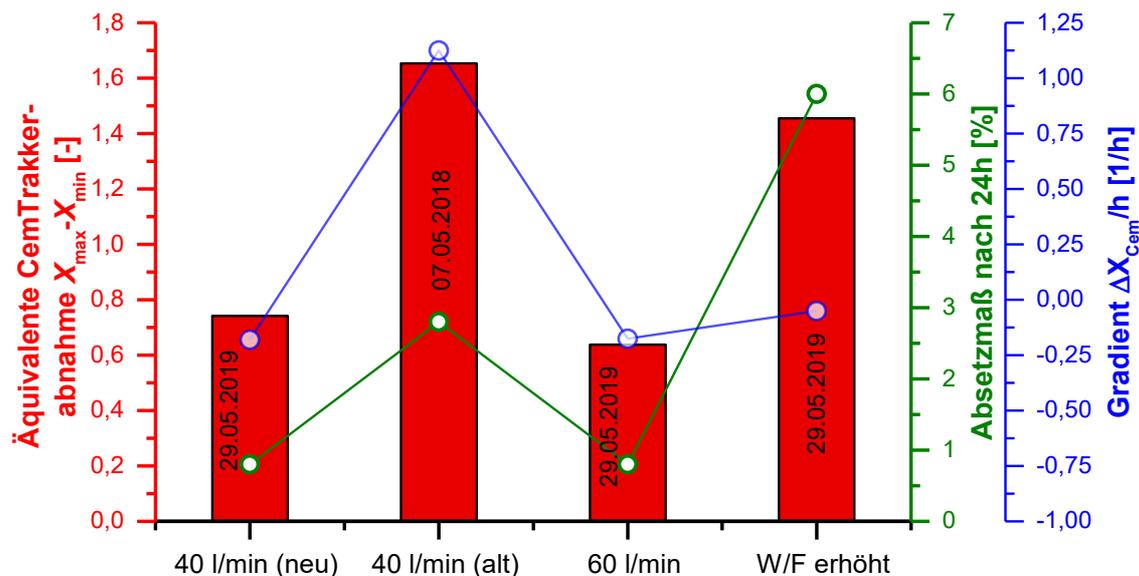


Abbildung 6-238: Gegenüberstellung der Differenz in den äquivalenten CemTrakker-Werten, den Absetzmaßen und der Werten aus der Gradientenanalyse der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 07d im Vergleich

Das erhöhte W/F Verhältnis führt zu einem erkennbar höheren Magnetitabsetzen. Die größere Differenz aus Maximal- und Minimalwerten ergibt sich aber beim Versuch mit der gealterten Charge bei 40 l/min Volumenstrom. Dies verdeutlicht die Problematik und Weiterverwendung gealterter Chargen und zeigt die Wichtigkeit, die Haltbarkeitsangaben des jeweiligen Baustoffes einzuhalten, und die Notwendigkeit, möglichst trockene Lagerungsbedingungen zu gewährleisten. Die alte Charge erfüllt auch das Kriterium für das Absetzmaß nach 1h (nach LQS Baden Württemberg, siehe Tabelle 6-51) während nach einem Tag das Absetzmaß >2 gemessen wurde. Die geforderte Baustellenprüfung, bei dem die Werte nach einer Stunde als Kriterium herangezogen würde, würde das Verpressen des gealterten Baustoffes zulassen. Besonders auffällig ist aber, dass die Gradientenanalyse mit dem stark positiven Wert eine instabile statische Suspensionssäule andeutet, d.h. über die Zeit zeigt sich ein zunehmendes Magnetitabsetzen an der Ruhelage des Messringes. Der Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis hat aufgrund der Verdünnung das größte Absetzmaß und auch einen großen Unterschied in den magnetischen Minimal- und Maximalwerten. Die statische Suspensionssäule ist aber relativ stabil in Bezug auf eine Magnetitabreicherung. Die Magnetitab- und anreicherung scheint sich bereits beim oder unmittelbar nach dem Verpressen eingestellt zu haben.

Die höhenspezifischen CemTrakker-Werte und Äquivalente für die Versuche mit dem Baustoff 07d sind in der Abbildung 6-239 dargestellt.

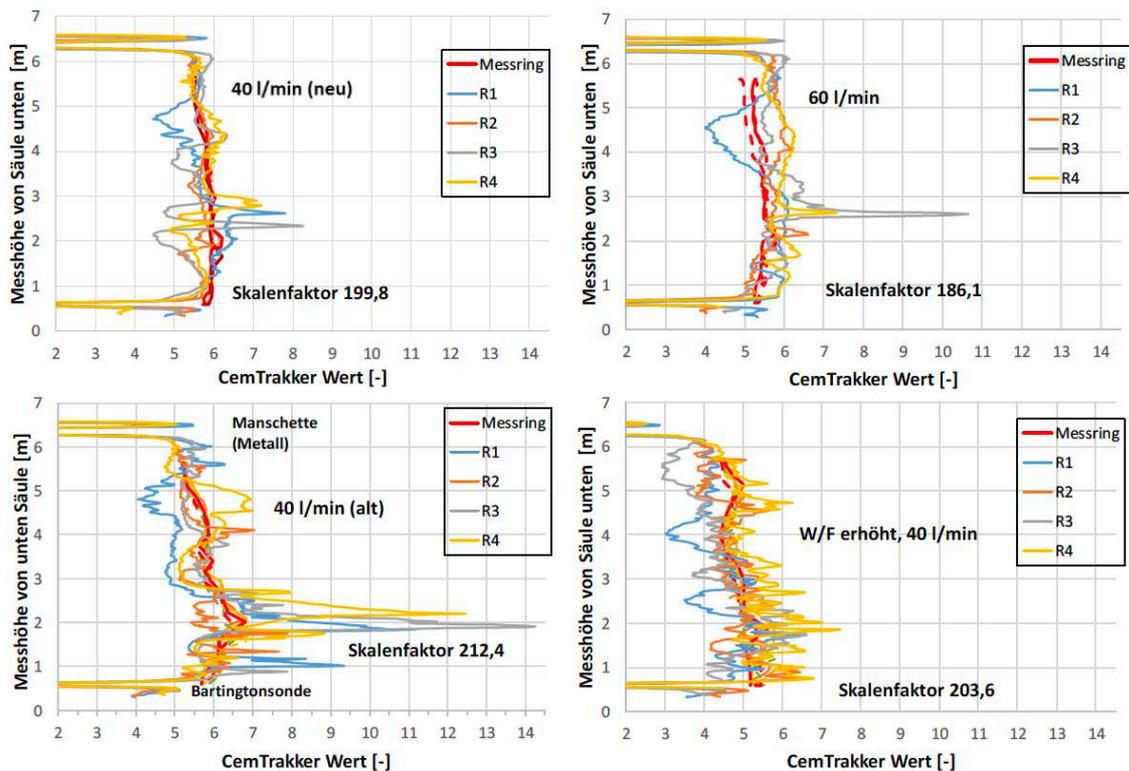


Abbildung 6-239: Umgerechnete höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Baustoffs 07d im Vergleich

Die Versuche bei 40 l/min (neu) und 60 l/min mit der gleichen Charge haben in den volumetrischen magnetischen Messungen sehr vergleichbare Ergebnisse geliefert. In den CemTrakker Profilen der beiden Versuche ist dies weniger deutlich zu erkennen. In den individuellen Messprofilen in den Sondenstränge sind die Maxima und Minima unterschiedlich ausgeprägt. Es können zwar gewisse Trends in der Raumlage der Rohre abgeleitet werden, aber es zeigt sich hier die Problematik der CemTrakker Messungen. Durch die geringe Reichweite des Sensors können auch lokale Spitzen und Magnetitaggregationen als Indiz für ein Absetzen interpretiert werden, die sich aber über den gesamten Querschnitt der Säule nicht als solche herausgestellt haben. Vermutlich ergibt sich bereits beim Hinterfüllvorgang durch Turbulenzen in der Strömung ein mehr oder weniger chaotisches Absetzen und Aggregieren von Magnetitpartikeln. Wenn dann solche lokalen Aggregationen in der Reichweite des CemTrakkers sind, ergeben sich die lokalen Maxima (bei Minima entsprechend, nur umgekehrt). Trotzdem sind die CemTrakker Profile bei 40 l/min (neu) und 60 l/min Volumenstrom mit der gleichen Charge nicht wesentlich unterschiedlich. Dagegen unterscheiden sich die gemessenen CemTrakker Profile bei den Versuchen mit erhöhtem W/F Verhältnis und der alten Baustellencharge in den jeweiligen Rohren von den beiden anderen Versuchen. Die Messwerte sind insgesamt viel schwankender (zappelig) und zeigen viele erkennbare Peaks. Dies deutet auf eine deutlich heterogene Verteilung der Magnetitpartikel

in der Suspension hin. In den Messprofilen bei erhöhtem W/F Verhältnis ist eine stetige Abreicherung des Magnetits von oben nach unten erkennbar. Die Abreicherung beim Versuch mit der alten Baustoffcharge ist ebenso erkennbar, wobei sie sich heterogener darstellt mit deutlichen Maxima im Höhenbereich um 2 m. Die Ergebnisse aus dem CemTrakker Messungen spiegeln im Wesentlichen die Erkenntnisse aus den volumetrischen magnetischen Messungen wider. Betrachtet man die Magnetitan- und abreicherung ist die verwendete gealterte Baustoffcharge noch problematischer im Vergleich zu der nicht gealterten Charge, bei der ein nicht sachgerechtes W/F Verhältnisse von 0,45 gewählt wurde. Auch die CemTrakker Messungen zeigen, dass beim Baustoff 7d die Verwendung gealterter Proben unbedingt vermieden werden sollte. Die volumetrischen Messungen über den gesamten Querschnitt der Säule mit der Bartingtonsonde korrelieren im Falle des Baustoffes relativ gut mit den CemTrakker Messprofilen. Die Versuche zeigen, dass stark schwankende CemTrakker Messwerte im Falle des Baustoffes 07d als Indiz für nicht sachgerechte W/F Verhältnisse und gealterte Chargen herangezogen werden können. Voraussetzung ist aber, dass immer in allen Sondenschenkeln Messungen durchgeführt werden. Zu den magnetischen Messwerten siehe zudem die Abbildung 10-22, Abbildung 10-23 und Abbildung 10-24 sowie die Tabelle 10-3 und Tabelle 10-4 im Anhang.

Die Korrelation der Dichte und den Wasseranteilen für den Baustoff 07d ist in der Abbildung 6-231 dargestellt. Mit der Gegenüberstellung kann ausgesagt werden, dass die Baustoffmischung im richtigem W/F Verhältnis angemischt wurde.

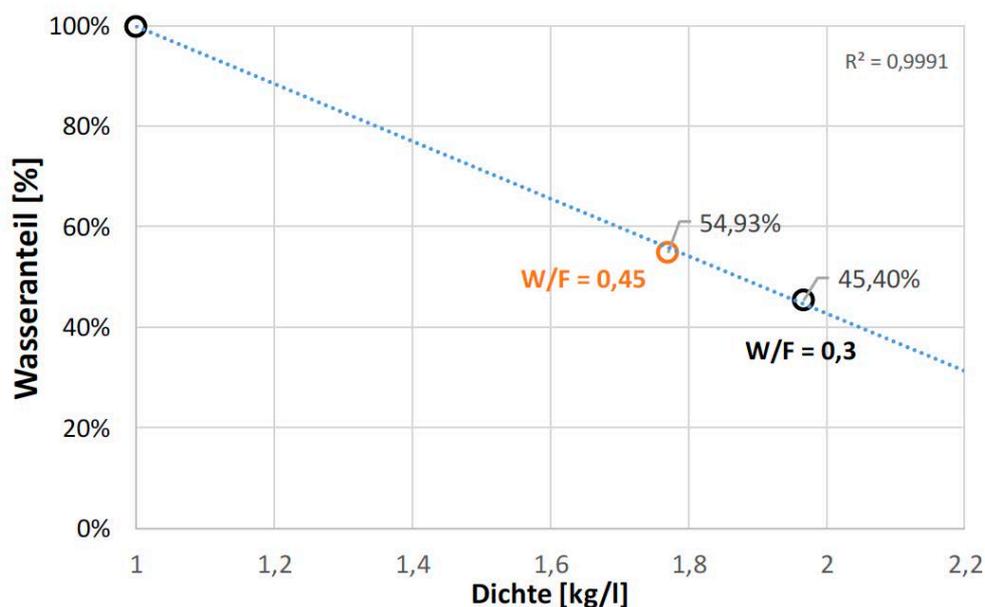


Abbildung 6-240: Korrelation zwischen den gemessenen Dichtewerten und W/F Verhältnissen des Baustoffes 07d

Die Korrelation der äquivalenten CemTrakker-Werte unter Berücksichtigung der W/F Verhältnisse ist in der Abbildung 6-241 aufgetragen. Wenn der Magnetitanteil im Feststoff bekannt ist, können dann definierte Zielwerte für den CemTrakker und die dazu benötigten Magnetitanteile berechnet werden. In der Abbildung 6-241 wurde davon ausgegangen, dass der Magnetitgehalt im Feststoff

wie beim Baustoff 02d 2,5% beträgt, um einen Vergleich zwischen einem Baustoff mit höheren Feststoffanteilen und einem mit niedrigeren Feststoffanteilen zu ermöglichen. Möchte man unter dieser Annahme den CemTrakker Zielwert auf einen Wert von 4 reduzieren, müsste man einen Magnetitanteil im Feststoff von ~1,88% wählen. Dies ist weniger als der angenommenen Magnetitgehalt und zeigt, dass die Dotierung im Baustoff 02d für den CemTrakker Schwellenwert von 2 geringer gewählt werden könnte.

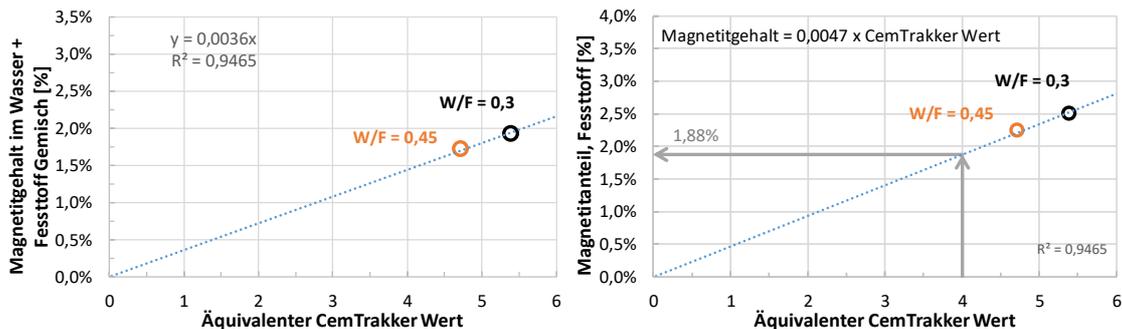


Abbildung 6-241: Korrelation der äquivalente CemTrakker Werte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen W/F Verhältnisse für den Baustoff 07d (Annahme 2,5% Magnetit, Mittelwerte der Chargen bei W/F 0,8)

Der Baustoff 07d ist etwas zu hoch dotiert. Der Baustoff zeigt in allen Versuchen eine Ab- und Anreicherung von Magnetit über die Suspensionssäule, wobei bei korrektem W/F Verhältnis die Magnetitab- und anreicherung weniger relevant ist. Auch im Baustoff 07d ist der Magnetit nicht homogen über die Höhe verteilt. Mit Hilfe von CemTrakker Messungen in allen Sondenrohren können Rückschlüsse auf nicht sachgerechte W/F Verhältnisse und gealterte Proben gezogen werden.

6.7.4. Baustoff 13+

Im Folgenden werden die Versuche mit dem Baustoff 13+ direkt verglichen. Die Verläufe der Volumenströme und der Viskositäten können der Abbildung 6-242 entnommen werden.

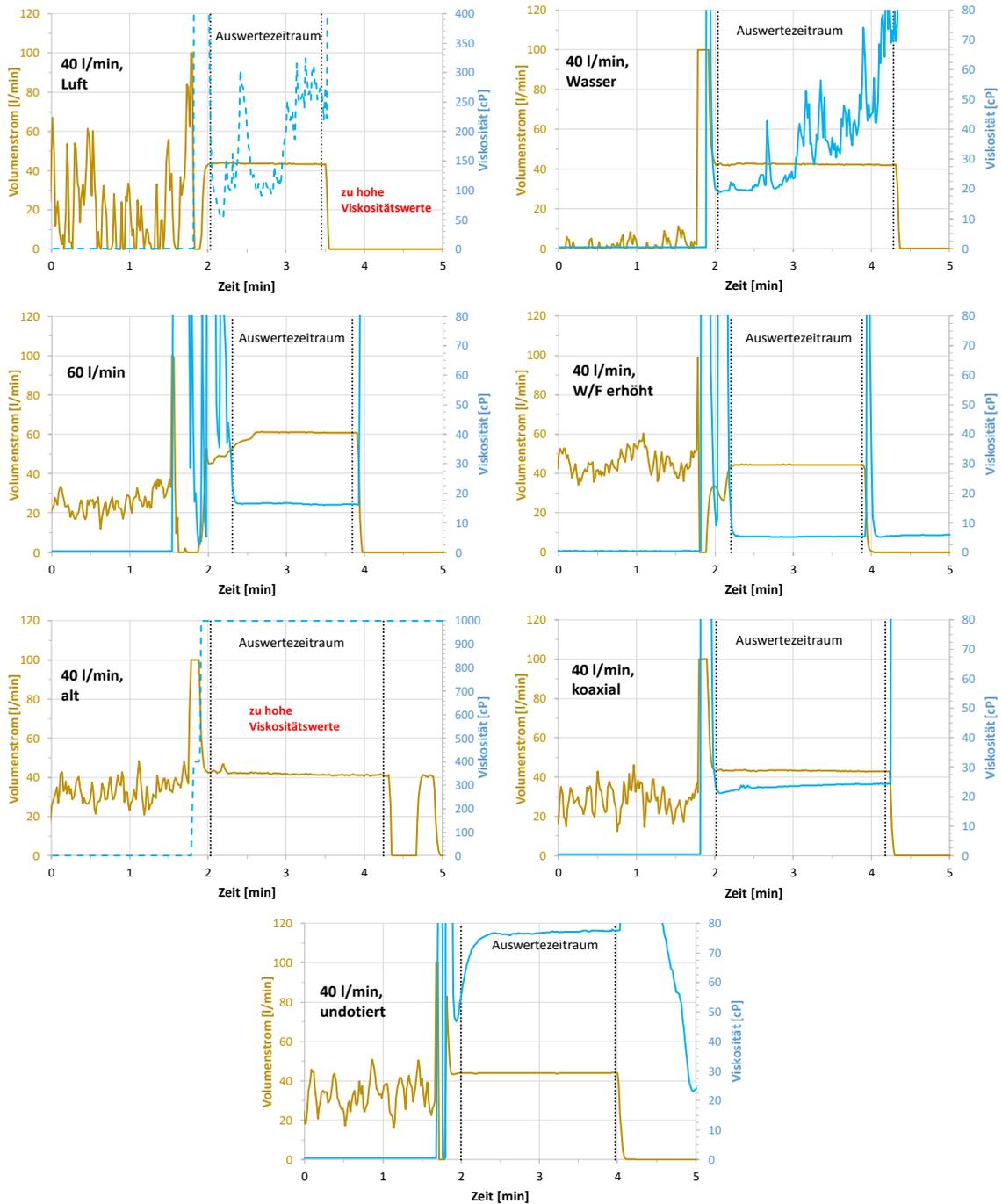


Abbildung 6-242: Volumenstrom und Viskosität des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+ im Vergleich, Fokus Verpressphase

Mit dem Baustoff 13+ wurden sechs verschiedene Versuche mit dotierten und ein Versuch mit undotiertem Hinterfüllmaterial durchgeführt (Tabelle 6-52 und Tabelle 6-53).

- Ohne vorher die Säule mit Wasser zu befüllen, 40 l/min Volumenstrom (Luft). Nur bei diesem Versuch wurde die Säule nicht vorher mit Wasser befüllt, d. h. bei allen anderen Versuchen musste die überstehende Wassersäule verdrängt werden.
- Versuch unter Standardbedingungen mit vorab wasserbefüllter Säule bei üblicher Verpressgeschwindigkeit, 40 l/min Volumenstrom (Wasser).
- Versuch mit erhöhten Volumenstrom (60 l/min).
- Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis (bei 40 l/min)
- Versuche mit einer gealterten Baustoffcharge (40 l/min).
- Versuch unter Standardbedingungen (40 l/min), aber bei eingebauter Koaxialsonde (anstatt der Doppel-U-Sonde).
- Versuche mit undotiertem Material.

Der Baustoff hat zumindest nach dem Datenblatt die geringste Dichte aller untersuchten Baustoffe. Die bestimmten Dichtewerte mit dem Coriolis Massendurchflussmesser sind bis auf den Versuch mit dem undotiertem Material signifikant höher als die mit der Waage gemessenen Dichtewerte (siehe Tabelle 6-52 und sowie Abbildung 10-25 im Anhang). Die Dotierung als Grund für die wenig plausiblen Dichtemesswerte aus dem Coriolis Massendurchflussmesser scheint nach dem derzeitigen Kenntnisstand eher unwahrscheinlich. Eher wahrscheinlich scheinen generelle Baustoffchargenunterschiede und ungenaue Messungen am Massendurchflussmesser. Die Volumenstrommessungen sind auch bei gleichen Chargen (40 l/min (Luft), 40 l/min, 40 l/min (Wassers), 60 l/min, W/F erhöht (40 l/min) sowie 40 l/min mit der Koaxialsonde) in einer Größenordnung, aber bewegen sich doch in einem gewissen Schwankungsbereich bei gleicher Stufeneinstellung am Mischer. Ungenaue und nicht plausiblen Messwerte zeigen sich aber insbesondere bei den zugehörigen Viskositätsverläufen (siehe Abbildung 6-242). Die Viskosität wird im Massendurchflussmesser anhand der gemessenen Drücke berechnet. Stellen sich im Massendurchflussmesser inkonstante Strömungs- und Druckbedingungen ein, können wenig plausiblere Messdaten resultieren. Ein Hauptgrund für die Messwerte wird aber der Tatsache geschuldet sein, dass vor jedem Versuch der gesamte Versuchsaufbau inklusive Schläuche und Massendurchflussmesser vorab gereinigt werden muss, vor allem dann, wenn der Baustoff oder die Baustoffcharge geändert wird. Eine komplette Entlüftung des Gesamtsystems inklusive des Massendurchflussmessers, bevor der Hinterfüllvorgang gestartet wurde, ist damit nicht garantiert. Beim Baustoff 13+ könnte sich dies besonders auf die Messungen ausgewirkt haben. Für die ersten vier Versuche wurden dieselbe Baustoffcharge verwendet. Für den ersten Versuch mit 40 l/min (Luft) wurde das System nicht mit Wasser vorbefüllt, d. h. auch der Massendurchflussmesser war vor dem Verpressen mit Luft gefüllt. Beim Eintritt der Suspension in den Massendurchflussmesser wurde ein Luft/Suspensionsgemisch gemessen und auch während der Verpressphase kann von keiner kompletten Entlüftung im Massendurchflussmesser ausgegangen werden (die Volumenstrommessung funktioniert mit und ohne Gas). Dementsprechend resultierte die im Mittel sehr hohe Viskosität für den Versuch mit 40 l/min (Luft). Die drei folgenden Versuche wurden mit der gleichen Charge an einem Tag nacheinander durchgeführt. Hier zeigt sich, dass aufgrund der

Vorbefüllung der Anlage mit Wasser im Massendurchflussmesser ähnliche Erklärungsmuster herangezogen werden können wie bei Versuchen mit den Baustoffen 15d und 02d. Die Viskositäten steigen bei einem Volumenstrom von 40 l/min (Wasser) über die Zeit an, zeigen dabei leichte Schwankungen und besitzen im Mittel den höchsten Wert im Vergleich zu den folgenden Versuchen bei 60 l/min Volumenstrom und nicht sachgerechten W/F Verhältnis von 1,2 (40 l/min Volumenstrom). Die gleiche Baustoffcharge und Verpressbedingungen wurde beim Versuch mit den eingebauten Koaxialsonde durchgeführt (40 l/min). Dort sind die Werte viel konstanter als beim Versuch mit der Doppel-U-Sonde. Da liegt es nahe, dass die Viskositätsbestimmung bei 40 l/min mit der Doppel-U-Sonde vermutlich stärker durch vorhandene Entlüftungseffekte beeinflusst wurde als beim Versuch mit der Koaxialsonde. Die Viskositätsbestimmung mit dem gealterten Baustoff (40 l/min), der an einem anderen Tag durchgeführt wurde, ergab durchweg keine brauchbaren Messwerte. Die Alterung des Baustoffes wird aber vermutlich keinen so starken Einfluss auf die Messungen gehabt haben. Eine fehlerhafte Messung des Massendurchflussmesser ist die wahrscheinlichere Ursache (z. B. Verunreinigung oder Luftblase am Drucksensor). Der erhöhte Volumenstrom von 60 l/min scheint dazu führen, dass der Baustoff 13+d besser aufgeschlossen bleibt und liefert deshalb konstante und durch die erhöhte Verpressgeschwindigkeit insgesamt niedrigere Viskositätswerte. Erhöhte Volumenströme führen auch beim Baustoff 13+d zu konstanteren Verpressbedingungen und können somit eher positiv bewertet werden. Die sehr geringen Viskositätswerte beim Versuch mit erhöhten W/F Verhältnis können als Indiz für den zu hoch gewählte Wasseranteil herangezogen werden. Die Dichtewert (Waage) des undotierte Baustoffes 13+ wurde mit $>0,5 \text{ g/cm}^3$ größer bestimmt als bei den anderen Versuchen. Das Absetzmaß und die Marshzeiten sind ebenso komplett nicht vergleichbar mit den dotierten Baustoffchargen. Dadurch stellt sich generell die Frage der Vergleichbarkeit der Versuche mit den dotierten Baustoffen und den undotiertem Baustoff. Die Dichtewerte aus dem Coriolis Messgerät passen in Falle des dotierten Baustoffes sehr gut mit dem gemessenen Dichtewert an der Waage überein. Die Marshzeiten größer 100, die eine höhere Zähigkeit anzeigen, passen zu den höher gemessenen Viskositätswerten. Die rheologischen Eigenschaften werden auch durch die Anmisch- und Verpresstemperaturen bestimmt, aber einen direkten kausalen Zusammenhang kann anhand der Messwerte nicht abgeleitet werden (siehe Abbildung 10-26 im Anhang).

An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei den Füllstandkontrollversuchen primär die magnetischen Messungen im Fokus waren und nicht die am Coriolis Massendurchflussmesser aufgezeichneten Daten. Aber es hat sich gezeigt, dass die Coriolis Massendurchflussmessungen sehr hilfreiche Daten für eine Bewertung des Hinterfüllvorgangs liefern. Auch für zukünftige Versuche des im Rahmen des Projektes entwickelten Füllstandkontrollprüfstand ist eine Bypasslösung, die eine Vorabzirkulation der Suspension über Coriolis Massendurchflussmesser erlaubt, sinnvoll. Über die Analyse der Messdaten, bei Erreichen stabiler Messdaten, könnte dann mit dem eigentlichen Verpressvorgang in die Säule begonnen werden. Die Messwerte aus den Versuchen mit dem Baustoff 13+ zeigen, dass der Einsatz eines Coriolis Massendurchflussmesser bei realen Erdwärmesondenhinterfüllungen mit Hilfe einer kontinuierlichen und zeitgleichen Aufzeichnung der Volumenströme, Dichte und Viskosität sinnvoll wäre.

Tabelle 6-52: Vergleich von gemessenen und berechneten Parametern der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13+ (40 l/min in Luftsäule, 40 l/min in Wassersäule, 60 l/min, W/F erhöht (40 l/min))

Bezeichnung	Einheit	~40 l/min in Luftsäule	~40 l/min in Wassersäule	~ 60 l/min „schnell“	~ 40 l/min, W/F erhöht
Baustoff		13+d	13+d	13+d	13+d
Dauer Verpressen	min:sec	01:50	02:19	01:48	01:56
Eintritt Bart. - Signal Säulenaustr.	min:sec	01:39	02:00	01:19	01:45
Dauer Verpressen Säule (EWS)	min:sec	01:47	01:50	01:17	01:45
Dauer Hochfahren Sonde	min:sec	01:23	01:11	01:15	01:10
Differenz (Säule - Hochfahren)	min:sec	00:24	00:39	00:02	00:35
ρ_{Waage} (Dichtewaage)	g/cm ³	1,470	1,470	1,425	1,325
ρ_{Vorgabe} (Datenblatt)	g/cm ³	1,460	1,460	1,460	1,460
ρ_{Druck} (P_{mess} (statisch und Höhe))	g/cm ³	1,429	1,511	1,518	1,398
ρ_{Coriolis}	g/cm ³	1,633	1,591	1,569	1,462
Differenz ($\rho_{\text{W}} - \rho_{\text{C}}$)	g/cm ³	-0,163	-0,121	-0,144	-0,137
Differenz ($\rho_{\text{W}} - \rho_{\text{D}}$)	g/cm ³	0,041	-0,041	-0,093	-0,073
Differenz ($\rho_{\text{W}} - \rho_{\text{V}}$)	g/cm ³	0,010	0,010	-0,035	-0,135
P (ρ_{W} + bekannte Höhe)	bar	0,910	0,910	0,883	0,821
P_{C} (ρ_{C})	bar	0,990	0,965	0,951	0,886
P_{mess}	bar	0,866	0,916	0,920	0,848
Differenz (P - P_{C})	bar	-0,079	-0,054	-0,069	-0,066
Differenz (P - P_{mess})	bar	0,044	-0,006	-0,038	-0,027
H_{Ablauf} (Höhe)	m	6,313	6,313	6,313	6,313
H_{Waage} (ρ_{W})	m	6,006	6,352	6,584	6,522
H_{Druck} (ρ_{C})	m	5,408	5,868	5,979	5,910
Differenz ($H_{\text{A}} - H_{\text{W}}$)	m	0,307	-0,039	-0,271	-0,209
Differenz ($H_{\text{A}} - H_{\text{D}}$)	m	0,905	0,445	0,334	0,403
mittlerer Volumenstrom	l/min	43,517	42,335	60,092	44,368
mittlere Viskosität	cP	173,144	35,804	16,515	5,386
mittlere Verpressgeschw.	m/min	3,550	3,453	4,901	3,619
Dauer virtuelle 100 m Sonde	min:ss	28:10	28:58	20:24	27:53
Chargenbezeichnung	-	02.04.2019	02.04.2019	02.04.2019	02.04.2019
Absetzmaß nach 1h	%	-	0,4	1,6	22
Absetzmaß nach 24h	%	-	1,6	2,4	23
Suspensionstemperatur	°C	-	-	-	-
Wasser/Feststoff Verhältnis	-	0,8	0,8	0,8	1,2
Auslaufzeit (Marsh-Trichter)					
Zeit 1 Liter Durchlauf, Messung 1	min:sec:ss	-	00:52:53	00:44:49	00:30:44
Zeit 1 Liter Durchlauf, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-	-
Restlaufzeit, Messung 1	min:sec:ss	-	01:37:59	01:16:10	00:56:44
Restlaufzeit, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-	-

Tabelle 6-53: Vergleich von gemessenen und berechneten Parametern der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13 (40 l/min (alt), Koaxialsonde (40 l/min), ohne Dotierung (40 l/min))

Bezeichnung	Einheit	~40 l/min (alt)	~40l/min koaxial	~40l/min undotiert
Baustoff		13+ d	13+ d	13+ d
Dauer Verpressen	min:sec	02:20	02:15	02:02
Eintritt Bart. - Signal bei Säulenaustritt	min:sec	01:42	01:42	01:39
Dauer Verpressen in Säule (EWS)	min:sec	01:51	01:48	01:46
Dauer Hochfahren Sonde	min:sec	01:05	01:09	01:13
Differenz (Säule - Hochfahren)	min:sec	00:46	00:39	00:33
ρ_{Waage} (Dichtewaage)	g/cm ³	1,480	1,480	1,535
ρ_{Vorgabe} (Datenblatt)	g/cm ³	1,460	1,460	1,460
ρ_{Druck} (P_{mess} (statisch und Höhe))	g/cm ³	1,517	1,521	1,688
ρ_{Coriolis}	g/cm ³	1,640	1,588	1,536
Differenz (ρ_{W} - ρ_{C})	g/cm ³	-0,160	-0,108	-0,001
Differenz (ρ_{W} - ρ_{D})	g/cm ³	-0,037	-0,041	-0,153
Differenz (ρ_{W} - ρ_{V})	g/cm ³	0,020	0,020	0,075
P (ρ_{W} + bekannte Höhe)	bar	0,917	0,917	0,951
P_{C} (ρ_{C})	bar	0,994	0,963	0,931
P_{mess}	bar	0,920	0,922	1,023
Differenz (P - P_{C})	bar	-0,078	-0,046	0,019
Differenz (P - P_{mess})	bar	-0,003	-0,005	-0,072
H_{Ablauf} (Höhe)	m	6,313	6,313	6,313
H_{Waage} (ρ_{W})	m	6,335	6,351	6,793
H_{Druck} (ρ_{C})	m	5,717	5,919	6,788
Differenz (H_{A} - H_{W})	m	-0,022	-0,038	-0,480
Differenz (H_{A} - H_{D})	m	0,596	0,394	-0,475
mittlerer Volumenstrom	l/min	41,813	43,201	43,964
mittlere Viskosität	cP	1000,000	23,511	75,727
mittlere Verpressgeschwindigkeit	m/min	3,411	3,496	3,586
Dauer Verpressen virtuelle 100 m Sonde	min:ss	29:19	28:36	27:53
Chargenbezeichnung	-	11.09.2017	02.04.2019	26.06.2019
Absetzmaß nach 1h	%	0,8	1,0	0
Absetzmaß nach 24h	%	1,2	1,5	0
Suspensionstemperatur	°C	17,8	16,2	17,2
Wasser/Feststoff Verhältnis	-	0,8	0,8	0,8
Auslaufzeit (Marsh-Trichter)				
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 1	min:sec:ss	00:49:55	00:56:13	>100
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-
Restlaufzeit, Messung 1	min:sec:ss	01:52:53	00:48:41	>100
Restlaufzeit, Messung 2	min:sec:ss	-	-	-

In der Abbildung 6-243 und Abbildung 6-244 sind die Verläufe der gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten für die Versuche mit dem dotierten Baustoff 13+d dargestellt.

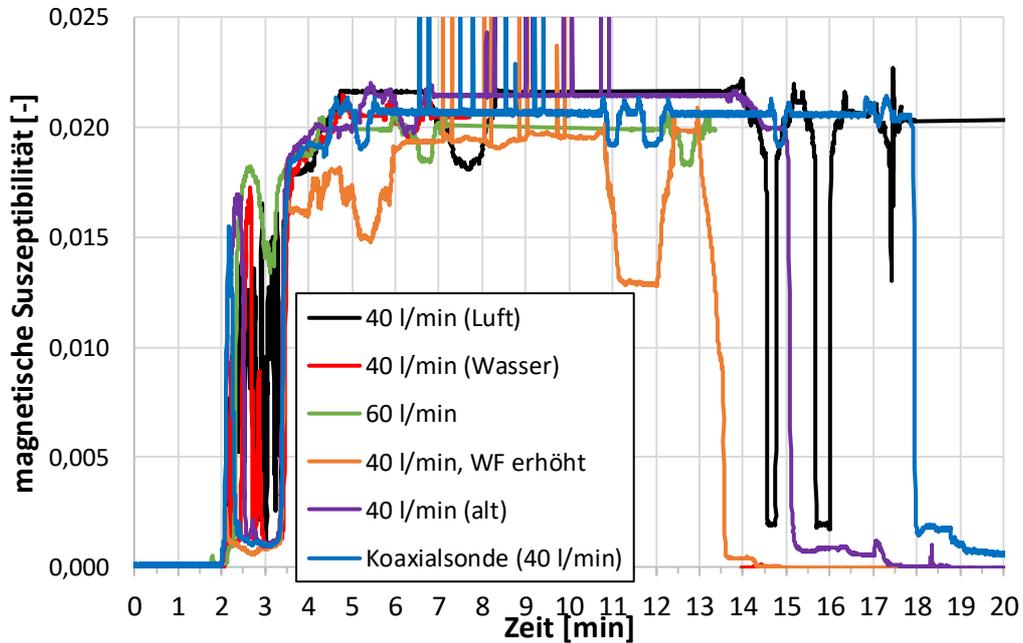


Abbildung 6-243: Verlauf der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13+d im Vergleich

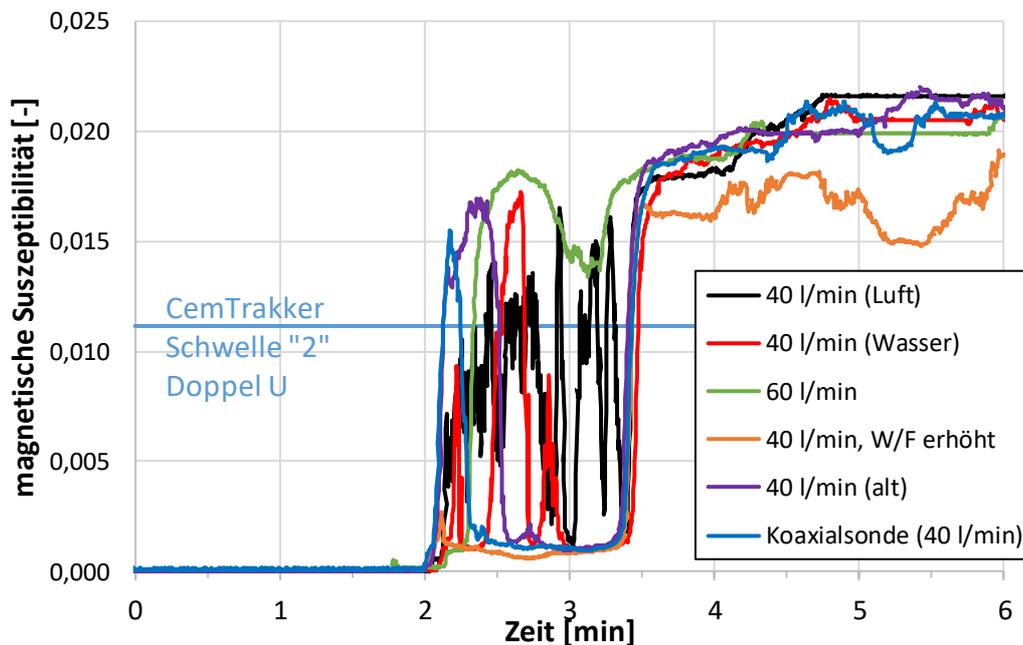


Abbildung 6-244: Verlauf der volumetrische magnetische Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13+d im Vergleich, Fokus Verpressphase

Die volumetrischen magnetischen Messwerte bewegen sich bei den Versuchen bei statischer Suspensionssäule in einen ähnlichen Rahmen. Die verwendeten Baustoffchargen ergeben vergleichbare Ergebnisse. Die Messwerte beim Versuch mit 60 l/min liegt etwas unterhalb der anderen Versuche (grüne Kurve in der Abbildung). Der geringere gemessene Messwert liegt nahe, dass der Wasseranteil beim Anmischen etwas zu hoch gewählt und aufgrund des Verdünnungseffektes niedrigere Dichten und magnetische Suszeptibilitäten gemessen wurden. Entsprechend der Verdünnung ergaben sich beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnis ebenso geringere magnetische Messwerte. Das erhöhte W/F Verhältnis führt auch zu deutlich erkennbaren sukzessiv ansteigenden Absetzverhalten über die Zeit (orangene Kurve). Die Versuche mit der Koaxialsonde (40 l/min) und bei 40 l/min (Wasser) mit der Doppel-U-Sonde ergaben nahezu gleiche statische Messwerte (blaue und rote Kurve, gleiche Charge!). Dies unterstreicht die Plausibilität des vorgeschlagenen Messprinzips und –konzepts. Die Koaxialsonde mit ihrem Durchmesser von 62 mm und die Doppel-U-Rohre mit jeweils 32 mm Durchmesser unterscheiden sich in ihren Flächen über den Querschnitt der Säule nur marginal ($\sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, das Verhältnis von Hinterfüllvolumen zu nicht verfüllten Volumen beträgt ungefähr 5 zu 1). Aus diesem Grund sollten sich die volumetrischen Messwerte, die über den Querschnitt der Säule mit dem Bartington Messring gemessen wurden, auch nicht wesentlich unterscheiden.

Der Verlauf der Messwerte während der Verpressphase ist wiederum abhängig davon, in welchen Abstand der Messring zum sich entwickelnden Suspensionsspiegel nach oben geführt wird (Abbildung 6-245). Insgesamt konnte beim Baustoff 13+d der Suspensionsspiegel bei allen Versuchen mit den vorab Wasser befüllten Säulen visuell nicht gut erkannt werden. Die Dichteunterschiede zwischen dem überstehenden Wasser und der Suspension sind gering und ergeben keinen klar erkennbaren Suspensionsspiegel. Der Messring konnte beim Versuch mit Luft (ohne vorab mit Wasser befüllter Säule) leichter entlang des Suspensionsspiegel nach oben geführt werden. Die Messwerte sind aber instabiler beim Hochfahren (Luft/Suspension) als bei den mit Wasser geführten Versuchen. Die Dichtemesswerte und damit der umgerechnete Suspensionsspiegel sind instabil während der Verpressphase beim Versuch mit erhöhtem W/F Verhältnissen. Als mögliche Ursachen kommt möglicherweise ein Zusetzen des Drucksensors mit Feststoffaggregaten in Betracht. Die gemessenen Druckwerten und damit der berechnete Suspensionsspiegel scheinen jedenfalls fehlerhaft. Höhere W/F Verhältnisse, Volumenströme und unterschiedliche gealterte Baustoffchargen haben keinen Einfluss auf das Erkennen eines Suspensionsspiegels.

Wenn man die CemTrakker Schwelle von 2 bei 50% der mittleren volumetrischen CemTrakker Äquivalente festlegt, dann ist die Schwelle für den Baustoff 13+d bei sachgerechter Anmischung etwas zu gering gewählt (Abbildung 6-246, Mittelwerte allesamt < 4 für 40 l/min (alt und neu) sowie 60 l/min). Gesondert betrachtet werden muss der Versuch mit der Koaxialsonde. Die CemTrakker Äquivalente, die sich aus der Korrelation zwischen den gemessenen CemTrakker Profilen und den dazugehörigen Bartington Messwerte ergeben, sind kleiner als 1. Das kommt dadurch zustande, dass der Durchmesser der Koaxialsonde größer ist als der Durchmesser der Sondenrohre der Doppel-U-Sonde. Der Abstand der CemTrakker Sonde zum Hinterfüllmaterial ist bei der Koaxialsonde im Mittel größer und das aufgeprägte Magnetfeld besitzt dadurch eine geringere Reichweite.

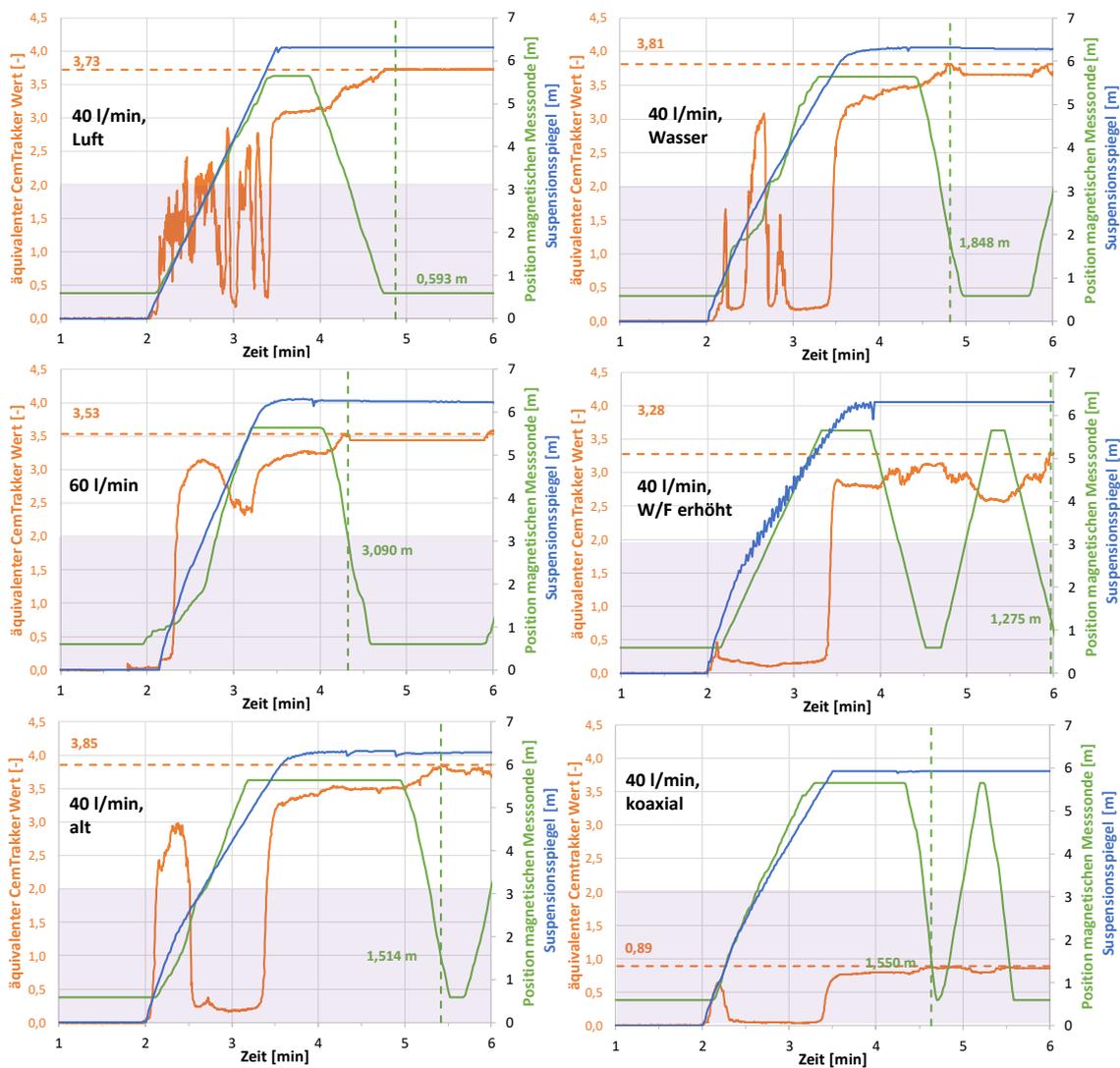


Abbildung 6-245: Verlauf der äquivalenten CemTrakker-Werte der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13+d im Vergleich, Fokus Verpressphase

Dieser geometrische Faktor gilt es auch bei Doppel-U-Sonden mit größeren Durchmessern zu berücksichtigen und zu untersuchen. Ab 140m Tiefe werden üblicherweise Sonden mit Durchmesser ≥ 40 mm Durchmesser verwendet. Mit den größeren Durchmessern reduziert sich der CemTrakker Messwert. Das heißt, dass in Abhängigkeit vom Durchmesser der Erdsondenrohre geringere CemTrakker Schwellenwerte definiert werden sollten. Im Falle der untersuchten Koaxialsonde würde bei 50% des mittleren volumetrischen CemTrakker Äquivalent der Schwellenwert 0,42 betragen.

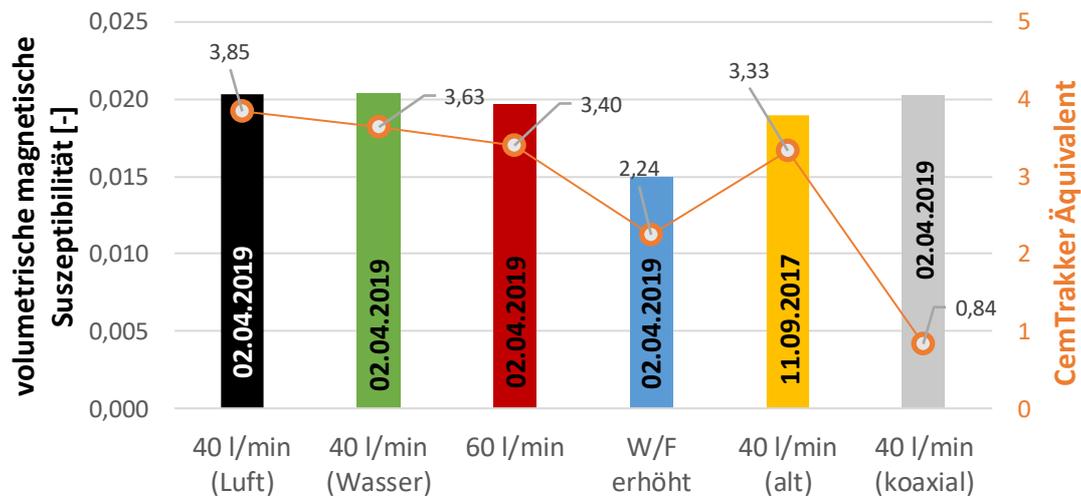


Abbildung 6-246: Mittlere volumetrische magnetische Suszeptibilitäten und dazugehörige CemTrakker Äquivalente der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13+d im Vergleich

Diese geringere Schwellenwert scheint zumindest fragwürdig. Aber ob dieser doch sehr geringe Wert in der Realität ausreichen würde, kann mit dem im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Versuches nicht ausgesagt werden. Dazu wären weitere angepasste Versuche und Detailuntersuchungen notwendig. Die mittleren volumetrischen Messwerte der Versuche mit 40 l/min (W/F 0,8), gemessen mit dem Bartingtonmessring (siehe Balkendiagramm in der Abbildung 6-246), sind praktisch identisch. Beim Versuch mit 60 l/min ergaben sich im Mittel etwas geringere Werte, die eventuell aufgrund eines fälschlicherweise etwas zu hoch angerührten W/F Verhältnis, belegt durch geringer gemessene Dichtewerte, hervorgerufen werden (siehe auch grüne Kurve in Abbildung 6-243). Der mittlere Messwert bei nicht sachgerechtem W/F Verhältnis von 1,2 ist entsprechend der Verdünnung niedriger. Die Unterschiede in den äquivalenten CemTrakker Werten ergeben sich durch die individuell bestimmten Umrechnungsfaktoren. Die CemTrakker Messungen sind weniger reproduzierbar, erfassen immer nur einen gewissen räumlichen Bereich um den jeweiligen Sondenstrang und sind somit weniger repräsentativ und fehlerbehafteter. Dies führt bei der Umrechnung in CemTrakker Äquivalente zu einer größeren Ungenauigkeit.

Bei allen Versuchen gibt es eine Abreicherung von Magnetit von oben nach unten (Abbildung 6-247). Die prozentuale Abnahme (Maximum zu Minimum) ist bei allen Versuchen mit vorab befüllter mit Wasser befüllter Säule und sachgerechtem W/F Verhältnis ca. 10% (orangene Kurve). Die Äquivalente CemTrakker Abnahme (rote Säulen) wäre im Falle der Koaxialsonde nicht aussagekräftig, da die Koaxialsonde im CemTrakker Wert aufgrund des geometrischen Faktor im Absolutwert geringer ist im Vergleich zu den Werten mit der Doppel-U-Sonde. Das erhöhte W/F Verhältnis führt zu einem erkennbar höheren Magnetitabsetzen und korreliert mit dem sehr hohen Absetzmaß. Der Versuch bei 40 l/min (Luft) hat gegenüber den Versuchen mit Wasser (außer W/F Verhältnis nicht sachgerecht!) den größten Unterschied in den Maxima und Minima.

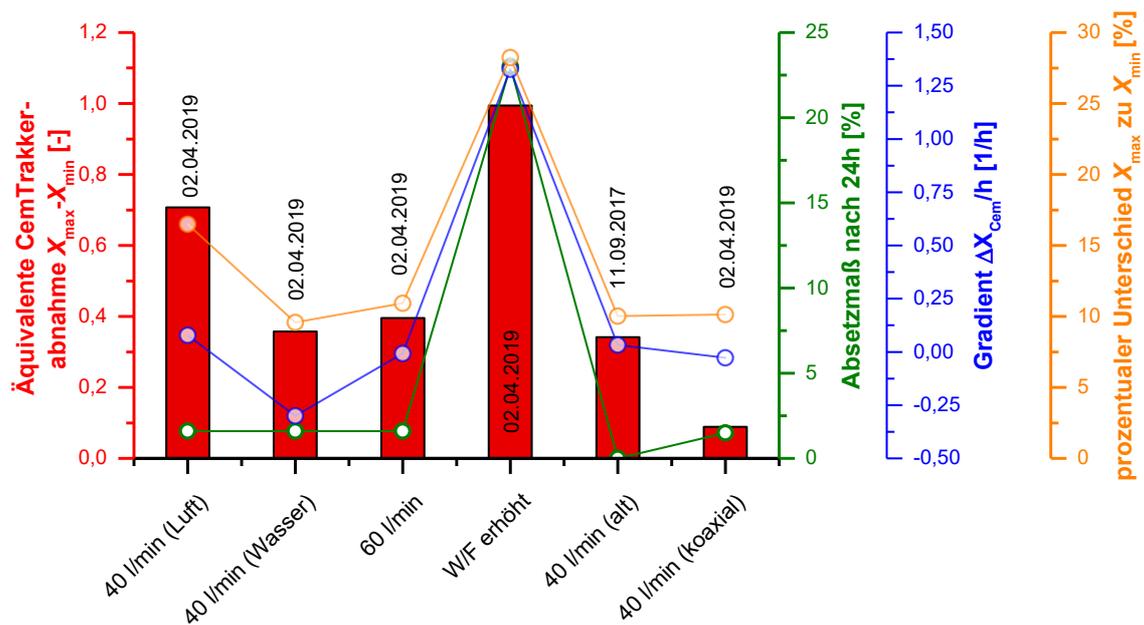


Abbildung 6-247: Gegenüberstellung der Differenz in den äquivalenten CemTrakker-Werten, den Absetzmaßen und der Werten aus der Gradientenanalyse der Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13+d im Vergleich

Der Versuch ist auch der einzige aller durchgeführten Versuche mit kommerziellen Baustoffen (korrektes W/F Verhältnis) bei dem das Maximum am Messring (unterste Messposition an der Basis) und das Minimum am obersten Messpunkt gemessen wurde (siehe dazu die Abbildung 6-248, Abbildung 10-27 und Abbildung 10-29 und Tabelle 10-5). Bei allen anderen Versuchen, die allesamt mit vorab befüllter Wassersäule durchgeführt wurden, ist das Maximum etwas unterhalb des obersten Messpunktes und das Minimum etwas oberhalb des untersten Messpunktes, wobei aber alle Versuche gemein haben, dass eine mehr oder weniger deutliche Abnahme der magnetischen Messwerte von oben nach unten zu verzeichnen ist. Die überstehende Wassersäule führt dazu, dass sich eine diffuse Übergangszone aus Verwirbelungen und auf- und absteigende Partikeln entwickelt. Offensichtlich scheint dieses Verhalten im Übergangsbereich Wasser zu Suspension die Magnetitab- und anreicherung in der Säule zu beeinflussen. Eine Alterung des Baustoffes ist zumindest in dieser Charge nicht problematisch. Es ist kein Unterschied zwischen der gealterten Charge und der neuen Charge zu erkennen. Das ist schon ein großer Unterschied zum Baustoff 07d, bei dem die gealterte Baustoffcharge doch ein sehr problematisches Verhalten zeigte. Die Gradientenanalyse für das nicht sachgerechte W/F Verhältnis ergibt starke positive Werte. Die statische Suspensionssäule ist in diesem Fall instabil, wohingegen bei den anderen Versuchen die statische Suspensionssäule keine weiteren signifikanten Magnetitab- und anreicherungen erkennen lässt.

Die höhen-spezifischen CemTrakker-Werte und Äquivalente sind für die Versuche mit dem Baustoff 13+d in der Abbildung 6-248 und Abbildung 6-239 dargestellt.

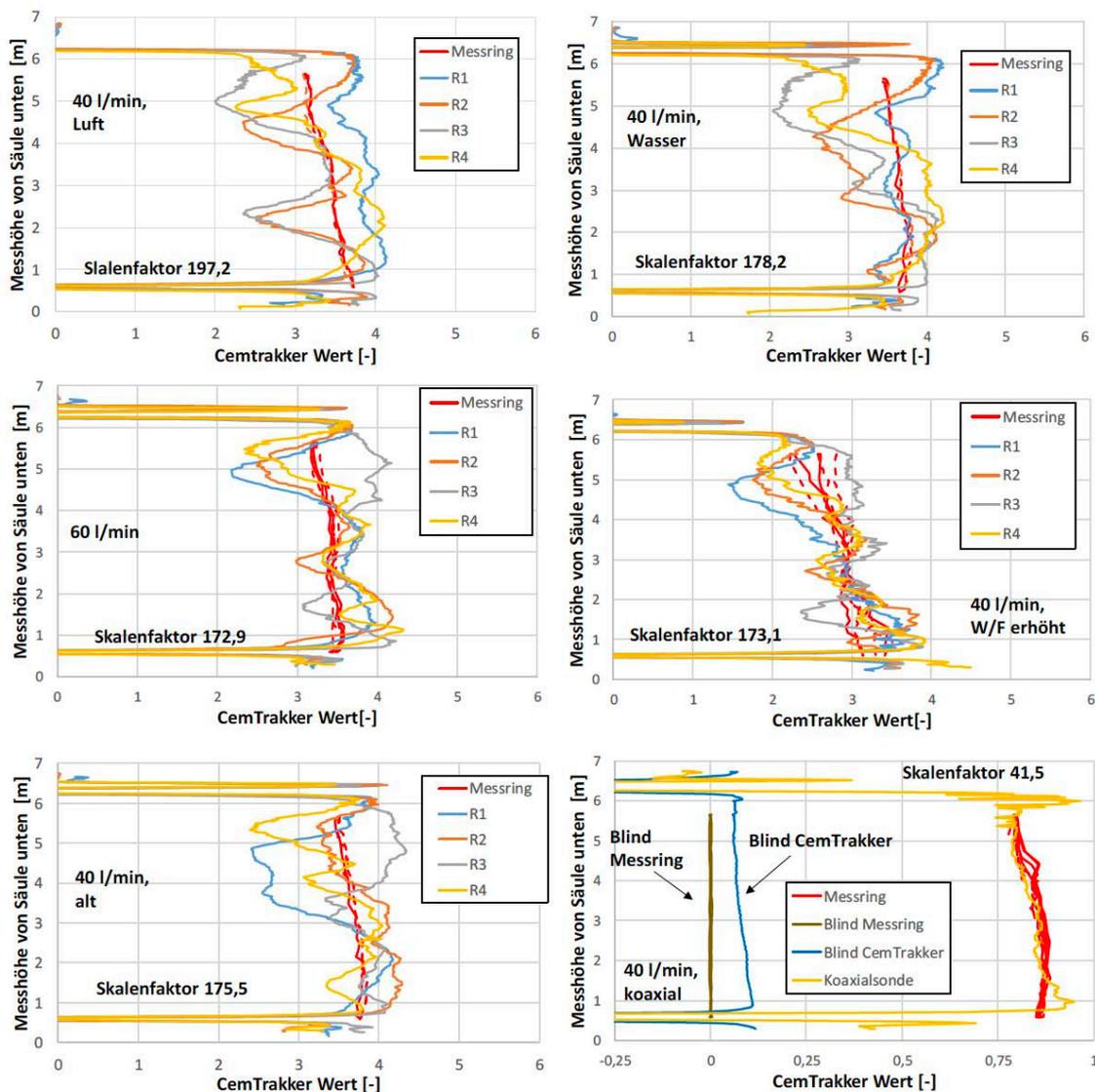


Abbildung 6-248: Umgerechnete höhen spezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Baustoffs 13+d im Vergleich

Nach den Versuchen 40 l/min (Luft) und 40 l/min Wasser wurden die Doppel-U-Sonden nochmal ein- und ausgebaut. Dies ist sehr gut erkennbar in den individuellen höhen spezifischen Profilen der CemTrakker Messungen. Die Profile in den Rohren 1 bis 4 sind bei den Versuchen (40 l/min (Luft, Wasser) vor dem Umbau und 60 l/min, nach dem Umbau mit 40 l/min (alt, W/F erhöht) vergleichbar und spiegeln den individuellen Verlauf der jeweiligen Rohre wider. Die Versuche haben in den volumetrischen magnetischen Messungen sehr vergleichbare Ergebnisse geliefert. Im Versuch mit nicht sachgerechtem W/F Verhältnis kann das starke Absetzen des Magnetits sehr gut erkannt werden. Demnach könnten für den Baustoff 13+d ansteigende CemTrakker Messwerte mit der Tiefe im Realfall ein Indiz für nicht sachgerechte W/F Verhältnisse liefern. Die CemTrakker Messungen und volumetrischen Messungen mit dem Bartington Messring bei befüllter Suspension korrelieren auch beim Koaxialsondenversuch. Auffällig ist aber, dass die

Blindmessung mit dem CemTrakker signifikante positive Messwerte lieferte (4 Befahrungszyklen), während im Gegensatz dazu die Blindmessungen mit dem Bartington Messring leicht negative Hintergrundwerte ergaben. Eine plausible Erklärung für die positiven CemTrakker Werte bei der Koaxialsonde konnte nach derzeitigen Kenntnisstand noch nicht gefunden werden. Zumal bei allen anderen Versuchen die Blindmessungen mit dem CemTrakker sich allesamt leicht negative Hintergrundwerte ergaben (Abbildung 6-249).

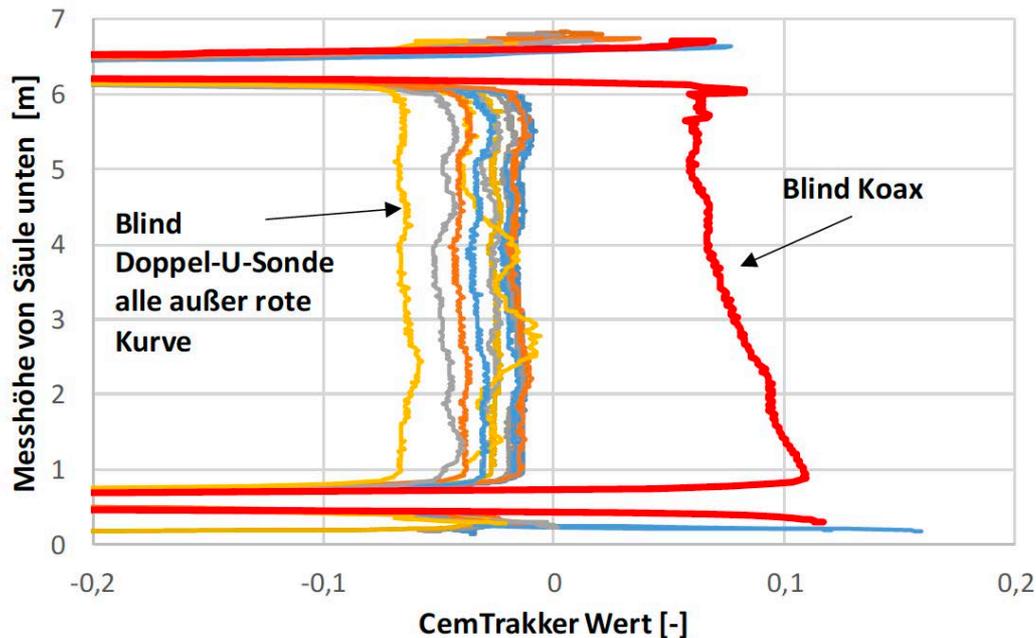


Abbildung 6-249: Vergleich der Blindmessungen mit dem Baustoffes 13+d

Als Argument für die positiven Messwerte könnte man anführen, dass noch mit Magnetit verunreinigtes Wasser vor dem Verfüllvorgang in der überstehenden Wassersäule vorhanden gewesen sein könnte. Wenn man aber die Reichweite des CemTrakkers bedenkt und die Tatsache berücksichtigt, dass mit der Bartington Sonde die Blindmessungen komplett unauffällig blieben, ist eine solche Erklärung wenig plausibel (warum sollten sich Magnetitpartikel nur an der Oberfläche der Koaxialsonde anlagern? Etc.). Solch ein hoher Hintergrundwert bei den CemTrakker Messungen wäre im Realfall fatal, wenn man bedenkt, dass die CemTrakker Werte bei hinterfüllter Koaxialsonde gerade mal im Mittel 0,84 betragen. Zu den magnetischen Messwerten siehe zudem die Abbildung 10-27, Abbildung 10-28 und Abbildung 10-29 sowie die Tabelle 10-5 und Tabelle 10-6 im Anhang.

Der Baustoff 13+ hat mit Graphit mindestens einen diamagnetischen Inhaltsstoff, der damit potentiell mit magnetischen Messungen detektiert werden kann. Die Messungen mit dem Bartington Messring zeigten auch leicht ansteigende Messsignale, die sich aber in einer sehr kleinen Größenordnung bewegte (Abbildung 6-250).

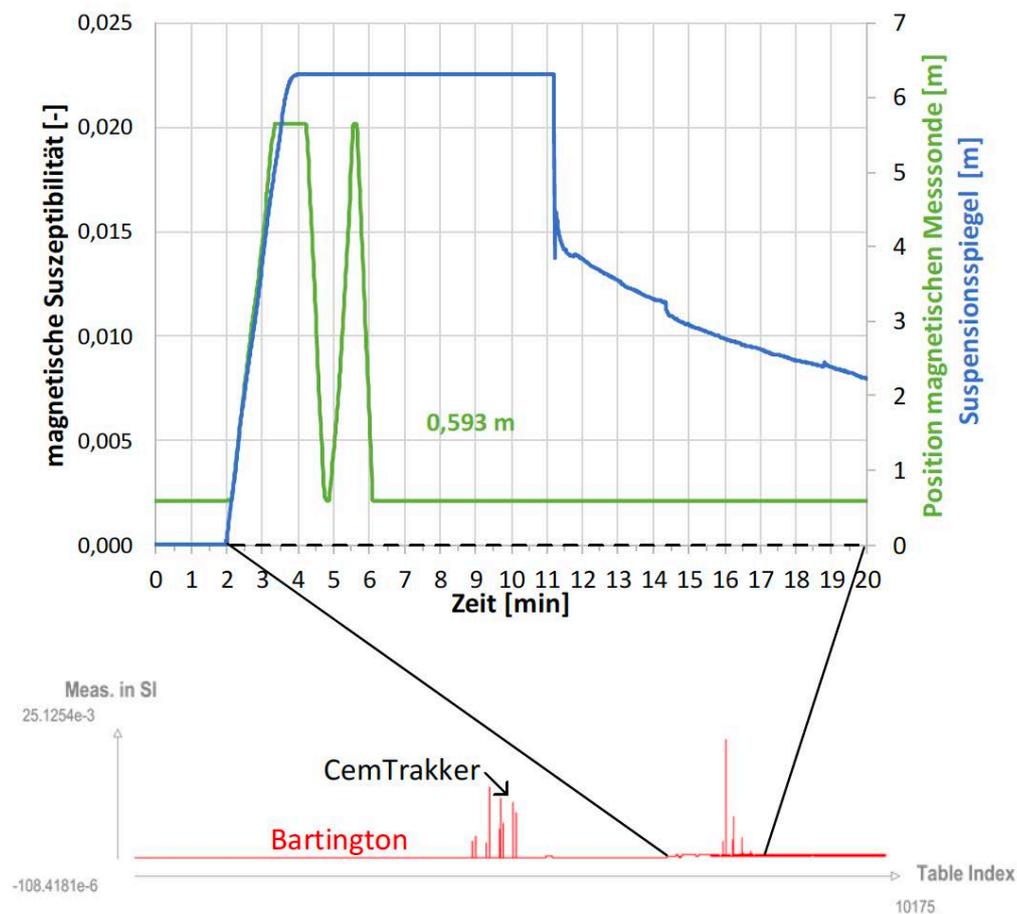


Abbildung 6-250: volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandskontrollversuchs mit dem undotiertem Baustoffe13+ (unten) und die dazugehörigen Suspensionsspiegel und Höhen für die Suszeptibilitätsmessungen (oben)

Hier muss angemerkt werden, dass bei dem Versuch aufgrund von Softwareproblemen nur die grafische Darstellung der Suszeptibilitätsmessungen und keine Messwerte erhalten werden konnten. Trotzdem gut zu erkennen sind in der Abbildung 6-250 (unten) die jeweiligen CemTrakker Messungen, die als deutliche Peaks erkennbar sind. Die Suszeptibilitätswerte sind zwar leicht angestiegen, sind aber ansonsten so gering, dass sie nicht zur Detektion eines Suspensionsspiegels ausreichen. Die CemTrakker Messungen vor und nach dem Hinterfüllen des undotierten Baustoffs13+ sind in der Abbildung 6-251 dargestellt. Die CemTrakker Werte steigen vergleichbar wie die volumetrische magnetische Suszeptibilitäten an und nehmen im Mittel leicht positive Werte an. Aber auch die CemTrakker Werte sind insgesamt zu gering, um im Realfall den undotierte Baustoff 13+ detektieren zu können.

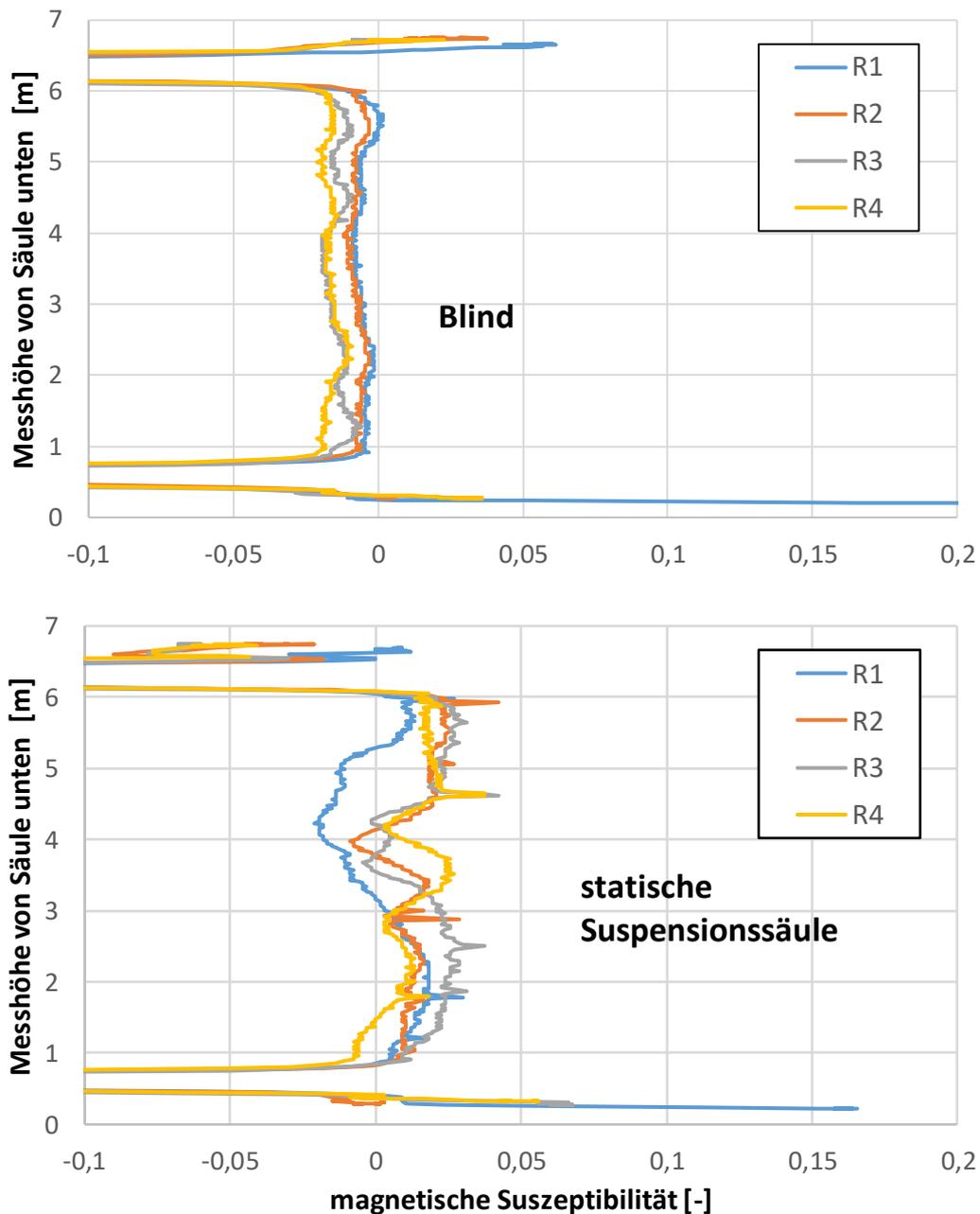


Abbildung 6-251: Höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+ (undotiert), oben: Blindmessungen, unten: Messungen bei statischer Suspensionssäule

Die Korrelation der Dichte und den Wasseranteilen für den Baustoff 13+d ist in der Abbildung 10-7 dargestellt. Mit der Gegenüberstellung kann ausgesagt werden, dass die Baustoffmischung im richtigem W/F Verhältnis angemischt wurde.

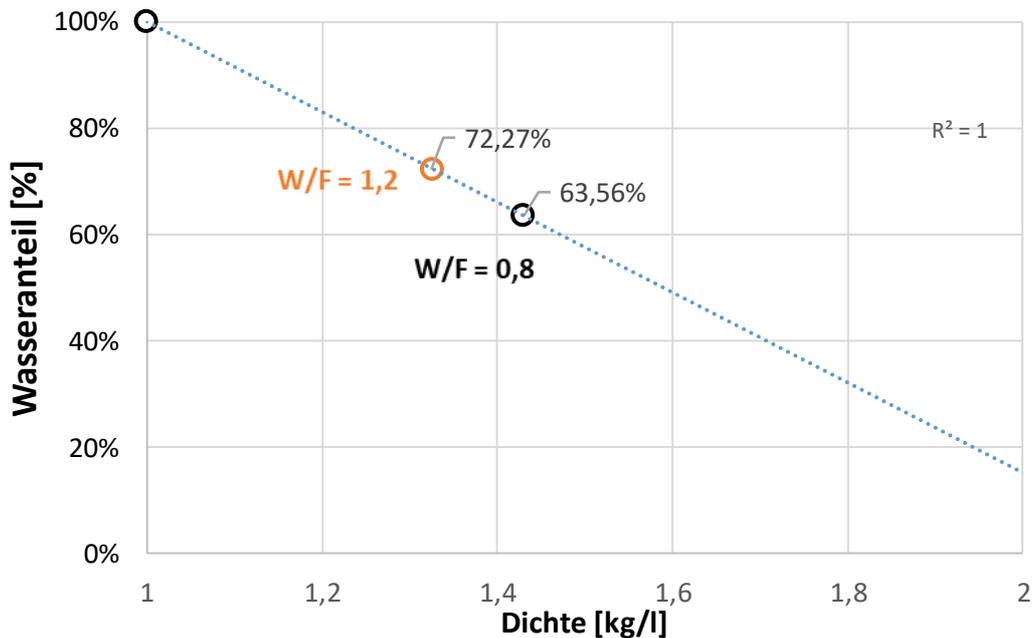


Abbildung 6-252: Korrelation zwischen den gemessenen Dichtewerten und W/F Verhältnissen des Baustoffes 13+d (Mittelwerte bei W/F 0,8)

Die Korrelation der äquivalenten CemTrakker-Werte unter Berücksichtigung der W/F Verhältnisse ist in der Abbildung 6-253 aufgetragen. Wenn der Magnetitanteil im Feststoff bekannt ist, können dann definierte Zielwerte für den CemTrakker und die dazu benötigten Magnetitanteile berechnet werden. In der Abbildung 6-253 wurde davon ausgegangen, dass der Magnetitgehalt im Feststoff beim Baustoff 13+d ~2,5% beträgt.

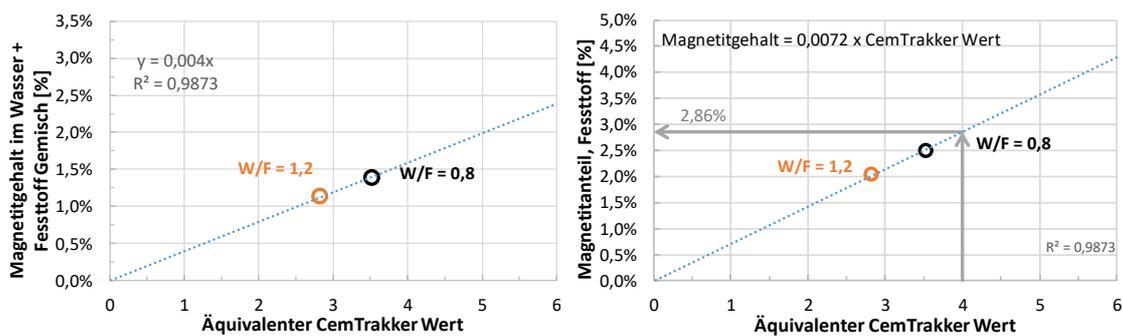


Abbildung 6-253: Korrelation der äquivalente CemTrakker Werte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen W/F Verhältnisse für den Baustoff 13+d (Annahme 2,5% Magnetit, Mittelwerte der Chargen bei W/F 0,8)

Aufgrund des höheren W/F Verhältnis von 0,8 wurde die gleiche Annahme getroffen wie bei den Baustoffen 02d und 07d, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Möchte man unter dieser Annahme den CemTrakker Zielwert auf einen Wert von 4 erhöhen, müsste man einen Magneti-

tanteil im Feststoff von ~2,86% wählen. Dies ist etwas mehr als der angenommenen Magnetitgehalt und zeigt, dass die Dotierung im Baustoff 13+d für den CemTrakker Schwellenwert von 2 am unterem Bereich gewählt wurde.

Der Baustoff 13+d hat die geringste magnetische Suszeptibilität aller untersuchten kommerziellen Baustoffen. Der Baustoff zeigt in allen Versuchen eine Ab- und Anreicherung von Magnetit über die Suspensionssäule, wobei bei korrektem W/F Verhältnis die Magnetitab- und anreicherung weniger relevant ist. Auch im Baustoff 13+d ist der Magnetit nicht homogen über die Höhe verteilt. Mit Hilfe von CemTrakker Messungen in allen Sondenrohren können Rückschlüsse auf nicht sachgerechte W/F Verhältnisse gezogen werden.

6.7.5. Eigenmischungen M3 und M4

Im Folgenden werden die Versuche mit dem Eigenmischungen M3 und M4 direkt verglichen. Die Verläufe der Volumenströme und der Viskositäten können der Abbildung 6-254 entnommen werden.

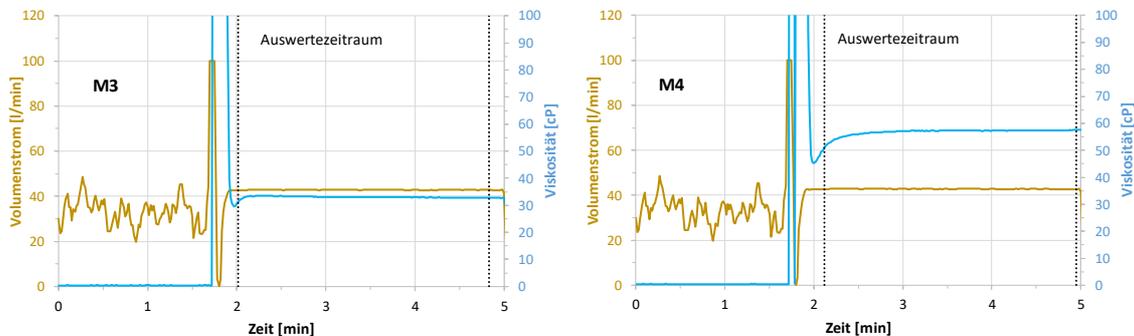


Abbildung 6-254: Volumenstrom und Viskosität des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4 im Vergleich (40 l/min), Fokus Verpressphase

Die wenig sedimentationsstabile Eigenmischung M3 besitzt aufgrund ihrer Eigenschaften eine geringere Viskosität als die Referenzmischung M4. Beide Versuche mit den Eigenmischungen wurde mit einem Volumenstrom von ~40 l/min durchgeführt. Die dazugehörigen wesentlichen Parameter und Daten für die Versuche mit den Eigenmischungen können der Tabelle 6-54 entnommen werden. Die Eigenmischungen haben im Vergleich zu den kommerziellen Mischungen den höchsten Feststoffanteil (W/F von 0,28) und dementsprechend auch eine im Vergleich höhere Dichte (siehe auch Abbildung 10-30 im Anhang). Die Eigenmischung M3, die extra wenig sedimentationsstabil konzipiert wurde, hat ein Absetzmaß von 7%, während die optimierte Mischung M4 kein Absetzmaß zeigte. Die Temperaturverläufe für beide Versuche können der Abbildung 10-31 im Anhang entnommen werden.

In der Abbildung 6-255 und Abbildung 6-256 sind die Verläufe der gemessenen volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten für die Versuche mit dem dotierten Baustoffen dargestellt. Sehr gut zu erkennen ist, dass die wenig sedimentationsstabile Mischung M3 sich über die Zeit sehr stark entmischt. In der Ruheposition des Messringes nimmt die Suszeptibilität über die Zeit zu dem erheblich zu (siehe auch Abbildung 10-32 und Abbildung 10-34 im Anhang. Die Eigenmischung M3 erfüllt somit die an sie gestellten Anforderungen. Sie zeigt ein sehr starkes Entmischungsverhalten. Die optimierte Eigenmischung M4 zeigt aber ähnlich wie alle untersuchten kommerziellen Baustoffe eine höhenpezifische Ab- und Anreicherung von Magnetit (Abbildung 6-256 unten). Bei der Eigenmischung M4 scheint ebenso die Ab- und Anreicherung beim Verpressen oder unmittelbar nach dem Verpressen stattzufinden.

Der Verlauf der Messwerte während der Verpressphase ist wiederum abhängig davon, in welchen Abstand der Messring zum sich entwickelnden Suspensionsspiegel nach oben geführt wird (Abbildung 6-257/Abbildung 6-236). Außer der Abstandsabhängigkeit zeigen die Eigenmischungen keine signifikanten Unterschiede beim Erkennen eines Suspensionsspiegels.

Tabelle 6-54: Vergleich von gemessenen und berechneten Parametern der Füllstandkontrollversuche mit dem Eigenmischungen M3 und M4 (40 l/min)

Bezeichnung	Einheit	~40 l/min	~40l/min
Baustoff		M3	M4
Dauer Verpressen	min:sec	02:57	03:08
Eintritt Bart. - Signal bei Säulenaustritt	min:sec	02:32	01:28
Dauer Verpressen in Säule (EWS)	min:sec	01:48	01:48
Dauer Hochfahren Sonde	min:sec	01:19	01:23
Differenz (Säule - Hochfahren)	min:sec	00:29	00:25
ρ_{Waage} (Dichtewaage)	g/cm ³	1,990	2,015
$\rho_{Vorgabe}$ (Datenblatt)	g/cm ³	2,000	2,000
ρ_{Druck} (P_{mess} (statisch und Höhe))	g/cm ³	2,042	2,042
$\rho_{Coriolis}$	g/cm ³	1,972	1,980
Differenz ($\rho_W - \rho_C$)	g/cm ³	0,018	0,035
Differenz ($\rho_W - \rho_D$)	g/cm ³	-0,052	-0,027
Differenz ($\rho_W - \rho_V$)	g/cm ³	-0,010	0,015
P (ρ_W + bekannte Höhe)	bar	1,232	1,248
P _C (ρ_C)	bar	1,195	1,200
P _{mess}	bar	1,238	1,238
Differenz (P - P _C)	bar	0,037	0,047
Differenz (P - P _{mess})	bar	-0,005	0,010
H _{Ablauf} (Höhe)	m	6,313	6,313
H _{Waage} (ρ_W)	m	6,339	6,261
H _{Druck} (ρ_C)	m	6,397	6,370
Differenz (H _A - H _W)	m	-0,026	0,052
Differenz (H _A - H _D)	m	-0,084	-0,057
mittlerer Volumenstrom	l/min	42,812	43,041
mittlere Viskosität	cP	33,023	56,806
mittlere Verpressgeschwindigkeit	m/min	3,492	3,511
Dauer Verpressen virtuelle 100 m Sonde	min:ss	28:38	28:29
Chargenbezeichnung	-	M3 (1-6)	M4 (1-6)
Absetzmaß nach 1h	%	7	0
Absetzmaß nach 24h	%	7	0
Suspensionstemperatur	°C	14,9	15
Wasser/Feststoff Verhältnis	-	0,28	0,28
Auslaufzeit (Marsh-Trichter)			
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 1	min:sec,ss	02:00:31	03:08:19
Zeit für ein 1 Liter Durchlauf, Messung 2	min:sec,ss	-	-
Restlaufzeit, Messung 1	min:sec,ss	01:43:22	02:56:31
Restlaufzeit, Messung 2	min:sec,ss	-	-

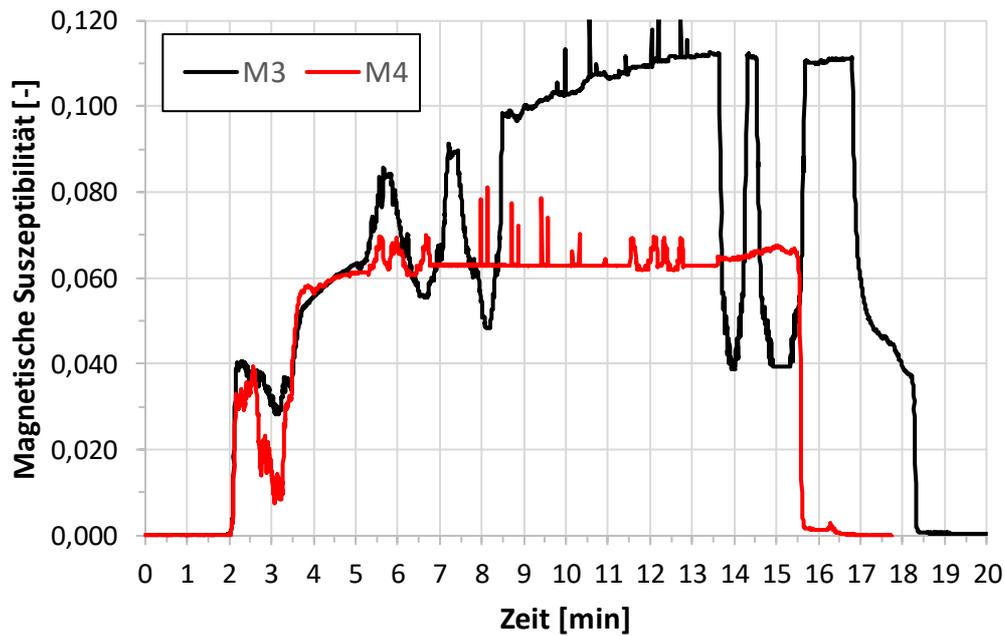


Abbildung 6-255: Verlauf der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit den Eigenmischungen M3 und M4 im Vergleich (40 l/min)

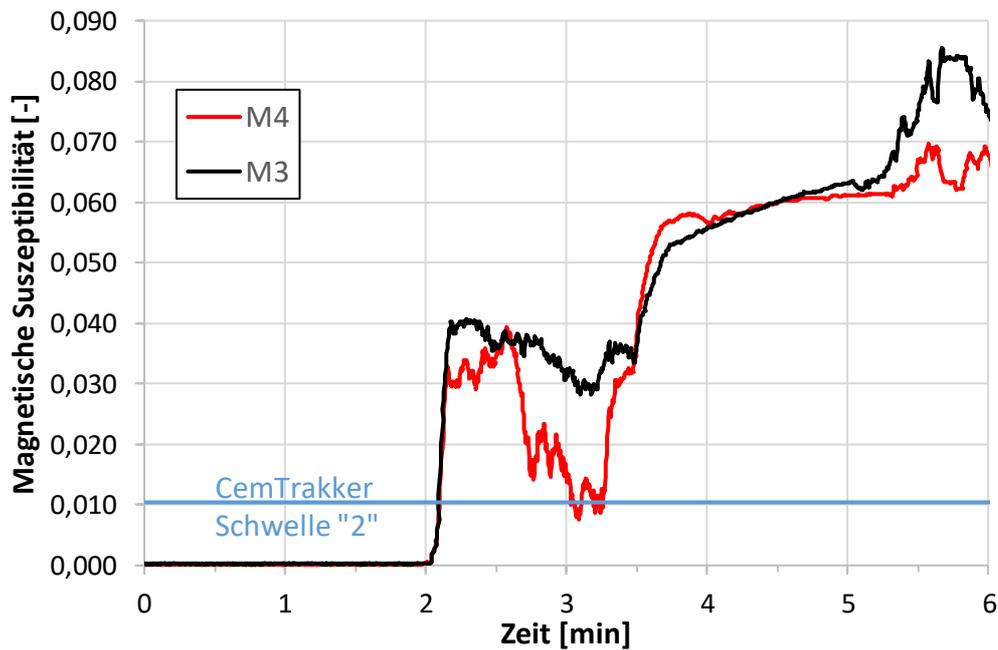


Abbildung 6-256: Verlauf der volumetrische magnetische Suszeptibilitäten der Füllstandkontrollversuche mit den Eigenmischungen M3 und M4 im Vergleich (40 l/min), Fokus Verpressphase

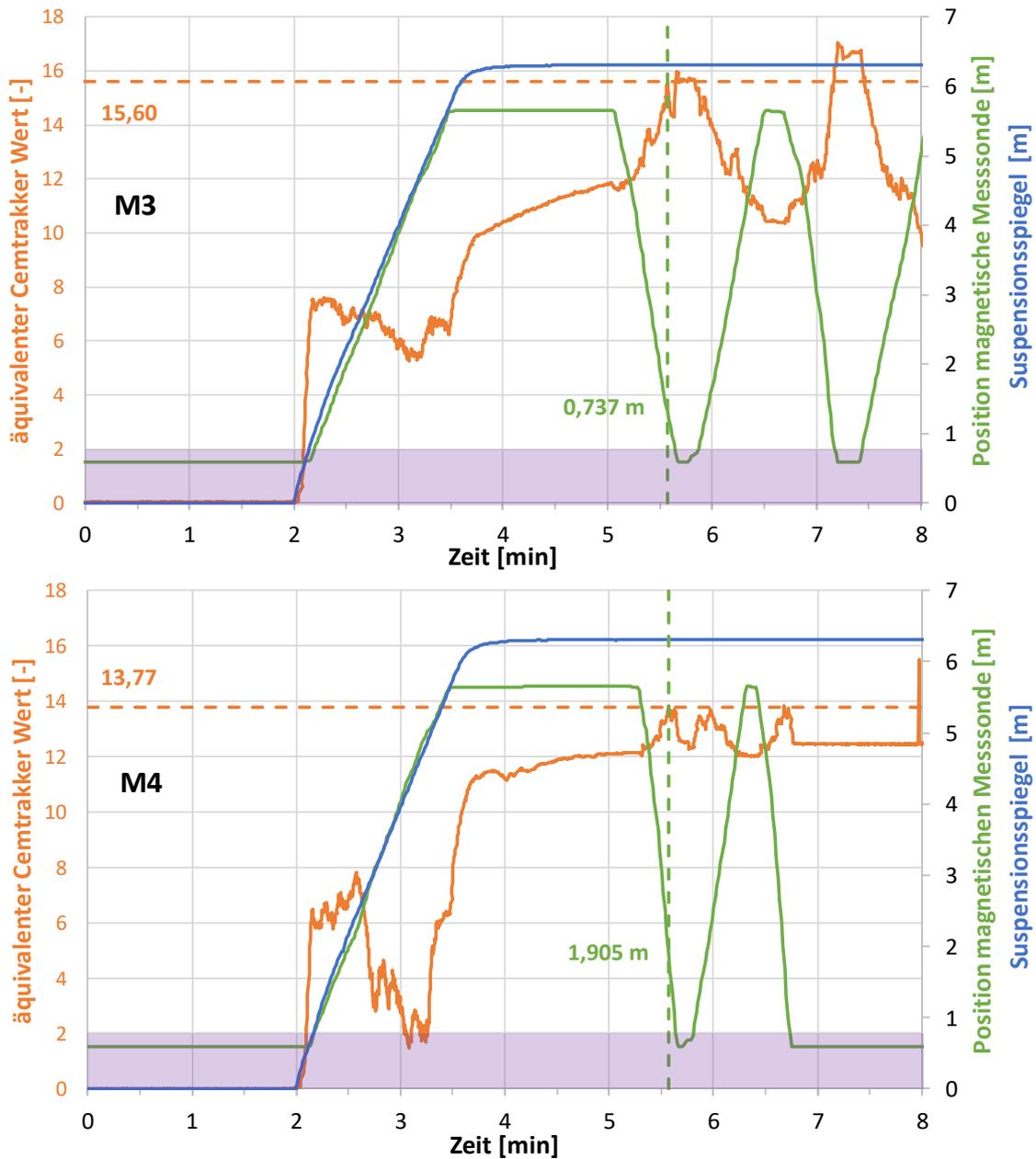


Abbildung 6-257: Verlauf der äquivalenten CemTrakker-Werte der Füllstandkontrollversuche mit den Eigenmischungen M3 und M4 im Vergleich, Fokus Verpressphase

Das extrem starke Entmischungsverhalten der Eigenmischung M3 konnte während des Verpressvorgangs nicht erkannt werden. Wenn man die CemTrakker Schwelle von 2 bei 50% der mittleren volumetrischen CemTrakker Äquivalente festlegt, dann ist die Schwelle für die Eigenmischungen M3 und M4 sehr hoch angesetzt (Abbildung 6-258, Mittelwert ~ 6). Die Unterschiede in den äquivalenten CemTrakker Werten ergeben sich durch die individuell bestimmten Umrechnungsfaktoren. Die CemTrakker Messungen sind weniger reproduzierbar, erfassen immer nur einen gewissen räumlichen Bereich um den jeweiligen Sondenstrang und sind somit weniger repräsentativ

und fehlerbehafteter. Dies führt bei der Umrechnung in CemTrakker Äquivalente zu einer größeren Ungenauigkeit.

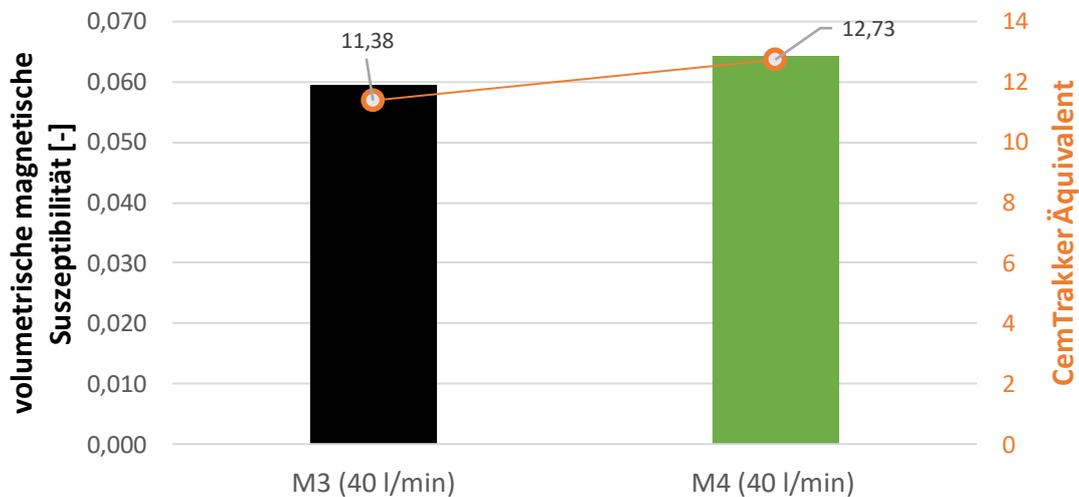


Abbildung 6-258: Mittlere volumetrische magnetische Suszeptibilitäten und dazugehörige CemTrakker Äquivalente der Füllstandkontrollversuche mit den Eigenmischungen M3 und M4 im Vergleich

Bei beiden Versuchen gibt es eine Abreicherung von Magnetit von oben nach unten (Abbildung 6-259). Die prozentuale Abnahme (Maximum zu Minimum) ist der optimierten Eigenmischung ca. 10% (orangene Kurve) und damit z. B. genauso groß wie beim Baustoff 13d bei sachgerechtem W/F Verhältnis von 0,8.

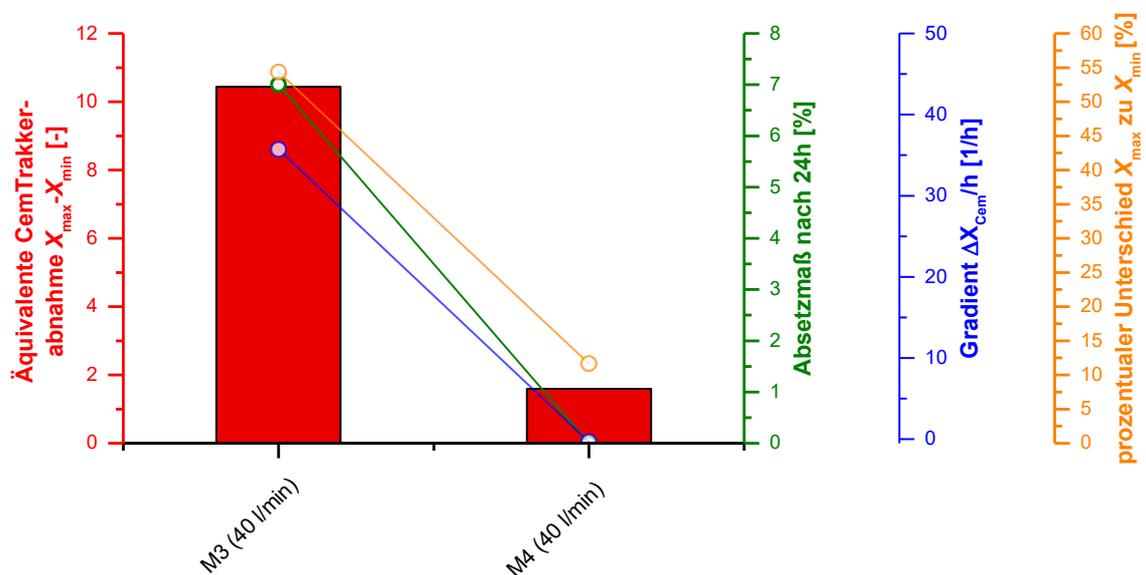


Abbildung 6-259: Gegenüberstellung der Differenz in den äquivalenten CemTrakker-Werten, den Absetzmaßen und der Werten aus der Gradientenanalyse der Füllstandkontrollversuche mit den Eigenmischungen M3 und M4 im Vergleich (mittlere Abnahme über die Zeit)

Die Gradientenanalyse ergibt bei der Eigenmischung M3 die höchste hochgerechnete CemTrakker-Äquivalentzunahme aller durchgeführten Versuche (blaue Kurve).

Die höhenspezifischen CemTrakker-Werte und Äquivalente sind für die Versuche mit den Eigenmischungen M3 und M4 in der Abbildung 6-260/Abbildung 6-239 dargestellt.

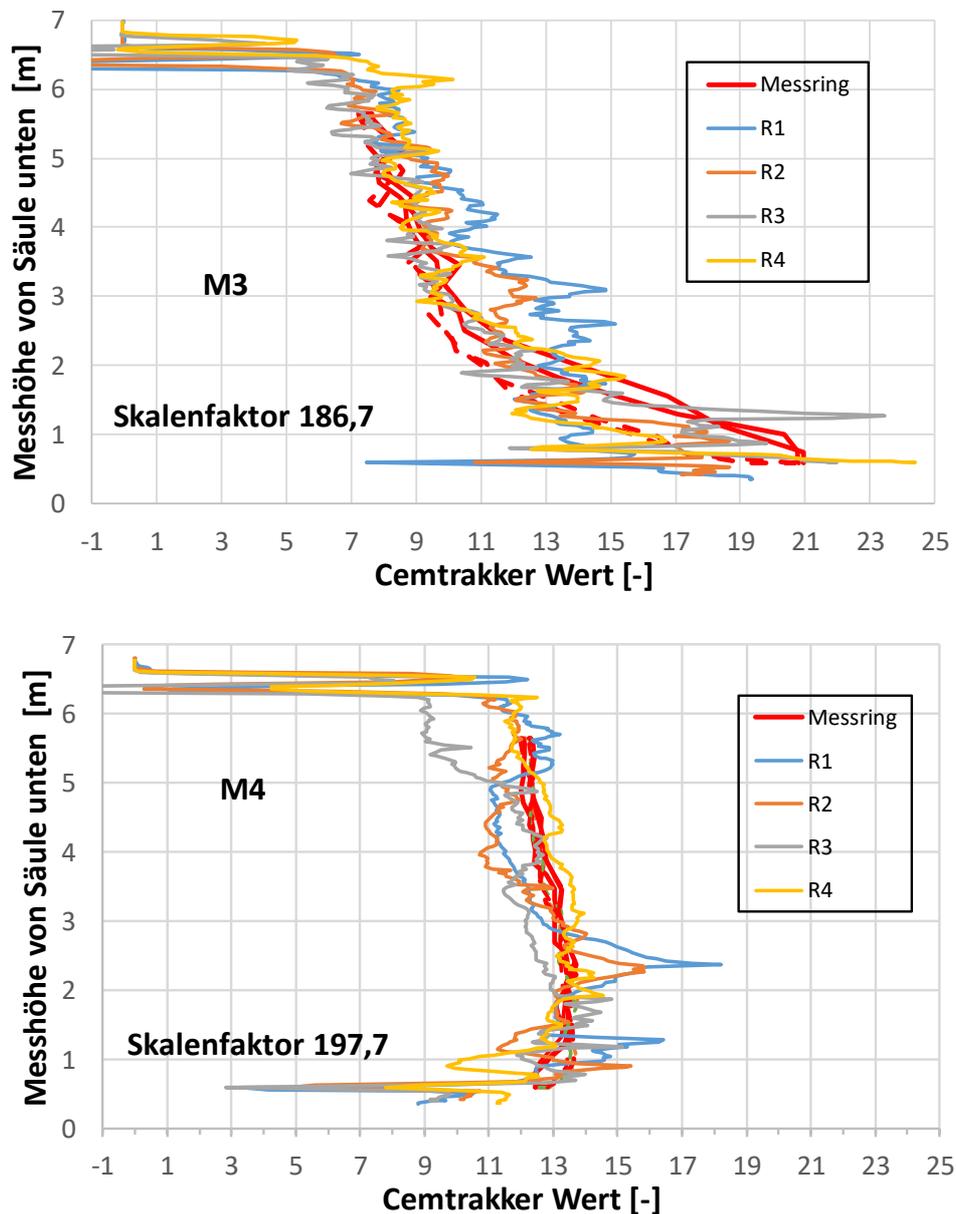


Abbildung 6-260: Umgerechnete höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten im Vergleich zu den gemessenen CemTrakker-Werten nach Verpressen des Eigenmischungen M3 und M4 im Vergleich

Die Höhenprofile korrelieren auch in erster Annäherung mit dem Verlauf der volumetrischen magnetischen Äquivalentwerte. Die optimierte Mischung M4 ist dabei vergleichbar mit den Versuchen der kommerziellen Baustoffe, wenn diese mit korrektem W/F Verhältnis angerührt wurden. Die

Mischung M3 zeigt das stärkste Magnetitabsetzen von oben nach unten aller untersuchten Mischungen. Die Eigenmischungen M3 und M4 ergeben erheblich höhere magnetischen Messwerte als die untersuchten kommerziellen dotierten Baustoffe. Aus den Untersuchungen im Kapitel 6.6.1.11 zeigt sich zwar, dass hohe Dotierungen hilfreich sein können, um Fehlstellen erkennen zu können, aber in Bezug auf die Detektion eines Suspensionsspiegels sich anhand der durchgeführten Versuche keine Vorteile eines hohen magnetischen Signals erkennbar. Die Versuche zeigen, dass extrem sedimentationsinstabile Baustoffe anhand der CemTrakker Messungen erkannt werden können, wobei angemerkt werden muss, dass dies bedingt nur für die hohen Messwerte der Eigenmischung ausgesagt werden kann. Ob erheblich niedrigere Dotierungen ähnliche Resultate ergeben, kann anhand des Versuches mit der Eigenmischung M3 nicht ausgesagt werden. Zu den magnetischen Messwerten siehe zudem die Abbildung 10-32, Abbildung 10-33 und Abbildung 10-34 sowie die Tabelle 10-7 und Tabelle 10-8 im Anhang.

6.7.6. Bewertung und Fazit der Füllstandkontrollversuche

Die äquivalente CemTrakker Werte und volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten aller Füllstandkontrollversuche mit dotierten Material kann der Abbildung 6-261 entnommen werden.

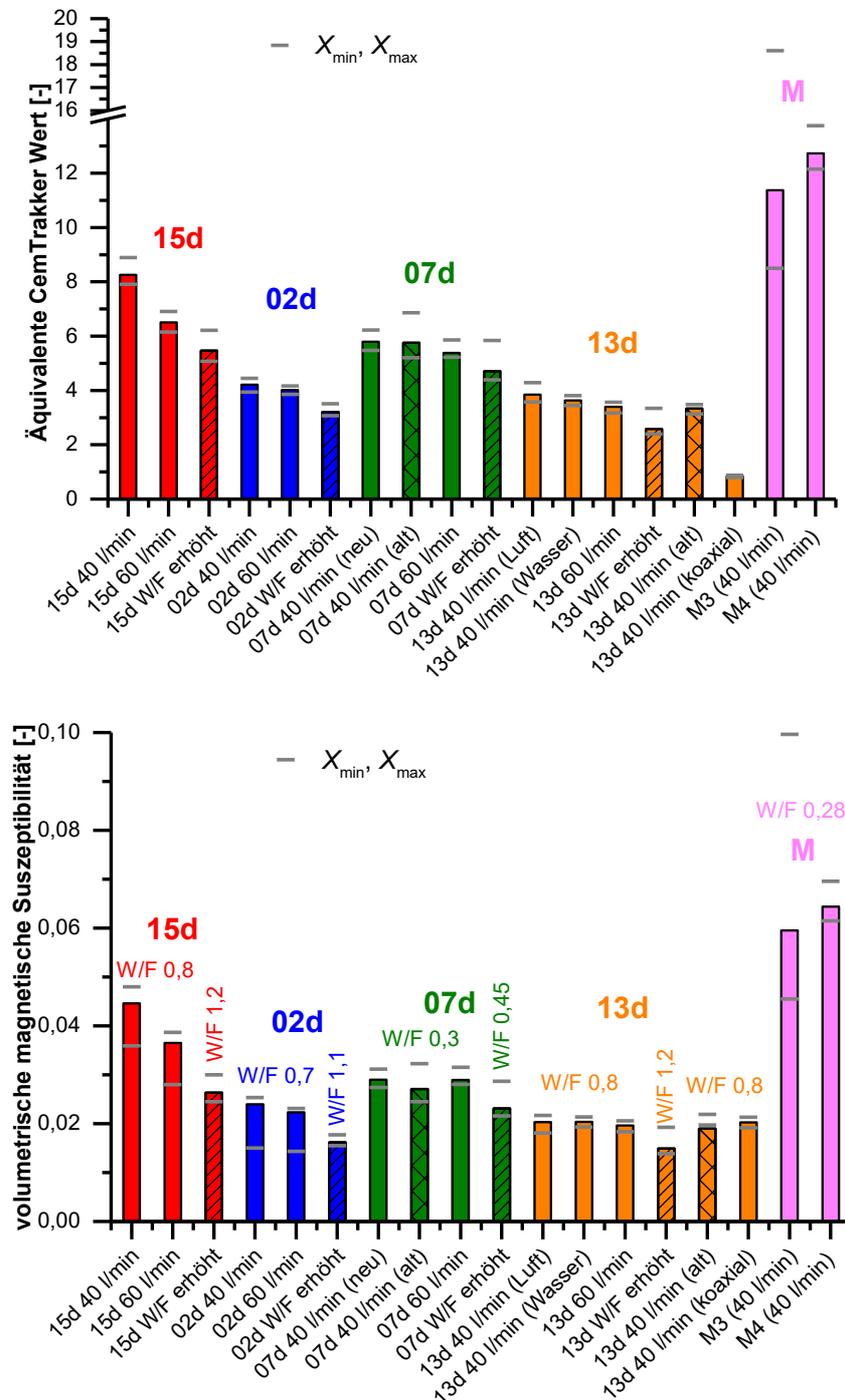


Abbildung 6-261: Umgerechnete äquivalente CemTrakker Werte (oben) und volumetrische magnetischen Suszeptibilitäten (unten) der Füllstandkontrollversuche im Vergleich

Die Unterschiede in den umgerechneten äquivalenten CemTrakker Werte in der Abbildung 6-261 (oben) ergeben sich aus den individuellen unterschiedlichen Umrechnungsfaktoren, die sich aus den CemTrakker Messungen bei stabiler Suspensionssäule ergeben haben. Die Umrechnung ist sicherlich nicht exakt, da die CemTrakker Sonde maximal eine Messreichweite von ~2 cm besitzt und damit nicht den gesamten Säulenquerschnitt erfasst. Die Korrelation wurde aber trotzdem gemacht, um die CemTrakker Messwerte mit den volumetrischen und den gesamten Querschnitt erfassenden volumetrischen magnetischen Suszeptibilitätsmessungen des Bartington Messringes vergleichbar zu machen. Damit kann der in der Praxis verwendete CemTrakker Schwellenwert von 2 für das Erkennen eines Suspensionsspiegels bewertet werden. Die Problematik des CemTrakker Schwellenwerts zeigt sich insbesondere bei den CemTrakker Messungen in der Koaxialsonde. Dort erhält man trotz praktisch gleicher volumetrischen Suszeptibilitäten (Erfassung gesamter Querschnitt) aufgrund des größeren Rohrdurchmesser der Koaxialsonde im Vergleich zu den sonst untersuchten Doppel-U-Rohr Sonden einen CemTrakker Wert kleiner als 1 (Abbildung 6-261, oben). Dieser geometrische Faktor gilt es bei den CemTrakker Messungen zu berücksichtigen, wenn Erdwärmesondenrohre abweichend von 32 mm Durchmesser verwendet werden. Es sollten neue Schwellenwerte in Abhängigkeit vom Durchmesser der Sondenrohre ermittelt und angegeben werden.

Die volumetrischen magnetischen Suszeptibilitätsmessungen sind besser dazu geeignet, die Versuche untereinander zu vergleichen, aufgrund der Tatsache, dass der gesamte Säulenquerschnitt mit dem aufgeprägten Magnetfeld erfasst wird (Abbildung 6-261, unten). Die Eigenmischungen haben einen bekannten Magnetitanteil von 2,5%. Von allen untersuchten Baustoffen haben die Eigenmischungen die höchsten magnetische Suszeptibilitäten. Für die Eigenmischungen wurden durch umfangreiche Voruntersuchungen und Tests optimale Magnetitkörnungen in Abhängigkeit der Höhe der magnetischen Suszeptibilitäten ausgewählt (siehe Kapitel Eigenmischungen). Die Eigenmischungen haben zudem das geringste Wasser/Feststoff Verhältnis im Vergleich zu den untersuchten kommerziellen Baustoffen.

Die ungefähren Magnetitgehalte in den kommerziellen Baustoffen wurden abgeschätzt bzw. bewertet (Abbildung 6-262, teilweise wurden die ungefähren Anteile von den Baustoffherstellern dem Konsortium mitgeteilt). Die schwarze Bezugslinie ergibt sich aus des angenommenen und bekannten Magnetitanteilen (Regressionsgerade durch den Ursprung, siehe auch vorherige Kapitel zu den jeweiligen Baustoffen). Bei der Korrelation gilt es zu berücksichtigen, dass nur bei den Eigenmischungen genaue Details zum verwendeten Magnetit bekannt sind. In der Abbildung 6-262 wurde quasi virtuell angenommen, dass alle untersuchten kommerzielle Baustoffe ihre Magnetite aus derselben Quelle beziehen. Die magnetischen Messsignale sind nicht nur individuell von der verwendeten Qualität des Magnetits abhängig (Reinheit, etc.), sondern auch von den verwendeten Partikelgrößen und Ausbildung und Reinheit des verwendeten Magnetits (siehe Kapitel 4.3.7). Es ist deshalb durchaus denkbar, dass unterschiedliche Messwerte in den kommerziellen Baustoffen durch unterschiedliche Magnetite (andere Lagerstätte, etc.) hervorgerufen werden. In der in der Abbildung 6-262 wurde zudem davon ausgegangen, dass die magnetische Suszeptibilität linear zum Magnetitgehalt ansteigt. Dies muss nicht notwendigerweise der Fall sein. Gerade im Bereich sehr niedrigerer Messwerte muss eine gewisse Magnetisierbarkeit vorhanden sein, um überhaupt ein externes Magnetfeld aufprägen zu können (z.B. Svoboda 1987).

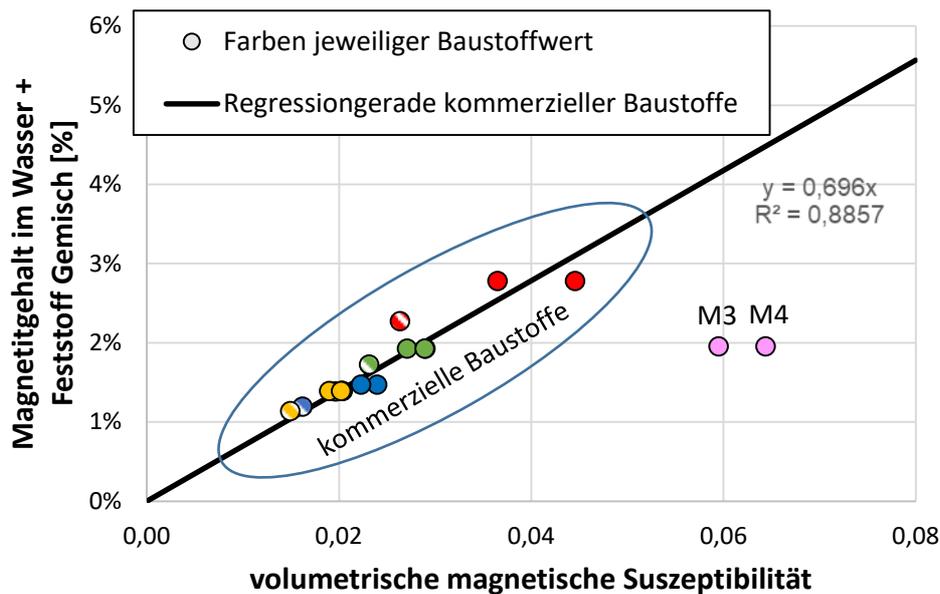


Abbildung 6-262: volumetrische magnetischen Suszeptibilitäten in Beziehung zum Magnetitgehalt im Wasser- und Feststoffgemisch der Füllstandkontrollversuche mit dotiertem Baustoff (Annahmen: 5% Magnetitfeststoffanteil für die Eigenmischungen und den Baustoff 15d sowie 2,5% Magnetitfeststoffanteil für alle anderen Baustoffe)

Aber die Korrelation in der Abbildung 6-262 scheint plausibel. Von den kommerziellen Baustoffen hat der Baustoff 15d die höchste magnetische Suszeptibilität, wobei beim Baustoff 15d große Abweichungen in den Baustellenchargen ermittelt wurden. Für den Baustoff 15d wurde ein Magnetitanteil im Feststoff ~5% von angenommen (rote Punkte). Bei allen anderen kommerziellen Baustoffen scheint dann exakt der gleiche Magnetitanteil von ca. 2,5% verwendet worden zu sein und dies unabhängig vom verwendeten und vorgeschriebenen W/F Verhältnis. Das heißt, der Baustoff 13+d hat bei korrekt verwendetem W/F Verhältnis (orangene Punkte) die geringsten magnetischen Suszeptibilitäten (die nicht schraffierten Punkte markieren korrekte W/F Verhältnisse und die schraffierten nicht sachgerechte W/F Verhältnisse), da der Baustoff 13+d mit dem höchsten W/F Verhältnis angerührt wurde. Der Baustoff 07d mit dem W/F Verhältnis von 0,3 (grüne Punkte) hat demnach höhere Messwerte als der Baustoff 02d mit dem W/F Verhältnis von 0,7 (blaue Punkte). Der Unterschied in den W/F Verhältnissen ist bei den Baustoffen 02d und 13+d gering, so dass die magnetischen Messwerte auch relativ nahe beieinanderliegen. Die Untersuchungen mit dem Baustoff 07d und 13+d aus Kapitel 6.6.1.1 an den Pulverproben zeigen zwar, dass tatsächlich die Baustoffe nicht exakt die gleichen Werte liefern, trotzdem wurde für den Vergleich davon ausgegangen, dass alle kommerziellen Baustoffe denselben Magnetitanteil besitzen. Wie aus Kapitel 4.1.3 hervorgeht, wurden für die Eigenmischungen Magnetitchargen ausgewählt, die die höchsten magnetischen Suszeptibilitätswerte ergaben. Offensichtlich scheinen die kommerziellen Hersteller Magnetitchargen mit geringeren Suszeptibilitäten zu verwenden. Dadurch können die erheblich höheren Messwerte erklärt werden (violette Punkte, eine Korrelation mit den kommerziellen Baustoffen ergibt deshalb auch keinen Sinn). Der Unterschied in der Höhe der magnetischen Suszeptibilitäten bei gleichem Magnetitanteil im Wasser/Feststoffge-

misch zeigt, dass mit der optimalen Auswahl der Magnetitchargen und -partikelverteilung der Anteil an Magnetit in den Mischungen erheblich reduziert werden kann. Rechnerisch ergebe sich für ein CemTrakker Äquivalenzwert von 4 ein notwendiger Magnetitanteil von nur 0,9% (Abbildung 6-263).

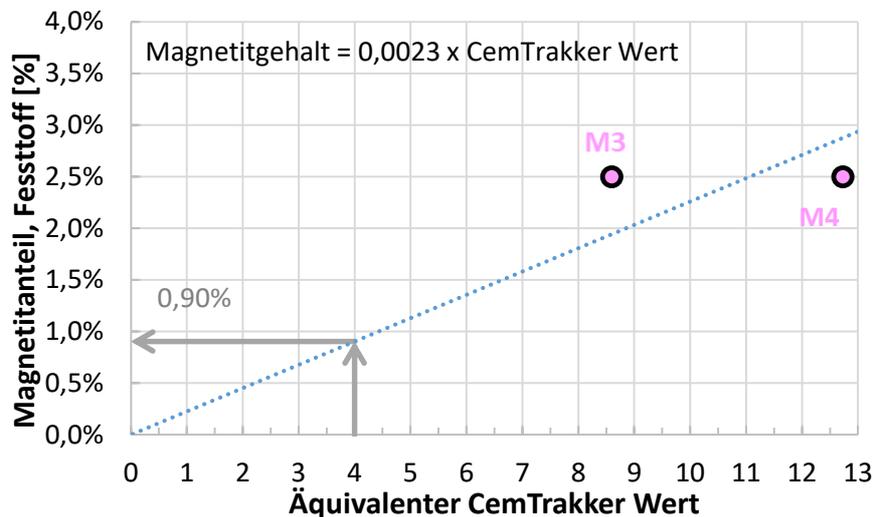


Abbildung 6-263: Korrelation der äquivalenten CemTrakker in Bezug zum Magnetitanteil der Eigenmischungen M3 und M4

Die Beziehung aus 2 Messwerten mit der Regression durch den Ursprung kann sicherlich hinterfragt und angezweifelt werden, aber es zeigt trotzdem, dass ein erhebliches Reduktionspotential bei den verwendeten Magnetitanteilen vorhanden ist. Denn es sollte unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten das Ziel sein, möglichst wenig hochwertige und nicht ressourcenschonende Zusatzstoffe in den Hinterfüllbaustoffen einzusetzen. Den Baustoffherstellern ist deshalb zu empfehlen, Magnetitchargen mit möglichst hohen Ausgangsuszeptibilitäten zu verwenden. Zudem sollten die Baustoffhersteller mittels geeigneter Messtechnik möglichst Eingangskontrollmessungen durchführen, um Variationen in den magnetischen Suszeptibilitäten angeben und am besten vermeiden zu können.

Die Auswertung der Messwerte zeigt die Problematik des in der Praxis festgelegten CemTrakker Schwellenwertes. Die Unterschiede in den jeweiligen spezifischen magnetischen Suszeptibilitäten bewegen sich in einem signifikanten Bereich. Zu hoch dotierte Baustoffe können eine vollständige Hinterfüllung suggerieren. Zudem kann der CemTrakker Schwellenwert von 2 dazu führen, dass die Sonde oberhalb des eigentlichen Suspensionsspiegel nach oben geführt wird und damit fehlerhafte tiefenorientierte Verpressprotokolle erstellt werden. Zu niedriger magnetische Suszeptibilitätswerte können dagegen dazu führen, dass die Sonde weit unterhalb des eigentlichen Suspensionsspiegel nach oben geführt mit dem gleichen Ergebnis eines fehlerbehafteten Verpressprotokolls. Bei statischer Suspensionssäule können niedrigere Werte dann eine nicht komplette Hinterfüllung andeuten, obwohl diese nur aufgrund einer niedrigen Dotierung hervorgerufen werden. Deshalb scheint die Angabe von baustoffspezifischen magnetischen Messwerten auf den Datenblättern der Baustoffhersteller angebracht. Individuelle CemTrakker Schwellenwerte für unterschiedliche Bauformen (Durchmesser Sonden), etc. wären ebenso sinnvoll. Eine

andere Möglichkeit besteht darin, dass sich die Hersteller auf einen magnetischen Zielwert in ihren Mischungen einigt. Wie aus der Abbildung 6-262 hervorgeht, bietet sich die Möglichkeit die Magnetitgehalte über die W/F Verhältnisse der Baustoffe aufeinander anzupassen. Die Voraussetzung hierfür wäre allerdings, dass die verwendeten Magnetite in den Baustoffen immer die gleichen Qualitäten und Eigenschaften besitzen. Kann ein gleichbleibender Messwert nicht garantiert werden, ist eine individuelle Messung jeder Baustoffcharge zu empfehlen (wie im Beispiel des Versuchs mit dem Baustoff 15d, Unterschied >1 im CemTrakker Wert!).

Alle Versuche ergaben keine homogenen magnetischen Suszeptibilitätsverteilung von oben nach unten. Es zeigten sich immer eine gewisse Ab- und Anreicherung von Magnetit von oben nach unten, wobei die Minima tendenziell in höheren Metern, aber meist nicht am höchsten Messpunkt, und die Maxima meist nicht am niedrigsten Messpunkt festgestellt wurden. Alle kommerziellen Baustoffe bei sachgerechtem W/F Verhältnis und überstehender Wassersäule sowie die optimierte Eigenmischung M4 und die gealterte Baustoffmischung 13+d zeigen ähnliche prozentuale Unterschiede der gemessenen Minimal und Maximalwerte (± 10 Prozent, Abbildung 6-264).

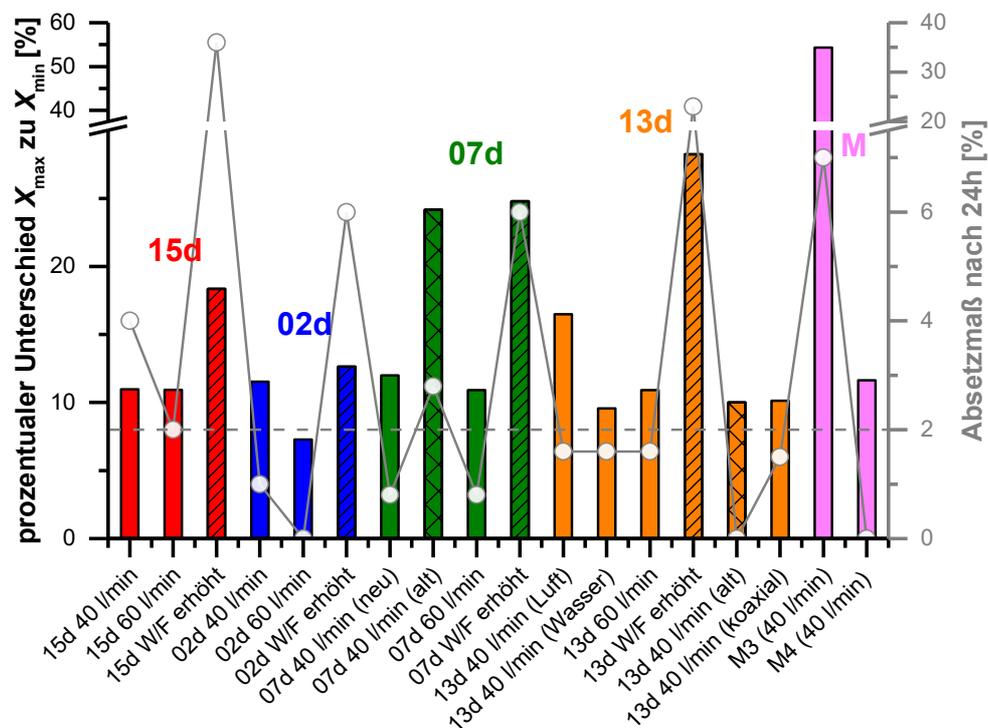


Abbildung 6-264: Prozentuale Unterschiede der Maxima und Minima von den volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten sowie die dazugehörigen Absetzmaße der Füllstandkontrollversuche

Das Verhalten scheint demnach baustoffunabhängig zu sein. Über Blindmessungen können externe Einflüsse auf die Messungen ausgeschlossen werden. Die Separation und Sedimentation unterschiedlichen schwerer Partikeln könnte eine Erklärung für die Ab- und Anreicherung von Magnetit sein. Magnetit hat eine hohe Dichte von $>4,9 \text{ g/cm}^3$ und ist damit auch das schwerste Inhaltsstoff. Dadurch ergibt sich ein starker Dichteunterschied in der Suspension. Deshalb ist auch nicht verwunderlich, dass generell zunehmende magnetische Suszeptibilitäten von oben

nach unten gemessen wurden. Der Übergangsbereich zwischen der Suspension und dem überstehenden Wasser ist keine klar erkennbare Trennfläche zweier Medien unterschiedlicher Dichte. Es entwickeln sich vielmehr diffuse Übergangszonen (Abbildung 6-265). Es bilden sich Verwirbelungen und auf- und absteigende Partikelzonen. Es entwickeln sich komplexe heterogene Strömungsbedingungen in der Säule, die sich vermutlich verschieden auf unterschiedlich schwere Partikel auswirken. Im Falle des Magnetits ist der Dichtekontrast zu den anderen Inhaltsstoffen besonders hoch und deshalb eine heterogene Verteilung in der Suspension am wahrscheinlichsten.

Der Versuch mit der überstehenden Luft (13+d 40 l/min) zeigt eine etwas höhere Differenz zwischen den Maximal- und Minimalwerten. Aufgrund der fehlenden diffuse Übergangszone aus Wasser und Suspension, in der Partikel auf und abströmen können, ergibt sich vermutlich die klarere Ab- und Anreicherung von Magnetit (oben niedrigster Wert, unten höchster Wert). Das Ab- und Anreichern der Magnetitpartikel findet schon beim oder unmittelbar nach dem Hinterfüllvorgang statt. Bei sachgerechtem W/F Verhältnis konnte in allen untersuchten Baustoffen bis auf die gealterte Charge des Baustoffes 07d kein weiteres signifikantes Absetzen bei statischer Suspensionssäule im Untersuchungszeitraum ermittelt werden. Ein nicht zulässiges Absetzmaß korreliert mit einem höheren prozentualen Unterschied in den Maxima- und Minima. Die einzige Ausnahme stellt der Versuch mit dem Baustoff 15d bei 40 l/min Volumenstrom dar. In diesem Fall korreliert das zulässige Absetzmaß von 4 nicht mit einem erhöhten prozentualen Unterschied. Trotzdem kann festgehalten werden, dass magnetischen Messungen, als Kriterium für nicht sachgerechten Hinterfüllungen herangezogen werden können. Auch in gealterten Baustoffen können mit magnetischen Untersuchungen Veränderungen nachgewiesen werden, wie im Falle des Baustoffs 07d aufgezeigt wurde. Generell positiv zu bewerten ist, dass sich die optimierten Mischung M4 und die kommerziellen Baustoffe im Magnetitab- und anreicherungsverhalten nicht wesentlich unterscheiden.

Angemerkt werden muss aber, inwieweit die Ergebnisse der Füllstandkontrollversuche auf einen Hinterfüllvorgang in der Praxis eins zu eins übertragen werden kann, kann nicht abschließend geklärt werden. In einer realen Sonden hinterfüllung herrschen ja nach Untergrundverhältnissen und verwendeten Sondentypen und Bohrverfahren (etc.) andere Bedingungen vor, wie z. B. variierende Drücke (Überlagerungs-, Verpress und Strömungsdrücke) und einströmende Wässer, filtrierende Wasseranteile aus der Suspension in den Untergrund und unterschiedliche Bohrdurchmesser, etc. vor. Trotzdem kann festhalten werden, dass mit dem aufgebauten Prüfstand und den durchgeführten Versuchen reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse erzielt wurden. Der Prüfstand ist eine hervorragende Basis für weitere vertiefende und angepasste Füllstandkontrollversuche.

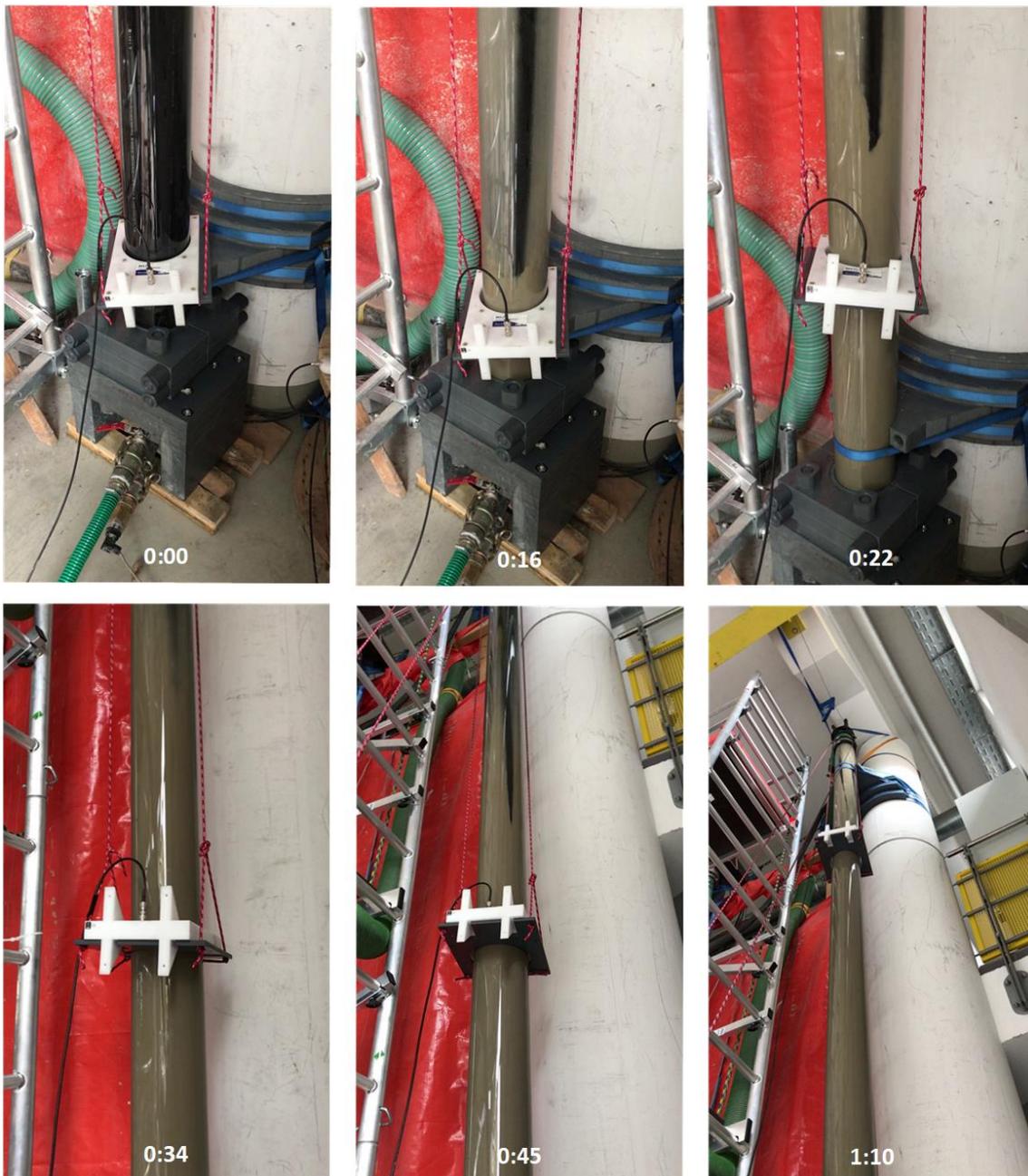


Abbildung 6-265: Übergangszone zwischen Wasser und Suspension während dem Hinterfüllvorgang am Beispiel des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d (60 l/min Volumenstrom)

6.8. EWS-Langzeitintegrität - Untersuchung beeinflussender Faktoren (AP. D)

Schadensfälle und Schadenspotential von EWS im Kontakt zu Gesteinen des Gipskeupers sind bekannt, Sanierungen wurden und werden bei schadhafte EWS-Bohrungen durchgeführt. Die Systemdichtheit bisher nicht sanierungsbedürftiger EWS in diesen Gebieten kann bisher jedoch kaum eingeschätzt werden. Um diesbezüglich das Gefährdungsrisiko beurteilen zu können, müssen die Mechanismen der stattfindenden Korrosionsprozesse genau verstanden und die potentiell auftretenden Gebirgsdrücke ermittelt werden um die Eintrittswahrscheinlichkeit des Versagens der Systemdichtheit eingrenzen und bestenfalls modellieren zu können. Mit solchen Werkzeugen könnte das Gefährdungspotential und entsprechende Gefährdungsgebiete um eventuell betroffene EWS und damit die Langzeitintegrität bewertet werden.

Die potentiell auftretende Bildung von Ettringit oder Thaumasit ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden, was zur mechanischen Zerstörung und/oder zur Desintegration der Bohrlochverfüllung führen kann. Entscheidend für das Stattfinden möglicher Reaktionen sind dabei insbesondere die spezifischen Eigenschaften der Reaktionspartner Zement (im Verfüllbaustoff enthalten) und sulfathaltiges Gestein. Deshalb wurden in Laborversuchen die Reaktionen der in EWS verwendeten Verfüllbaustoffe mit Gesteinen des Gipskeupers untersucht.

Da die Dauer bis zum Eintreten einer Schadensreaktion bisher nur schwer abzuschätzen ist, sollten die Laboruntersuchungen zur Reaktionskinetik vor allem das Gefährdungspotential in den zu untersuchenden Systemen darstellen. Wichtig waren vor allem die resultierenden Wechselwirkungen innerhalb des EWS-Systems indem sich die stattfindenden Quellreaktionen und die entstehenden Wasserwegsamkeiten gegenseitig verstärken können. Weiterentwicklungen auf dem Weg zur Simulation solcher komplexen Wechselwirkungen im EWS-System war deshalb ein weiteres Kernziel des vorliegenden Projekts.

Ein weiterer Fokus lag auf der Magnetit-Dotierung von EWS-Verfüllbaustoffen. Der aktuell forcierte Einsatz von Magnetit zur Überprüfung und zum Monitoring des Verfüllerfolgs und –zustands eröffnet ein nicht zu unterschätzendes potentielles Problem, das es näher zu untersuchen galt. Durch eine gegebenenfalls während der Nutzungsdauer der EWS zu erwartende Oxidation von Magnetit zu rein dreiwertigen Eisenoxiden und –hydroxiden im zementgebundenen Verfüllbaustoff sind potentiell starke Veränderungen der magnetischen Eigenschaften (Suszeptibilität) der EWS-Verfüllbaustoffe möglich, infolge derer drastischen Fehlmessungen nicht auszuschließen sind.

Das durchgeführte Arbeitsprogramm umfasste infolge der oben aufgeführten Punkte fünf thematische Schwerpunkte:

- Sulfatbeständigkeit und der Beständigkeit gegenüber sauren Wässern von Verfüllbaustoffen unter Berücksichtigung verschiedener Temperaturen und Anmischgeschwindigkeiten
- Stabilität von Verfüllbaustoffen gegenüber zementaggressiven Wässern
- Reaktivität und Reaktionskinetik ausgewählter Verfüllbaustoffe mit sulfathaltigen Gesteinen
- Entwicklung und Bau einer Simulationszelle zur experimentellen Bestimmung der Quelldrücke in miniaturisierten EWS-Systemen („downscaling-Versuche“)
- Korrosion von Magnetit im Milieu zementgebundener Verfüllbaustoffe

Diese fünf Themenschwerpunkte zur Langzeitintegrität sind in den nachfolgenden Kapiteln 6.8.1 bis 6.8.5 behandelt.

6.8.1. Sulfatbeständigkeit und Beständigkeit gegenüber sauren Wässern von Verfüllbaustoffen

Zur Ermittlung der Sulfatbeständigkeit und der Beständigkeit gegenüber sauren Wässern (CO₂-haltig) wurden Batchversuche unter Berücksichtigung verschiedener Temperaturen (Raumtemperatur und bei 8 °C) und Anmischgeschwindigkeiten (650 bzw. 2000 U/min) durchgeführt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der mit Magnetit dotierten Materialien 07d, 13+d, M3 und M4 vorgestellt. Bei den mit Magnetit dotierten Verfüllbaustoffen 07d und 13+d handelt es sich um industriell hergestellte Produkte, welche ohne Magnetitzugabe bereits im vorigen EWS-Tech I Projekt untersucht wurden (Riegger et al. 2017). M3 und M4 sind im Projekt hergestellte Verfüllbaustoffe.

Nach einer Versuchsdauer von 56 d wurden für alle Materialien jeweils die wässrige Phase (Batchlösung) und der abfiltrierte Feststoff auf Veränderungen hinsichtlich eines Sulfat- bzw. Säureangriffes untersucht. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche gibt Tabelle 6-55.

Tabelle 6-55: Übersicht über durchgeführte Batchversuche in Abhängigkeit der Temperatur und der Anmischgeschwindigkeit [U/min] => Probenbezeichnung nur U; Versuchsdauer: 56 d, Prüflösungen LW, S2, S3 und S4

Anmischgeschwindigkeit / Prüfwasser	VB 07d	VB 13+d	M3	M4
Raumtemperatur (20 °C)				
650 U/S2	✓	✓	✓	✓
650 U/S3	✓	✓	✓	✓
650 U/S4	✓	✓	✓	✓
650 U/LW	✓	✓	✓	✓
2000 U/S2	✓	✓	✓	✓
2000 U/S3	✓	✓	✓	✓
2000 U/S4	✓	✓	✓	✓
2000 U/LW	✓	✓	✓	✓
8 °C				
650 U/S2	✓	✓	✓	✓
650 U/S3	✓	✓	✓	✓
650 U/S4	✓	✓	✓	✓
650 U/LW	✓	✓	✓	✓
2000 U/S2	✓	✓	✓	✓
2000 U/S3	✓	✓	✓	✓
2000 U/S4	✓	✓	✓	✓
2000 U/LW	✓	✓	✓	✓

6.8.1.1. Chemisch-physikalische Eigenschaften der Reaktionslösungen

Die Ergebnisse für den Chemismus der einzelnen Versuche und die chemisch-physikalischen Parameter sind für jedes untersuchte Material separat im Anhang graphisch dargestellt (07d Kap. 10.5.1, 13+d Kap. 10.5.2, M3 Kap. 10.5.3, M4 Kap. 10.5.4). Die Daten der jeweiligen Versuche befinden sich ebenfalls im Anhang (Kapitel 10.6). Die jeweiligen Kapitel im Anhang haben folgenden Aufbau:

- Tabellarische Übersicht über die Zu- bzw. Abnahme der Anionen- und Kationenkonzentrationen in den jeweiligen Reaktionslösungen nach Versuchsende
- Einzelergebnisse für die jeweiligen Anionen- und Kationenkonzentrationen sind in Abhängigkeit der Versuchstemperatur und der Anmischgeschwindigkeit vergleichend dargestellt
- Darstellung der Entwicklung der chemisch-physikalischen Parameter der jeweiligen Versuche

Die Interpretation der Ergebnisse wird nachfolgend für alle untersuchten Materialien zusammengefasst.

Nach Zugabe der jeweiligen Prüfwässer zum Feststoff laufen unter den experimentellen Bedingungen komplexe Prozesse ab, die simultan stattfinden können. Die ablaufenden Reaktionen sind deshalb nicht einzelnen Reaktionsmechanismen zuzuordnen. In der Reaktionslösung sind für alle untersuchten Materialien überwiegend die Hydratationsprozesse der Zementphasen erkennbar, die auch nach 28 d Hydratationszeit langsam weiter ablaufen. Typisch für den Hydratationsprozess ist, dass Ionen wie Na^+ -, K^+ -, Ca^{2+} -, Al^{3+} und Cl^- in Lösung gehen (Vgl. Riegger et al. 2017). Dies zeigten alle Materialien in allen Prüflösungen. Lediglich M3 und M4 zeigten nur geringe Al^{3+} -Konzentrationen. M3 und M4 zeigten für alle Versuchsreihen einen vergleichbaren Chemismus der Reaktionslösungen nach 56 d Reaktionsdauer, was aufgrund der sehr ähnlichen Zusammensetzung der Baustoffe auch zu erwarten war. Ein signifikanter Unterschied im Chemismus der wässrigen Lösung durch unterschiedliche Anmischgeschwindigkeiten der Baustoffe war nach Versuchsende nicht festzustellen. Einen deutlicheren Unterschied ist durch den Temperatureinfluss zu erkennen. Ein Vergleich des Chemismus der Reaktionslösungen nach 56 d Reaktionszeit aller untersuchten Materialien in Abhängigkeit der Versuchsparameter (Anmischgeschwindigkeit und Reaktionstemperatur) zeigt Tabelle 6-56.

Basische Verbindungen wie NaOH und KOH bewirken einen sofortigen Anstieg des pH-Wertes in der Lösung auf pH 10 bis pH 12,5, auch für das Prüfwasser S4 (CO_2 -haltig, saurer pH-Wert). Während der gesamten Versuchsdauer erfolgte für alle Versuchsreihen eine weitere Verschiebung des pH-Wertes zu basischeren Werten (Vgl. Tabelle 6-57). Somit ist unter diesen Versuchsbedingungen kein Säureangriff zu erwarten.

Alle Versuchsreihen zeigen eine starke Abnahme der Sulfatkonzentration in der Reaktionslösung. Mg^{2+} -Ionen sind bis auf sehr wenige Ausnahmen nach Versuchsende nicht mehr in der Lösung nachweisbar. Vergleichbare Ergebnisse wurden bei den Batch-Versuchen aus dem vorherigen EWS-Tech I Projekt erzielt und ausführlich diskutiert (Riegger et al. 2017). Abnehmende Sulfatkonzentrationen können sowohl auf Fällungsprozesse (Ausfällung von Gips bei Überschreiten des Löslichkeitsproduktes) als auch auf die Neubildung von Sulfatmineralen wie Ettringit oder

Thaumasit zurückzuführen sein. Mg^{2+} wird vermutlich aufgrund seiner geringen Löslichkeit als Hydroxid (Brucit) gefällt. Für Material 13+d wurden zudem auffallend negative Redox-Werte gemessen. Die Proben entwickeln unter diesen Bedingungen einen ausgeprägten H_2S -Geruch. Sinkende Sulfatkonzentrationen könnten für dieses Material auch ein Hinweis für die Fällung von geringlöslichen Sulfiden sein.

Der Nachweis eines Sulfat- bzw. Säureangriffes ist rein über die Wasserchemie nicht feststellbar.

Tabelle 6-56: Vergleich des Chemismus der Reaktionslösungen nach 56 d Reaktionszeit der untersuchten Materialien in Abhängigkeit der Versuchparameter Anmischgeschwindigkeit und Reaktionstemperatur

Parameter	07d	13+d	M3	M4
Anmischgeschwindigkeit (600 und 2000 U)	Kein signifikanter Unterschied	2000 U höhere Werte für K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^-	Kein signifikanter Unterschied	Kein signifikanter Unterschied
Temperatur (8 °C vs. Raumtemperatur)	Bei 8 °C: Höhere Konzentration von: K^+ in LW/S2 Ca^{2+} in LW/S2/S3 Cl^- Deutlich geringere HCO_3^- Konzentration	Bei 8 °C: Etwas geringere Konz. an K^+ , Al^{3+} und Cl^- Höhere Konz. von CO_3^{2-} für 2000 U und HCO_3^- (außer S3)	Bei 8 °C: SO_4^{2-} leicht geringere Konz. für S2 CO_3^{2-} etwas höher für S2/S3 HCO_3^- deutlich höher für S2/S3	Bei 8 °C: SO_4^{2-} leicht geringere Konz. für S2/S3 CO_3^{2-} deutlich höher für LW/S2/S3 HCO_3^- deutlich höher für LW/S2/S3 Ca^{2+} höhere Konz. für LW und S2/S3 (2000 U)

Tabelle 6-57: Entwicklung der physikalisch-chemischen Parameter der Reaktionslösungen nach einer Reaktionsdauer von 56 d

Parameter	07d	13+d	M3	M4
pH	Zunahme	Zunahme	Zunahme	Zunahme
EI. LF	Abnahme bei Raumtemperatur, Bei 8 °C geringfügige Zunahme (Außer S4)	Zunahme	Abnahme	Abnahme bei Raumtemperatur, Bei 8 °C für LW/S2 Zunahme
Eh (Ag/AgCl)	negativ	Deutlich negativ	positiv	positiv

6.8.1.1.1. Vergleich: dotiertes und nicht dotiertes Material 07 – 07d und 13+ und VB 13+d

Im Rahmen des EWS-Tech Projektes (Abschlussbericht EWS-Tech (2017)) wurden die nicht mit Magnetit dotierten Verfüllbaustoffe 07 und 13+ untersucht, welche nun mit den entsprechenden dotierten Materialien 07d und 13+d verglichen werden können. Ein Vergleich der Ergebnisse ist für gleiche Versuchsbedingungen möglich. Übereinstimmende Versuchsparameter in beiden Projekten sind: 56d Reaktionszeit bei Raumtemperatur, Anmischgeschwindigkeit 650U mit den Prüfwässern LW, S2 und S3. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-266 vergleichend dargestellt.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen machen:

- Mg in keiner Gleichgewichtslösung mehr enthalten (Ausfällung)
- 07d zeigt in allen Prüflösungen eine höhere Na⁺- und niedrigere K⁺- Konzentrationen. Ca²⁺ zeigt kein konstantes Verhalten
- Für 13+d zeigt sich kein signifikanter Unterschied zum nicht dotierten Material, außer niedrigere Chloridgehalte für Reaktionslösungen des dotierten Materials
- Sulfat: Bis auf 13+d/S2 zeigen alle Batchlösungen geringere Sulfatgehalte
- Chlorid: dotierte Baustoffe zeigen in allen Prüflösungen deutlich niedrigere Werte

Im Vergleich verhalten sich im Rahmen der gewählten Versuchsdauer und Versuchsbedingungen die dotierten und nicht dotierten Materialien sehr ähnlich.

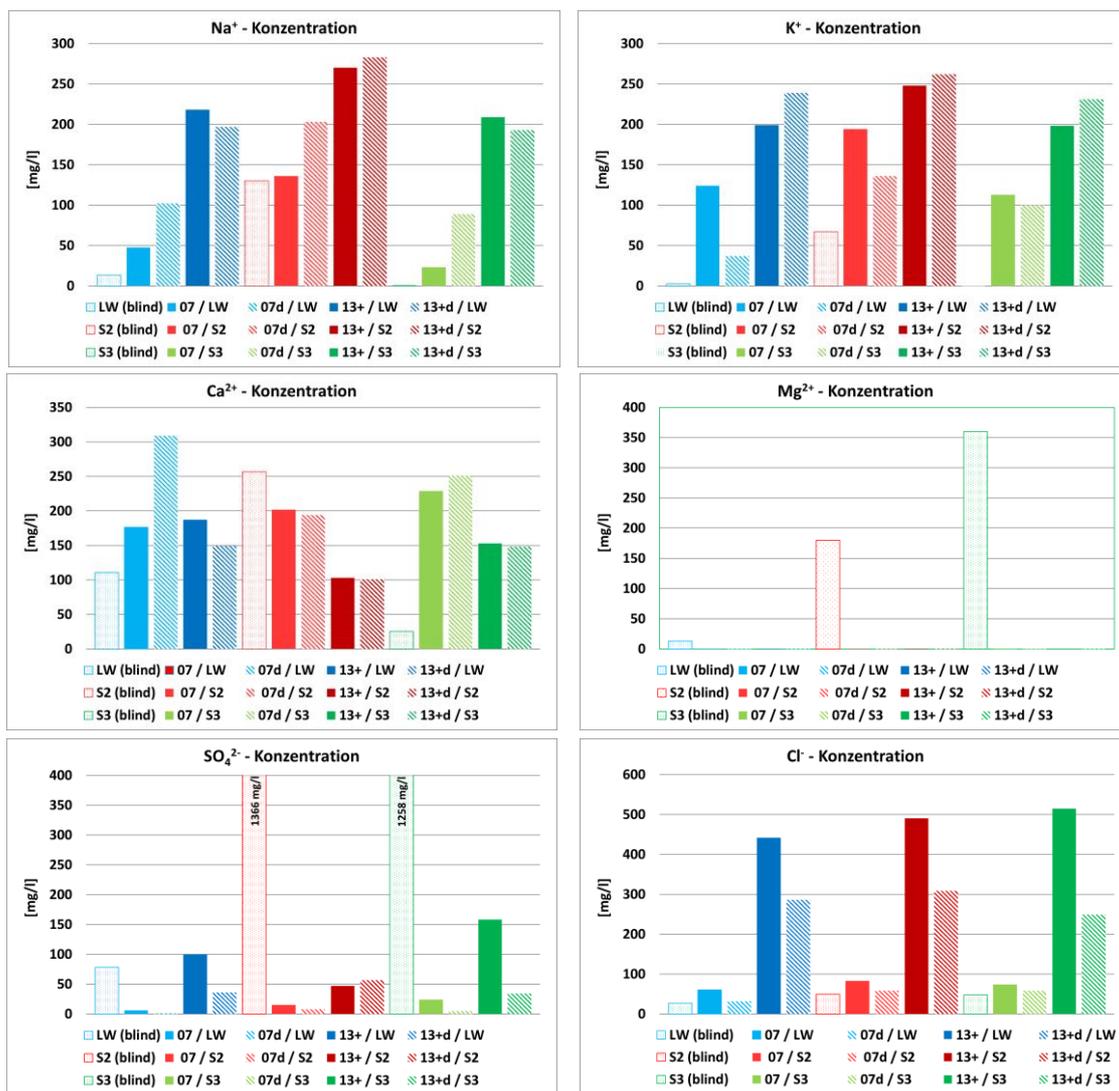


Abbildung 6-266: Vergleich ausgewählter hydrochemischer Parameter der nicht dotierten Verfüllbaustoffe 07 und 13+ (EWS-Tech Projekt) mit den dotierten Verfüllbaustoffen 07d und 13+d (EWS-Tech-II)

6.8.1.2. Feststoffanalyse (XRD)

Die mit der entsprechenden Prüflösung versetzten Materialien wurden hinsichtlich einer chemischen Veränderung röntgenographisch untersucht und mit der jeweiligen unbehandelten Referenzprobe verglichen. Die Röntgendiffraktogramme für unterschiedliche Temperaturen, Anmischgeschwindigkeiten und Prüflösungen sind nachfolgend für die untersuchten Materialien 07d in Kap. 6.8.1.2.1, 13+d in Kap. 6.8.1.2.2, M3 in Kap. 6.8.1.2.3 und M4 in Kap. 6.8.1.2.4 graphisch dargestellt. Die Ergebnisse werden für alle Materialien nachfolgend zusammengefasst.

Die in den Röntgendiffraktogrammen nachgewiesenen Haupt-Mineralphasen der jeweiligen unbehandelten Proben zeigt Tabelle 6-58. Da die hydratisierten Zementphasen (C-S-H Phasen) röntgenamorph sind, konnten diese somit nicht erfasst werden.

Tabelle 6-58: Mittels XRD nachgewiesene Haupt-Mineralphasen der unbehandelten Referenzproben (28 d hydratisiert, nicht mit Prüflösung versetzt)

Probe	Mineralphasen	Bemerkung
07d	Quarz, Calciumcarbonat, Magnetit, Portlandit	Gips in geringen Mengen
13+d	Calciumcarbonat, Graphit, Magnetit	Graphit überlagert andere Peaks
M3	Calciumcarbonat, Quarz, Magnetit	-
M4	Calciumcarbonat, Quarz, Magnetit	-

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 (CaSO_4), Thaumasil ($\text{CaSiO}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaCO}_3\cdot 15\text{H}_2\text{O}$) oder Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (Stark & Wicht 2013). Gips und Ettringit können sowohl primär im Zement enthalten sein, als auch durch einen äußeren Sulfatangriff sekundär neu gebildet werden. Thaumasil hingegen entsteht nur durch einen äußeren Sulfatangriff, bevorzugt bei Temperaturen $< 10\text{ }^\circ\text{C}$. Die Materialien **07d** und **13+d** zeigen nach einer Versuchsdauer von 56 d im Vergleich zur unbehandelten Blindprobe eine deutliche Neubildung von Ettringit für alle Prüfwässer, wobei der Peak für Leitungswasser in allen Fällen kleiner ist. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Anmischgeschwindigkeiten (650 U und 2000 U), sowie für Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen (Raumtemperatur, $8\text{ }^\circ\text{C}$) ist nicht zu erkennen. Die Bildung von Thaumasil konnte nicht nachgewiesen werden.

Ettringit bildet sich nach Kontakt mit der jeweiligen Reaktionslösung sekundär neu und wird somit einem äußeren Sulfatangriff zugeschrieben. Leitungswasser besitzt aufgrund seiner deutlich geringeren Mineralisation und geringen Sulfatgehaltes das niedrigste Angriffspotential.

Der im unbehandelten Material 07d vorhandene Portlandit (entsteht durch den Hydratationsprozess) ist nach 56 d Kontakt mit der jeweiligen Prüflösung deutlich verringert. Dies konnte bereits für das undotierte Material VB 07 im EWS-Tech Projekt (Riegger et al. 2017) beobachtet werden. Die Lösung des Portlandits kann auf zwei Reaktionsprozesse hindeuten, welche im vorliegenden Fall auch gleichzeitig ablaufen können: (a) Lösung infolge Untersättigung der Batchlösung, (b) äußerer Sulfatangriff (z.B. Umwandlung zu Ettringit). Der Gipspeak nimmt für Versuche mit den Prüflösungen S2-S4 leicht ab.

Für die Materialien **M3** und **M4** konnte unabhängig der Anmischgeschwindigkeit ein Sulfatangriff festgestellt werden, welcher in Abhängigkeit der Prüfwässer und der Temperatur unterschiedlich ausgeprägt ist. Das geringste Angriffspotential bei $8\text{ }^\circ\text{C}$ und Raumtemperatur weist unter den gegebenen Versuchsbedingungen das Leitungswasser auf. Hier konnte lediglich eine geringe Ettringitneubildung festgestellt werden.

Der Portlandit aus dem nicht behandelten Ausgangsmaterial reagiert in allen Proben vollständig ab.

Versuche mit den Prüfwässern S2 und S4 bei $8\text{ }^\circ\text{C}$ zeigen für **M3** und **M4** eine deutliche Bildung von Ettringit und eine teilweise Bildung von Thaumasil (Tabelle 6-59). Beide Wässer enthalten in

ausreichender Menge die nötigen Reaktionspartner wie Carbonat, Sulfat und Calcium für die Entstehung beider Mineralien. Am deutlichsten ist die Bildung von Thaumasit für das Prüfwasser S4 zu erkennen, welches zusätzlich Quellsäure enthält, das die Thaumasitbildung begünstigt. Ob sich der Thaumasit aus Ettringit bildet oder direkt durch die Reaktion der C-S-H-Phasen mit Sulfat und Carbonat entsteht, kann nicht geklärt werden. Generell zeigt sich die eindeutige Zuordnung der Peaks für Ettringit und Thaumasit im Röntgendiffraktogramm als nicht ganz einfach, da beide Peaks von Natur aus sehr eng beieinanderliegen. Zudem gibt es eine lückenlose Mischkristallreihe zwischen Ettringit und Thaumasit. Ist nur Ettringit vorhanden, zeigt sich ein deutlicher Peak. Durch die zusätzliche Bildung von Thaumasit kommt es in den meisten Fällen zu einer Verbreiterung des Ettringitpeaks oder sogar zu einem Doppelpeak. Für das Prüfwasser S4 kann der Peak eindeutig dem Thaumasit zugeschrieben werden. Für das Prüfwasser S3 kann eine Thaumasitbildung nicht ausgeschlossen werden.

Versuche bei Raumtemperatur zeigen, dass Thaumasit bevorzugt bei niedrigen Temperaturen gebildet wird. Hier kann nur für das Prüfwasser S4 für M3 eine Neubildung von Thaumasit festgestellt werden. Die Ettringitbildung ist dafür in allen Wässern ausgeprägter im Vergleich zur Versuchsreihe bei 8°C.

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. Ebenso ist auch keine Zunahme an Gips röntgenographisch ermittelbar, welches ebenfalls als Fällungsprodukt vorliegen könnte. Möglicherweise liegt der Gehalt an beiden Mineralen in den jeweiligen Feststoffproben unterhalb der Nachweisgrenze.

Eine Übersicht über die Ettringit- und Thaumasitneubildung der untersuchten Materialien in Abhängigkeit der Prüfwässer und der Temperatur gibt Tabelle 6-59.

Chemische Veränderungen durch einen Säureangriff durch das Prüfwasser S4 sind nicht zu erkennen. Da der pH-Wert der jeweiligen Batchlösungen deutlich > 10 ist, kann ein Säureangriff unter diesen Versuchsbedingungen ausgeschlossen werden. Der anfänglich leicht saure pH-Wert von 5,5 der Prüflösung S4 wird sofort nach Zugabe zum Verfüllmaterial zu basischen Werten hin verschoben. Die hier durchgeführten Batchversuche sind nicht für die Prüfung der Säurebeständigkeit geeignet, da keine kontinuierliche Säurezufuhr stattgefunden hat.

Tabelle 6-59: Ettringit- und Thaumasitneubildung in Abhängigkeit der Prüfwässer und der Temperatur (für beide Anmischgeschwindigkeiten 650 und 2000 U)

Wasser	Kritische Inhaltsstoffe	Ettringit		Thaumasit	
		8°C	RT	8°C	RT
LW	SO ₄ ²⁻ (55 mg/l) HCO ₃ ⁻ (321 mg/l),	07d	07d	-	-
		13+d	13+d	-	-
		M3*	M3	-	-
		M4*	M4*	-	-
S2	SO ₄ ²⁻ (1500 mg/l) HCO ₃ ⁻ (38 mg/l) CO ₃ ²⁻ (263 mg/l)	07d	07d	-	-
		13+d	13+d	-	-
		M3	M3	M3	M3
		M4	M4	(M4)	-
S3	SO ₄ ²⁻ (1500 mg/l)	07d	07d	-	-
		13+d	13+d	-	-
		M3	M3	(M3)	-
		M4	M4	(M4)	-
S4	SO ₄ ²⁻ (1463 mg/l) HCO ₃ ⁻ (403 mg/l) CO ₂ (4000 mg/l)	07d	07d	-	-
		13+d	13+d	-	-
		M3	M3	M3	M3
		M4	M4	M4	-

* Sehr wenig, () nicht eindeutig, jedoch nicht auszuschließen

6.8.1.2.1. 07d

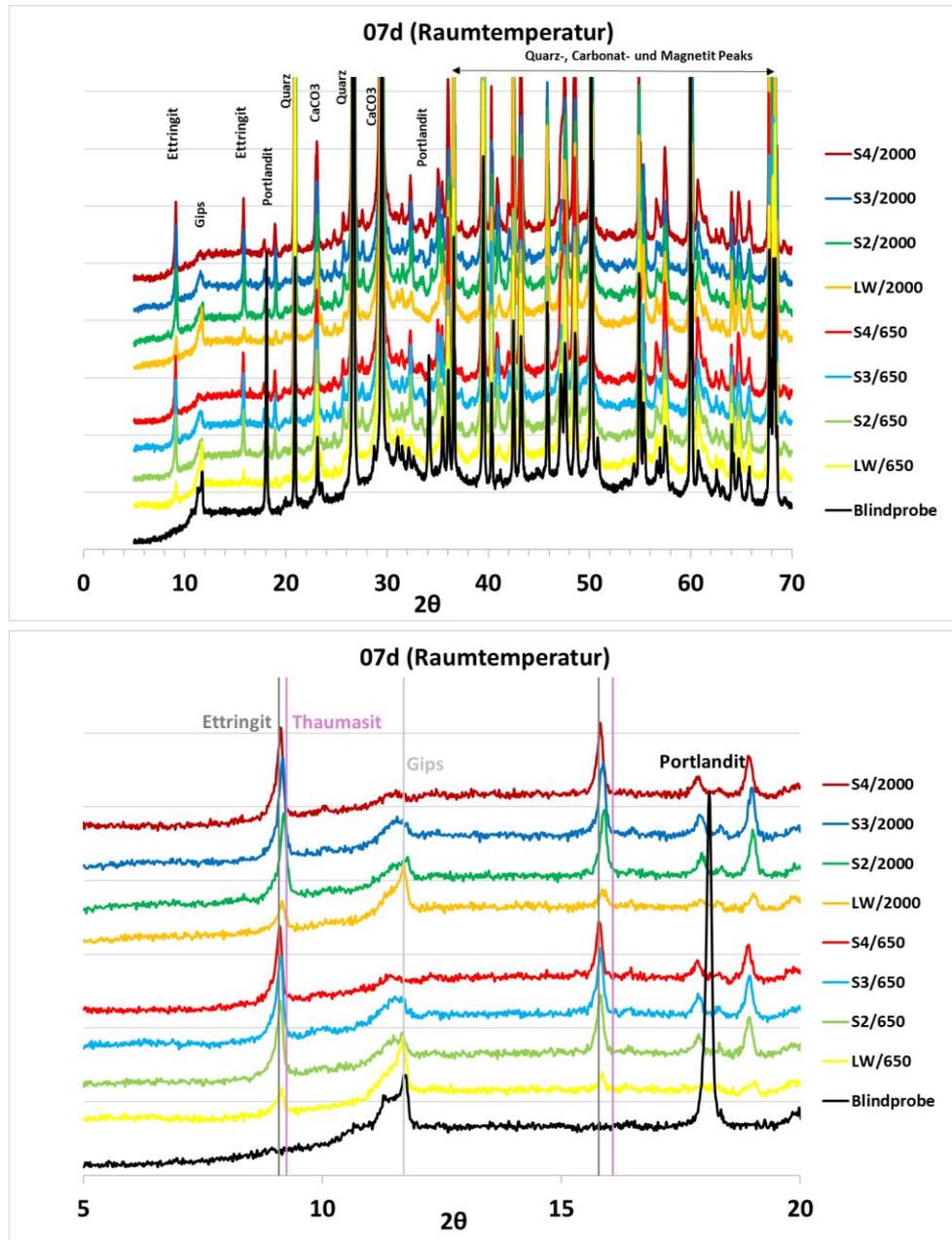


Abbildung 6-267: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für 07d unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern (Raumtemperatur), oben: gesamtes Spektrum, unten Ausschnitt: $2\theta = 5-20$

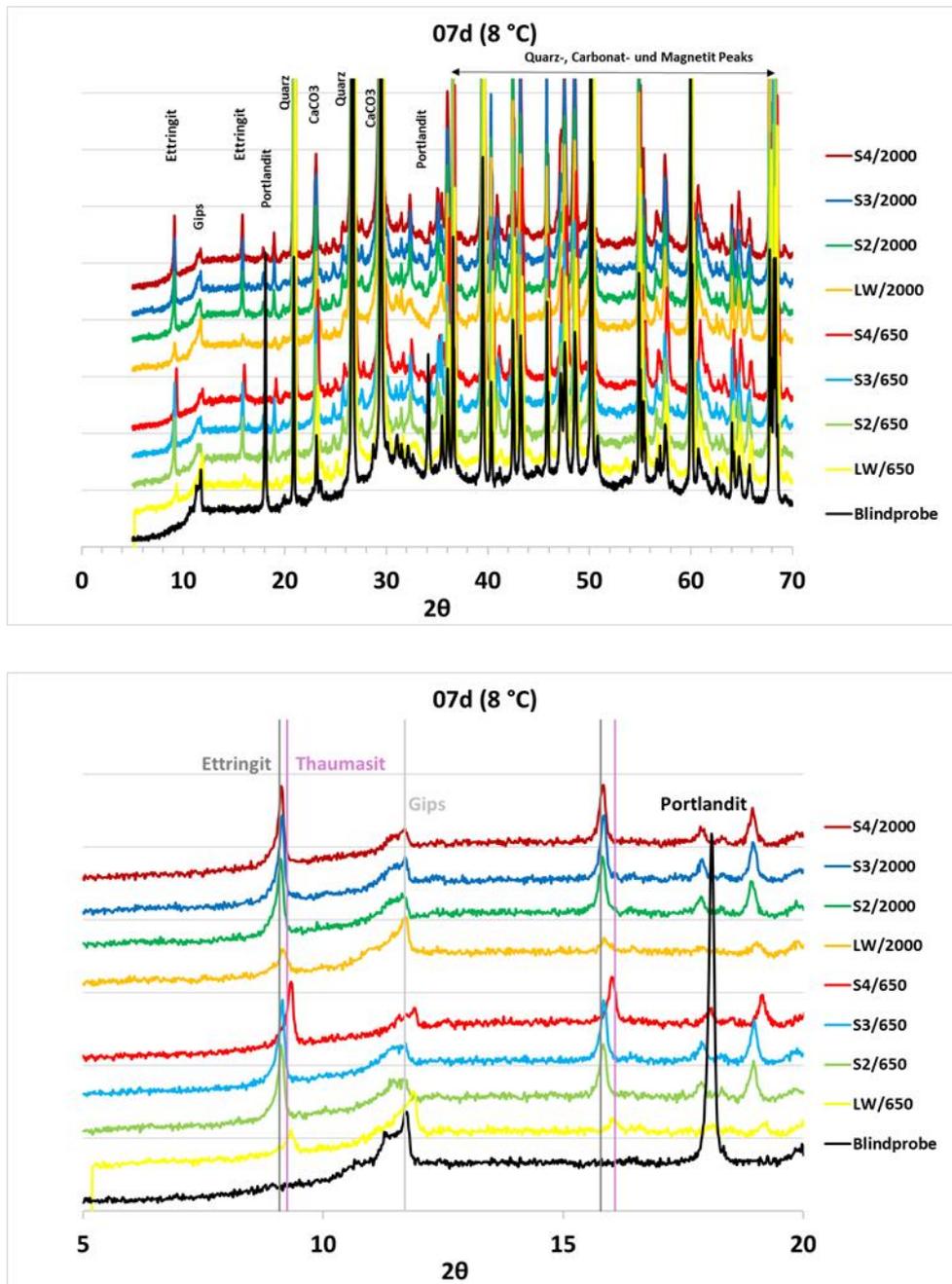


Abbildung 6-268: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für 07d unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern (8 °C), oben: gesamtes Spektrum, unten Ausschnitt: 2θ = 5-20

6.8.1.2.2. 13+d

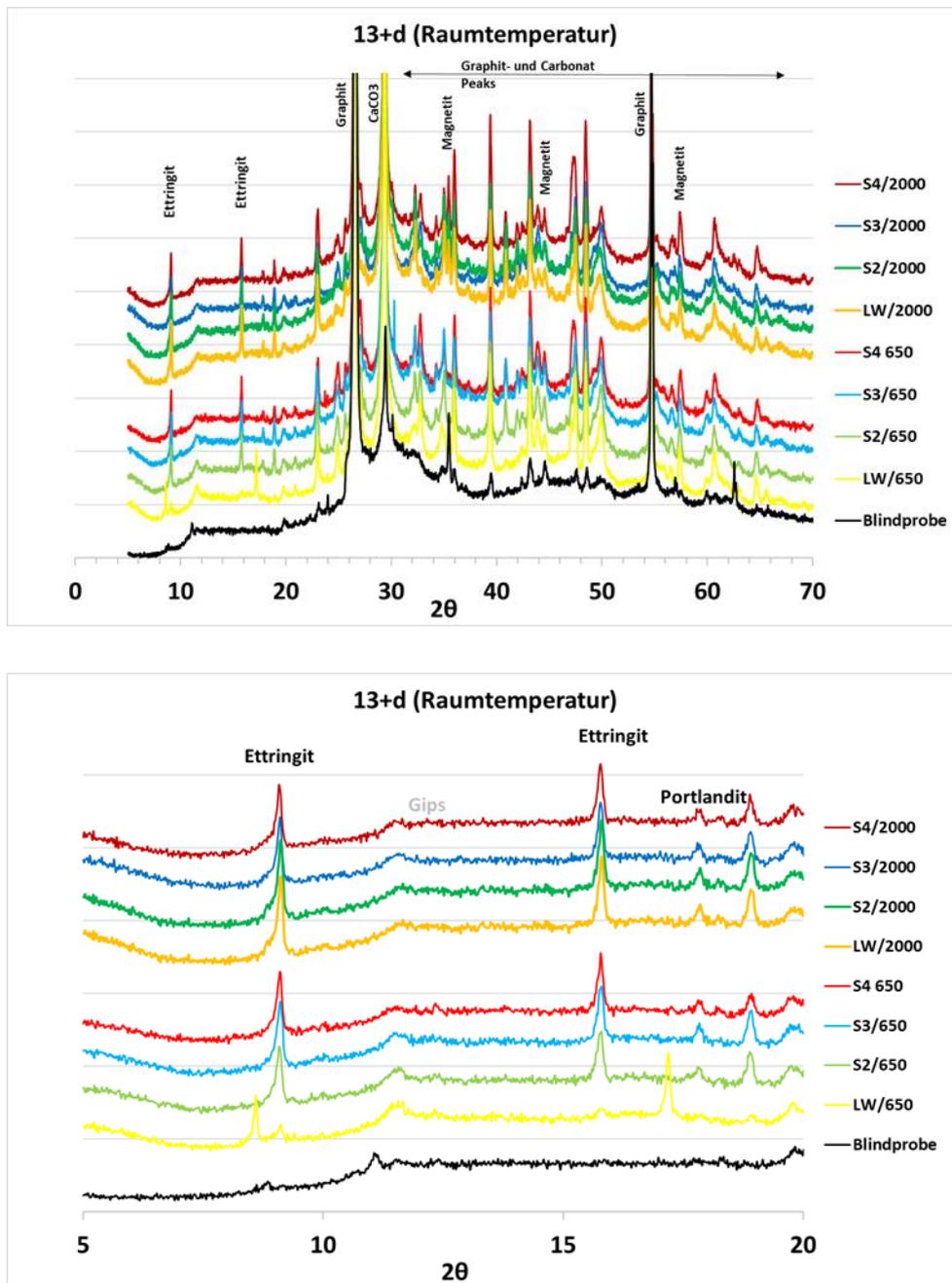


Abbildung 6-269: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für 13d unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern (Raumtemperatur), oben: gesamtes Spektrum, unten: Ausschnitt $2\theta = 5-20$

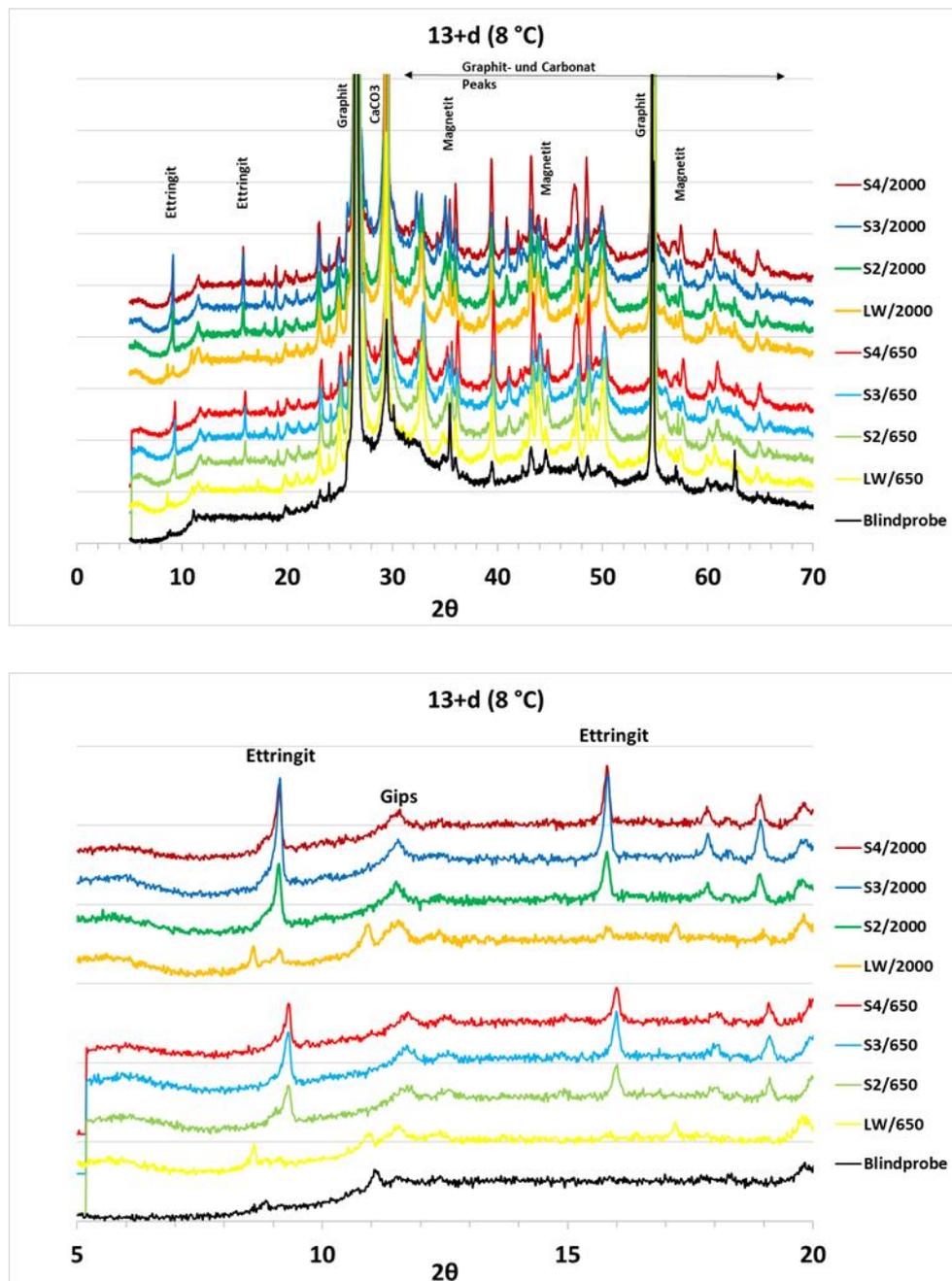


Abbildung 6-270: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für 13+d unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern (8 °C), oben: gesamtes Spektrum, unten: Ausschnitt $2\theta = 5-20$

6.8.1.2.3. M3

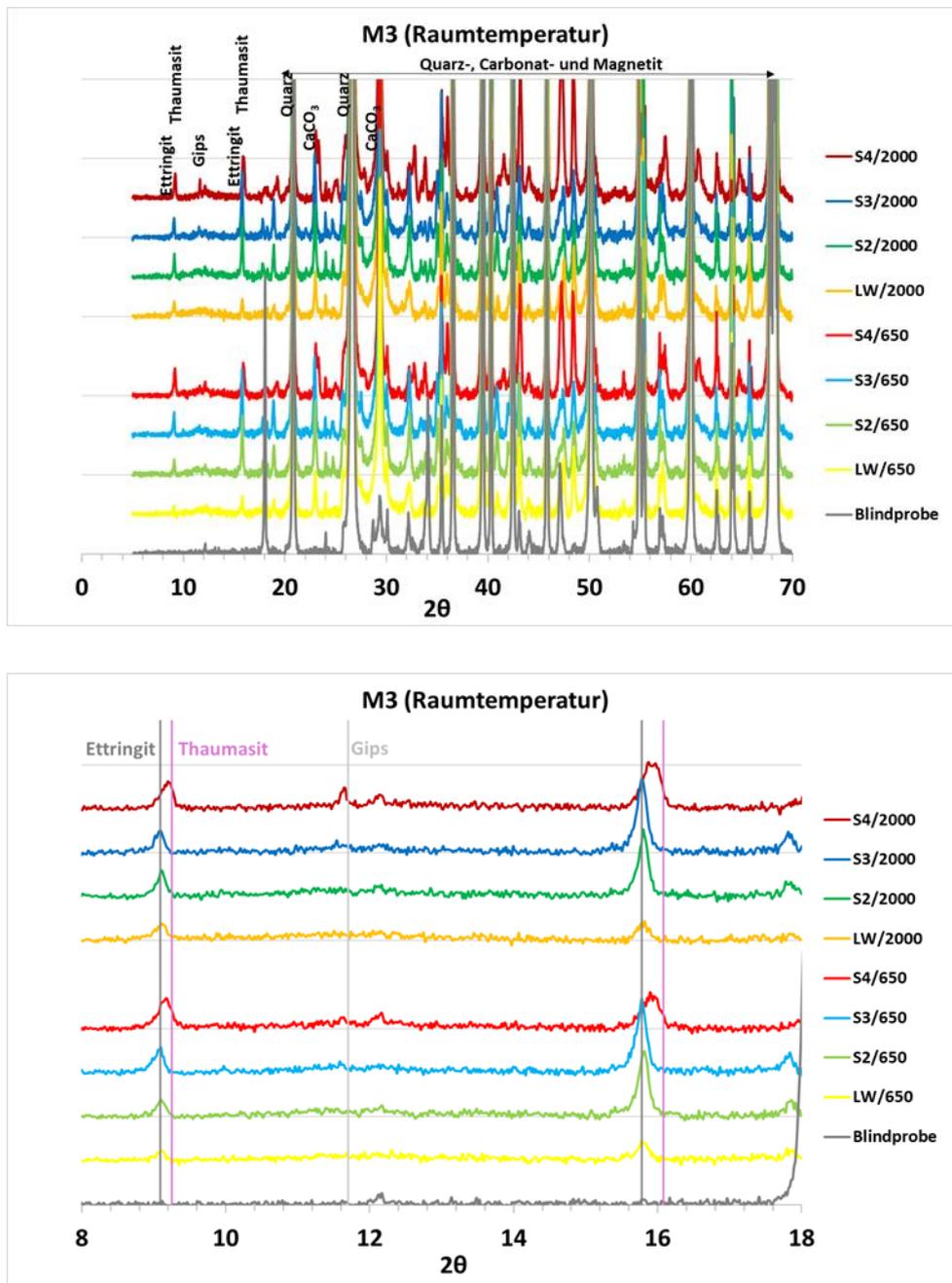


Abbildung 6-271: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für M3 unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern bei Raumtemperatur, oben: gesamtes Spektrum, unten: Ausschnitt $2\theta = 5-20$

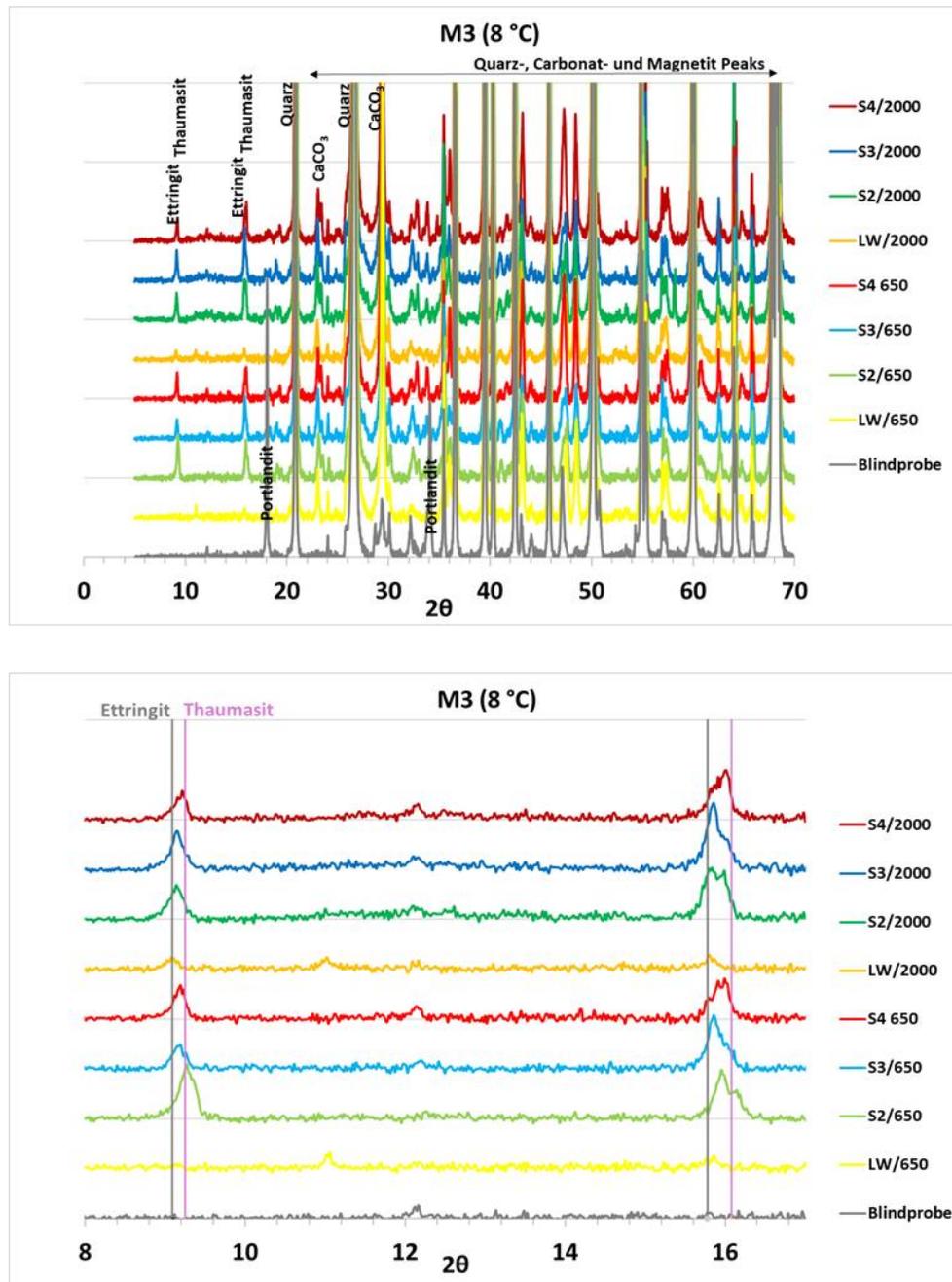


Abbildung 6-272: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für M3 unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern (8 °C), oben: gesamtes Spektrum, unten: Ausschnitt $2\theta = 5-20$

6.8.1.2.4. M4

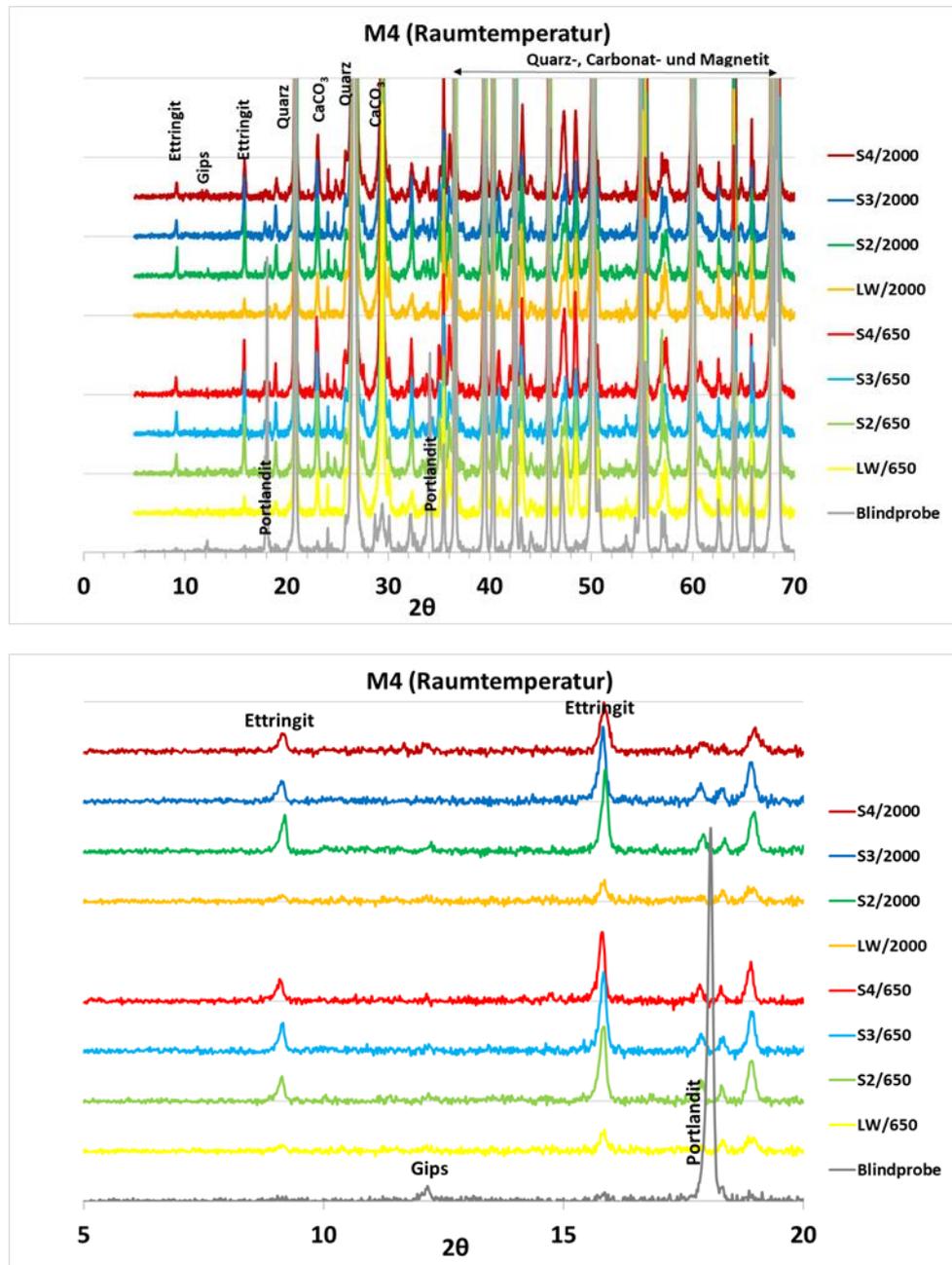


Abbildung 6-273: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für M4 unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern bei Raumtemperatur, oben: gesamtes Spektrum, unten: Ausschnitt $2\theta = 5-20$

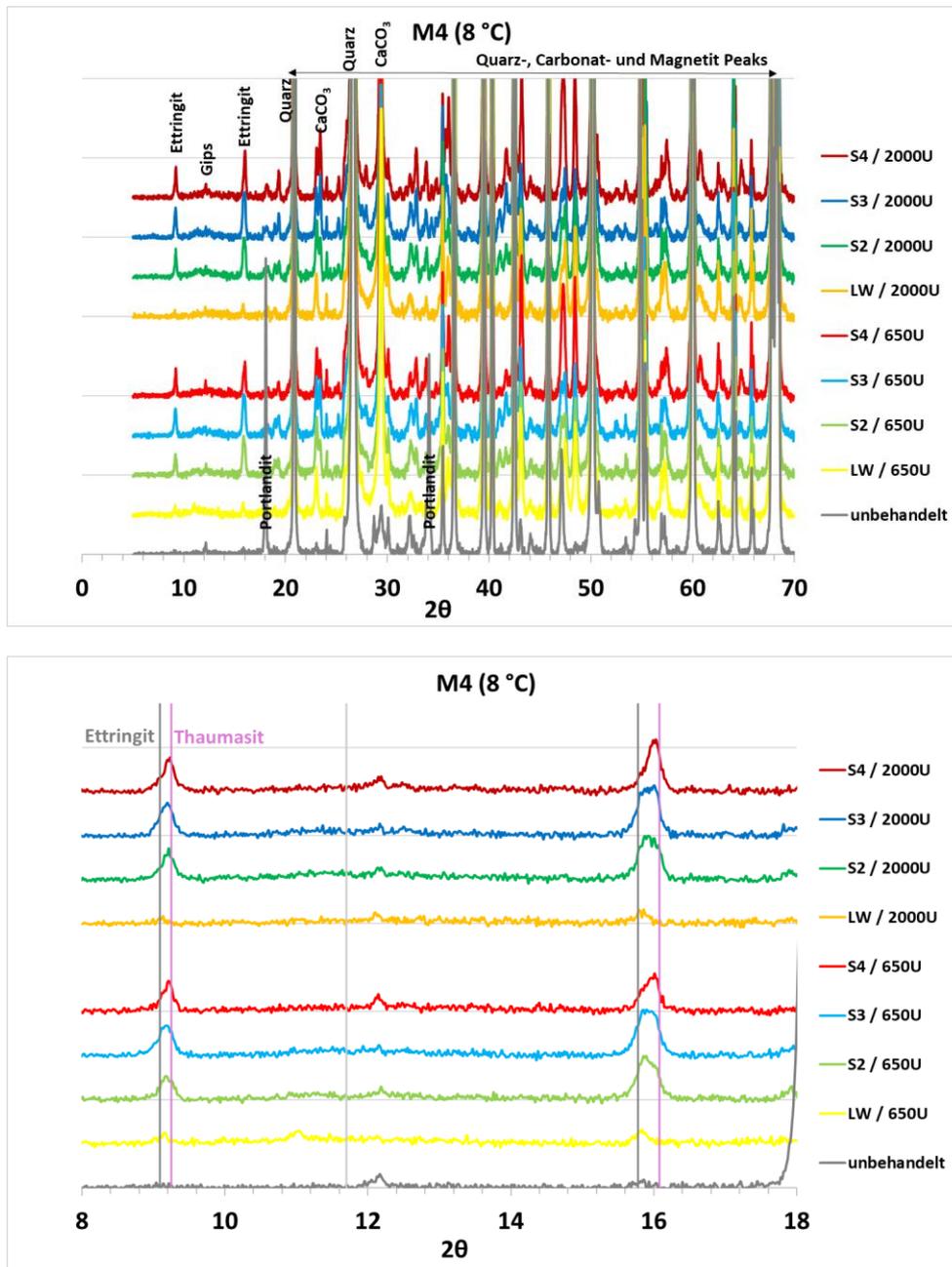


Abbildung 6-274: Vergleich der Röntgendiffraktogramme für M4 unbehandelt (28 d hydratisiert) und nach einer Batchdauer von 56 d mit den jeweiligen Prüfwässern bei 8 °C, oben: gesamtes Spektrum, unten: Ausschnitt 2θ= 5-20

6.8.1.3. Bewertung der Batchversuche

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. Diese Tests dienen zur Einschätzung von Materialien in Bezug auf einen potentiellen Sulfatangriff. Sie sind nicht direkt auf Feldbedingungen übertragbar.

Für die Simulation eines Säureangriffes waren die Batchversuche nicht geeignet, da sich sofort nach dem Versetzen des jeweiligen Verfüllmaterials mit der Prüflösung S4 ein basischer pH-Wert eingestellt hat. Eine kontinuierliche Säurezugabe konnte unter den gewählten Versuchsbedingungen nicht durchgeführt werden.

Umweltverträglichkeit

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen zeigen, dass in Bezug der 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 Verfüllbaustoffen in aggressiven Wässern ist eine langfristige Beobachtung sinnvoll.

6.8.1.4. Fazit zur Sulfatbeständigkeit und Beständigkeit gegenüber sauren Wässern

In der vorliegenden Arbeit wurden die Verfüllbaustoffe 07d, 13+d, M3 und M4 mit verschiedenen Prüflösungen versetzt und sowohl die Reaktionslösung als auch der Feststoff hinsichtlich eines Sulfat- und Säureangriffs untersucht.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei ungünstiger chemischen Zusammensetzung der Grundwässer ein Sulfatangriff möglich ist. 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).

Für alle untersuchten Materialien, unabhängig der Anmischgeschwindigkeit und der Temperatur, konnte im Röntgendiffraktogramm (Feststoff) eine Neubildung von Ettringit festgestellt werden. Dabei besitzt das Leitungswasser im Vergleich zu den Prüfwässern S2 – S4 aufgrund des geringen Sulfatgehaltes das niedrigste Angriffspotential. Da die Bildung von Ettringit mit einer Volumenzunahme verbunden ist, kann es zur Dehnungs- und Rissbildung im Verfüllmaterial kommen. Die Bildung von Thaumasit konnte bevorzugt bei niedrigen Temperaturen (hier 8 °C) für Versuche mit den Prüfwässern S2 und S4 bei den Materialien M3 und M4 nachgewiesen werden. Für M3 konnte auch bei Raumtemperatur Thaumasit festgestellt werden. Die Bildung von Thaumasit führt zu einem Festigkeitsverlust des Verfüllmaterials. Die durchschnittliche Bodentemperatur in Deutschland liegt bei etwa 9 °C (Van Tittelboom et al. 2013). Die Bildung von Thaumasit in sulfathaltigen Grundwässern ist somit nicht auszuschließen. Für die Materialien 07d und 13+d konnte innerhalb des Versuchszeitraums unter den gegebenen Bedingungen lediglich Ettringit, aber kein Thaumasit nachgewiesen werden.

Ein Sulfatangriff über den Chemismus der Reaktionslösung konnte nicht nachgewiesen werden, da die Reaktionsmechanismen durch den Hydratationsprozess und möglichen Ausfällungen überlagert werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Batchversuche eignen sich nicht für den Nachweis eines Säureangriffes, da nach der Zugabe der initial sauren Prüflösung der pH-Wert sich auf Werte > 8 einstellt. Aufgrund der Feinkörnigkeit der Proben kann die Versuchslösung nicht kontinuierlich ausgetauscht werden. Hierfür eignen sich die in diesem Projekt durchgeführten Umströmungsversuche.

Generell ist der Einbau von Erdwärmesonden in sulfathaltiger Umgebung problematisch, da die Langzeitstabilität nicht garantiert werden kann.

Um spezifischere Aussagen bezüglich der Langzeitstabilität von Verfüllmassen bezüglich der Sulfatbeständigkeit treffen zu können, wären Langzeitversuche empfehlenswert.

6.8.2. Ergebnisse der Umströmungsversuche (AP. D)

Zur Bewertung der Stabilität von Verfüllbaustoffen gegenüber zementaggressiven Wässern wurden Batch Versuche sowie Umströmungsversuche durchgeführt, die analog zu den Untersuchungen des EWS-Tech I Projektes (Riegger et al. 2017) erfolgten. Insgesamt wurden 48 Umströmungsversuche unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen durchgeführt und gemäß Tabelle 5-7 analysiert. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Versuche dargestellt und diskutiert. Die übrigen Ergebnisse sind im Anhang 10.7 aufgeführt.

Die Rate und schwere des Sulfatangriffs werden durch folgende Hauptfaktoren beeinflusst (Menéndez et al. 2013):

- Art der mit der Sulfatlösung gebildeten Produkte
- Inwieweit Spannungen, die aus Massengewinnen resultieren, durch Auflösen und Auslaugen von Zementkomponenten abgebaut werden können
- Undurchlässigkeit der Zementmatrix, die eine Barriere gegen Penetration durch Sulfationen bildet
- Durchlässigkeit der Verfüllung
- C₃A Gehalt des Zements
- Sulfatkonzentration im umgebenden Wasser
- Mobilität des Sulfats im Grundwasser
- Art der Kationen im Wasser wie z. B. Na⁺ Ca²⁺ Mg²⁺, Al³⁺ usw.
- Vorhandensein und Konzentration anderer gelöster Salze wie Chlorid und Karbonate
- Ca(OH)₂ Gehalt
- pH-Wert des Wassers
- Temperatur

Daher wurde bei der Planung, Durchführung und Auswertung ein besonderes Augenmerk auf diese Faktoren gelegt.

Unmittelbar nach Versuchsende wurden die Versuchsprismen ausgebaut und visuell bewertet, sowie fotografiert. Eine visuelle Gegenüberstellung aller Initialproben mit den behandelten Proben befindet sich im Anhang 10.7.2. Die qualitative Auswertung der visuellen Begutachtung ist in Tabelle 6-60 aufgelistet.

Bei der visuellen Bewertung der Rissbildung wurde der gesamte Probenkörper beurteilt. Die Abbildung 6-275 und Abbildung 6-276 zeigen beispielhaft das Vorhandensein von Rissen, die durch die Enttringitbildung hervorgerufen wurden. Dabei sind die Aufnahmen eine subjektive Erfassung der Schädigungen. In den Versuchen 07d/S2K/650, 07d/S2K/2000 und 07d/S4K/2000 sind beispielsweise die Risse nur an der Stirnseite ausgebildet, während sie bei den Versuchen 07d/S3K/650 und 07d/S3K/2000 auch an der gesamten Längsseite auftraten. Die Versuche haben neben der Rissbildung gezeigt, dass bei Verwendung der Wässer S2 und S3 es zu einer deutlichen Ausfällung von Hydroxiden auf der Probenoberfläche kam. Diese Bildung war bei niedrigeren Temperaturen etwas stärker ausgeprägt als bei Raumtemperatur. Die Versuche die mit dem Wasser S4 betrieben wurden, zeigen aufgrund des niedrigen pH-Wertes von etwa 6 (Anhang 10.7.3) keine Ausfällungen von Hydroxiden auf den Probenoberflächen. Hier ist jedoch ein leichter bis mäßiger Säureangriff erkennbar. Dies äußert sich an etwas größeren Poren auf den Oberflächen der Proben (Abbildung 6-276, oben), sowie an der deutlich ausgeprägten Reaktionsfront innerhalb der Probe (Abbildung 6-276, unten).

Die durch den Wasserchemismus bedingten Reaktionen an den untersuchten Verfüllbaustoffen wurde im EWS-Tech I Bericht (Riegger et al. 2017) bereits ausführlich behandelt und sollen hier nicht weiter erörtert werden. Während der Umströmungsversuche wurden in festgelegten zeitlichen Abständen Wasserproben aus der Reaktionskammer genommen und hinsichtlich ihres pH-Wertes, Eh-Wertes, ihrer elektrischen Leitfähigkeit sowie der Ionenkonzentration untersucht. Die ausgewerteten Messergebnisse hierzu befinden sich im Anhang 10.7.3 bis 10.7.6.

Tabelle 6-60: Auswertung der visuellen Begutachtung der Versuchsprismen nach Versuchsende (Versuche bei Raumtemperatur; Versuche bei ca. 8 °C)

Versuch	Ausfällungen an Oberfläche	Sichtbare Lösungen	Rissbildung
07d/S2K/650	+	-	+
07d/S2K/2000	+	-	+
07d/S3K/650	+	-	++
07d/S3K/2000	+	-	++
07d/S4K/2000	-	+	+
07d/LWK/2000	+	-	-
13+d/S2K/650	o	-	-
13+d/S2K/2000	o	-	-
13+d/S3K/650	o	-	-
13+d/S3K/2000	o	-	-
13+d/S4K/2000	-	+	-
13+d/LWK/2000	o	-	-
07d/S2K/650	++	-	-
07d/S2K/2000	++	-	-
07d/S3K/650	+ - ++	-	-
07d/S3K/2000	+ - ++	-	-
07d/S4K/2000	-	+ - ++	o
07d/LWK/2000	o	-	-
13+d/S2K/650	+	-	-
13+d/S2K/2000	+	-	-
13+d/S3K/650	+	-	-
13+d/S3K/2000	+	-	-
13+d/S4K/2000	-	o	-
13+d/LWK/2000	+	-	-

Versuch	Ausfällungen an Oberfläche	Sichtbare Lösungen	Rissbildung
M3/S2K/650	++	-	o
M3/S2K/2000	++	-	-
M3/S3K/650	+	-	-
M3/S3K/2000	+	-	-
M3/S4K/2000	-	o - +	-
M3/LWK/2000	o	-	-
M4/S2K/650	++	-	-
M4/S2K/2000	++	-	-
M4/S3K/650	+	-	-
M4/S3K/2000	+	-	-
M4/S4K/2000	-	+	-
M4/LWK/2000	o	-	-
M3/S2K/650	++	-	-
M3/S2K/2000	++	-	-
M3/S3K/650	++	-	-
M3/S3K/2000	++	-	-
M3/S4K/2000	-	+	-
M3/LWK/2000	+	-	-
M4/S2K/650	+ - ++	-	-
M4/S2K/2000	+ - ++	-	-
M4/S3K/650	+	-	-
M4/S3K/2000	+	-	-
M4/S4K/2000	-	o	-
M4/LWK/2000	+	-	-

++ stark; + sichtbar; o schwach; - nicht erkennbar

Eine etablierte Methode zur Beurteilung eines möglichen Sulfatangriffs besteht in der Analyse der Längenänderung von Versuchsprismen, die in sulfathaltigen Wässern ausgelagert wurden. Hiernach soll nach den derzeit in Deutschland durchgeführten Prüfverfahren für den äußeren Sulfatangriff die relative Längenänderung von Flachprismen (160 x 40 x 10 mm) 0,5 mm/m nicht übersteigen (Stark & Wicht 2013). Auf dieser Grundlage wurden die Versuchsprismen aus den Umströmungsversuchen bewertet, wobei die verwendeten Prismen etwas größer sind (160 x 40 x 40 mm). Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-277 dargestellt. In den hier durchgeführten Untersuchungen kann eine eindeutige Aussage bezüglich eines Sulfatangriffs aufgrund der Längenveränderung nicht durchgeführt werden. Wie in EWS-Tech I Projekt (Riegger et al. 2017) wurden auch in dieser Studie aufgrund des Untersuchungsprogramms keine Messbolzen in den Stirnseiten verwendet, wodurch eine genaue Längenänderungsmessung nur bedingt möglich war. So beeinflussen beispielsweise Ausfällungen die Messergebnisse, was sich in hohen relativen Längenänderungen von bis zu 6 mm äußert. Demgegenüber verursachen Lösungserscheinungen, wie sie bei sauren Wässern auftreten, negative relative Längenänderungen. Darüber

hinaus macht die Position der Rissbildung es schwer, eine Längenänderung mit einem Messschieber zu bestimmen, da die Messposition für alle Messungen bereits bei der Initialmessung festzulegen ist. Schon geringe Abweichungen der Messpositionen (Initial zu Final) haben einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse der relativen Längenänderung. Dies ist auch bei der Verwendung von Messbolzen der Fall, da in den durchgeführten Versuchen (Abbildung 6-275) die Rissbildung primär am Rand der Proben erfolgte und hier i. d. R. keine Installation von Messbolzen möglich ist. Eine Möglichkeit der Längenänderungsmessung wäre ein Flächenmesssystem, in dem die gesamte Fläche einer Seite als Bezugsfläche dient. In wieweit dies ein praktikabler Ansatz wäre, müsste durch nähere Untersuchungen geklärt werden. Bei einer Beurteilung der Längenänderung ohne ausgeprägter Rissbildung wären Messbolzen prinzipiell anwendbar. Durch die Ausfällungen von Hydroxiden ist eine genaue Messung jedoch nur sehr schwierig durchzuführen.



Abbildung 6-275: Rissbildung aufgrund sekundärer Ettringitbildung in den Versuchen 07d/S2K/650 (oben links); 07d/S2K/2000 (oben rechts); 07d/S3K/650 (unten links), 07d/S3K/2000 (unten mitte) und 07d/S4K/2000 (unten rechts) bei Raumtemperatur

Bei der Betrachtung der Messwerte in Abbildung 6-277 zeigt sich, dass im Versuch 1 (oben links) bei Raumtemperatur für den Verfüllbaustoff 07d hohe relative Längenänderungen von über 5 mm/m auftreten. Bei der visuellen Begutachtung zeigen diese Proben gegenüber den übrigen Proben ebenfalls eine ausgeprägte Rissbildung. Diese ausgeprägte Rissbildung ist im Versuch 2

für den Verfüllbaustoff 07d nicht zu beobachten was sich auch in geringeren relativen Längenänderungen äußert. Für dieses unterschiedliche Verhalten können zwei mögliche Gründe angeführt werden. Zum einen wurden in den zwei Versuchen unterschiedliche Chargen des Verfüllbaustoffs verwendet, die sich aufgrund der natürlichen Ausgangsstoffe des Produkts möglicherweise in ihrer Zusammensetzung etwas unterscheiden und somit eine andere mineralogische Zusammensetzung des hydratisierten Verfüllmaterials bedingten. Zum anderen kann auch die geringere Temperatur von ca. 8 °C während der 28 Tage Hydratationszeit bis zum Probeneinbau den Unterschied in der mineralogischen Zusammensetzung erklären, da die Mobilität der Ionen in der Porenlösung temperaturabhängig ist. Die Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung des Verfüllbaustoffs 07d in Versuch 1 und Versuch 2 zeigen sich auch in den initialen Röntgendiffraktogrammen (Abbildung 6-278 oben, Abbildung 6-279), die sich im 2 θ Bereich zwischen 10,5 – 11,7 (11,71 ist Gips) deutlich unterscheiden. Hierbei muss angemerkt werden, dass beim Hydratationsprozess der Verfüllsuspension kein reiner, gut kristalliner Gips entsteht, der einen scharfen, deutlich abgegrenzten Gipspeak bei Röntgen verursacht. Auffällig in den Röntgendiffraktogrammen ist, dass die Blindproben des Versuchs 2 in diesem 2 θ Bereich ähnlich wie die Initialproben des Versuchs 1 verläuft. Diese Tatsache würde dafürsprechen, dass durch die niedrigeren Temperaturen in Versuch 2 der Hydratationsprozess langsamer abgelaufen ist.

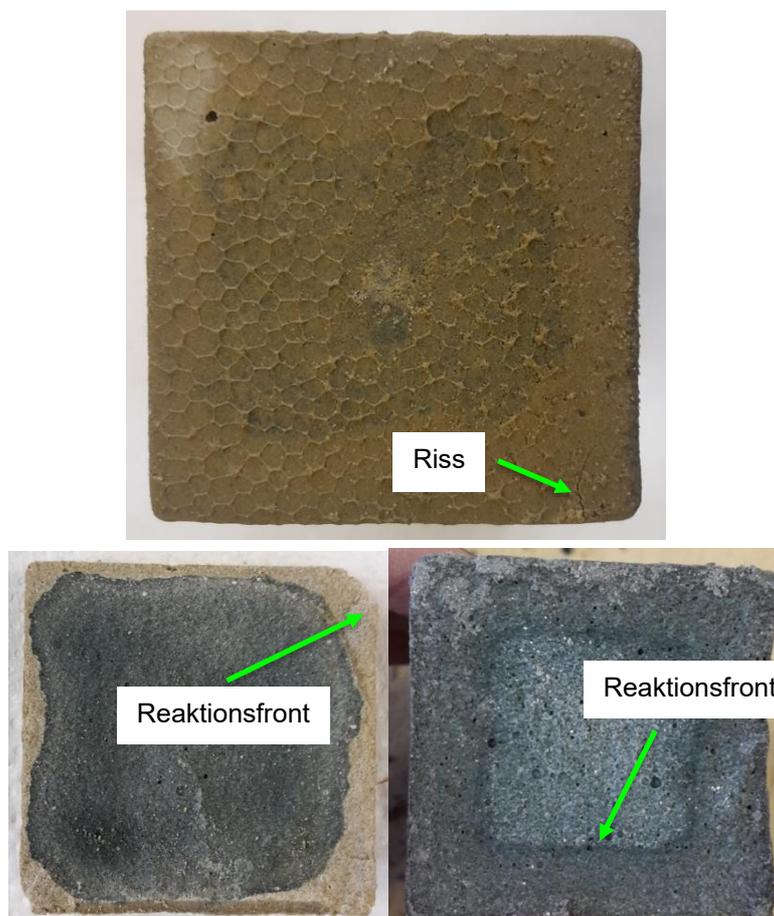


Abbildung 6-276: Rissbildung im Versuch 07d/S4K/2000 (oben), Reaktionsfront in den Versuchen 07d/S4K/2000 (unten, links) 13+d/S4K/2000 (unten rechts) bei 8 °C

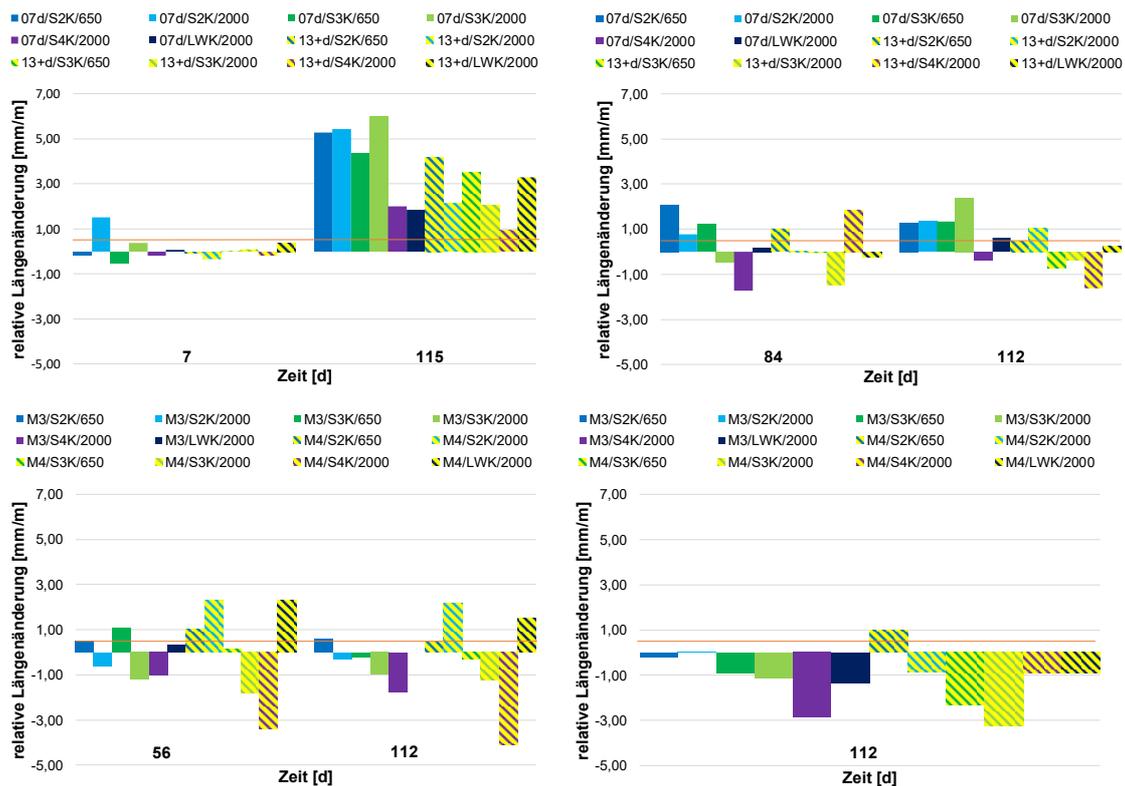


Abbildung 6-277: Relative Längenänderung der Versuchsprismen (links oben und unten bei Raumtemperatur; rechts oben und unten bei ca. 8 °C). Orange Linie ist 0,5 mm/m Grenzlinie

Ein treibender Angriff infolge einer erhöhten Sulfatkonzentration ist vor allem bei der Bildung von Ettringit und Gips im exponierten Bereich zu erwarten, wobei die Phasenumwandlung der Hydrationsprodukte des Verfüllbaustoffs mit einer Verarmung an Calcium und der Bildung von Mikrorissen einhergeht. In wieweit Gips oder Ettringit gebildet wird, hängt von der Sulfatkonzentration ab. So benötigt die Ettringitbildung geringere Sulfatkonzentrationen und ist dadurch tiefgreifender. Mit der Bildung von Gips und Ettringit geht eine Feststoffvolumenzunahme einher, die eine Gefügeverdichtung und einer temporären Zunahme der Festigkeit zur Folge hat. Erst mit der Bildung von Mikro- und Makrorissen geht die Festigkeit infolge des Sulfatgriffs zurück (Star & Wicht 2012).

Bei der Betrachtung der mineralogischen Zusammensetzung der untersuchten Proben (Abbildung 6-278 bis Abbildung 6-281 und Anhang 10.7.7) zeigen sich in Abhängigkeit des Chemismus der verwendeten Wässern, des Verfüllbaustoffs sowie der Versuchstemperatur, unterschiedliche Reaktionen im Zuge des Sulfatgriffs. Hierbei werden die Veränderungen bezüglich der Initialproben und Blindproben bewertet. Die Bildung von Thaumazit konnte in keinem der Versuche nachgewiesen werden. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass innerhalb der Versuchszeit der Sulfatgriff auf die äußeren Randbereiche der Probenkörper beschränkt war. Dies zeigt sich im Vergleich der Röntgendiffraktogramme, die aus dem Randbereich entstammen, gegenüber derer, die aus der Mitte der Probenkörper aufgenommen wurden (Abbildung 6-279 und Abbildung 6-280). Die Ettringitpeaks sind sowohl für den Verfüllbaustoff 07d als auch für den Verfüllbaustoff 13+d am Rand deutlich ausgeprägter als in der Mitte. Hierbei zeigt sich ferner, dass mit größer

werdenden Ettringitpeaks die Gipspeaks kleiner werden, da es bei der Ettringitbildung zur Umsetzung von C_3A und Gips kommt (Kapitel 4.4.3.2). Die Bildung von Ettringit ist für die verwendeten Baustoffe unterschiedlich und entwickelt sich von 07d > 13+d > M3 = M4 (Abbildung 6-278 bis Abbildung 6-281). Darüber hinaus ist die Ettringitbildung bei geringeren Temperaturen höher als bei Raumtemperatur, was sich mit Untersuchungen an Betonproben deckt (Stark & Wicht 2012). Ferner kann bezüglich der verwendeten Wässer eine Abnahme der Ettringitbildung von $S3 \geq S2 > S4 \gg LW$ beobachtet werden. Der Grund hierfür ist vielfältig, da sowohl der Verfüllbaustoff selbst als auch das Wasser die ablaufenden Reaktionen bestimmt. So wird beispielsweise in Verbindung mit Magnesiumsulfatlösungen die Bildung von Brucit und Gips an der Oberfläche der Probenkörper beobachtet, die die Diffusion der Sulfationen in den Probenkörper behindern/verlangsamen kann (Stark & Wicht 2012). Bei Vorhandensein von Calcium kann sich hingegen Portlandit bilden, der zusammen mit den Sulfationen zu Gips reagiert und bei Vorhandensein von C_3A sekundären Ettringit bilden kann.

Hinsichtlich der Mischgeschwindigkeit bei der Probenherstellung lassen sich keine eindeutigen Aussagen bei der Auswertung der Röntgendiffraktogramme zum Sulfatangriff treffen. Eine qualitative Auswertung der Röntgendiffraktogramme ist in Tabelle 6-61 gegeben.

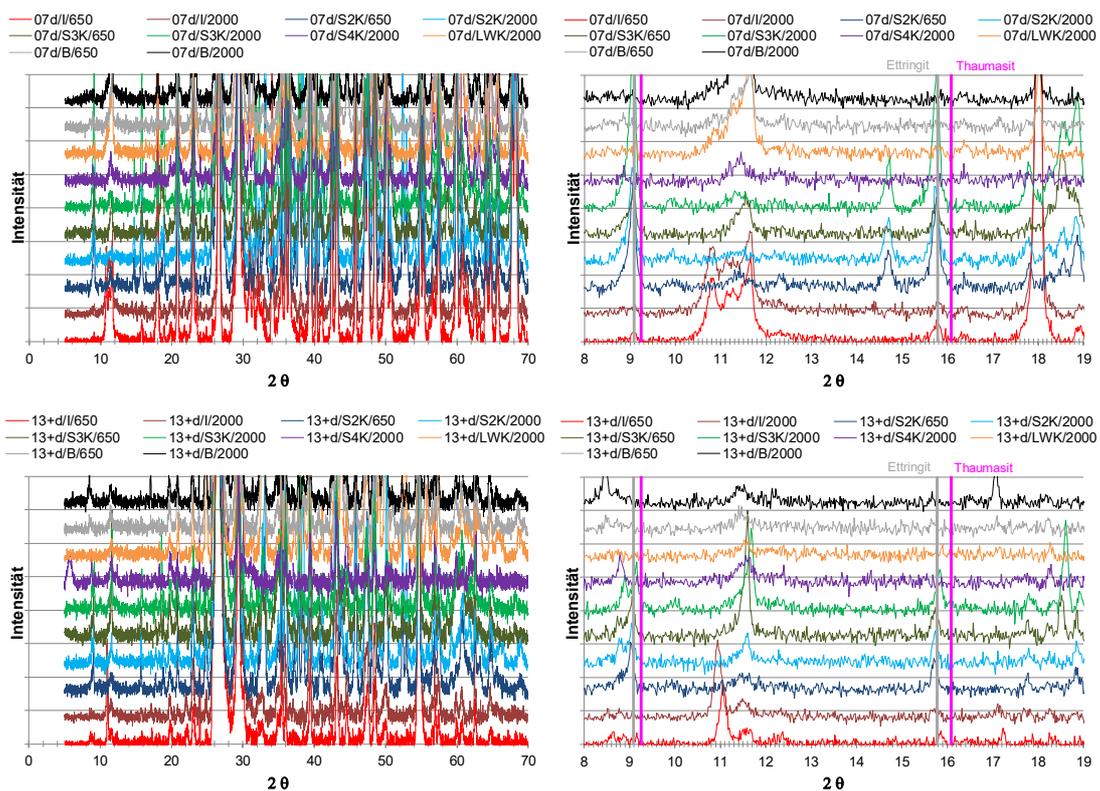


Abbildung 6-278: Mineralogische Zusammensetzung der Verfüllbaustoffe 07d (oben) und 13+d (unten) im Versuch 1 bei Raumtemperatur

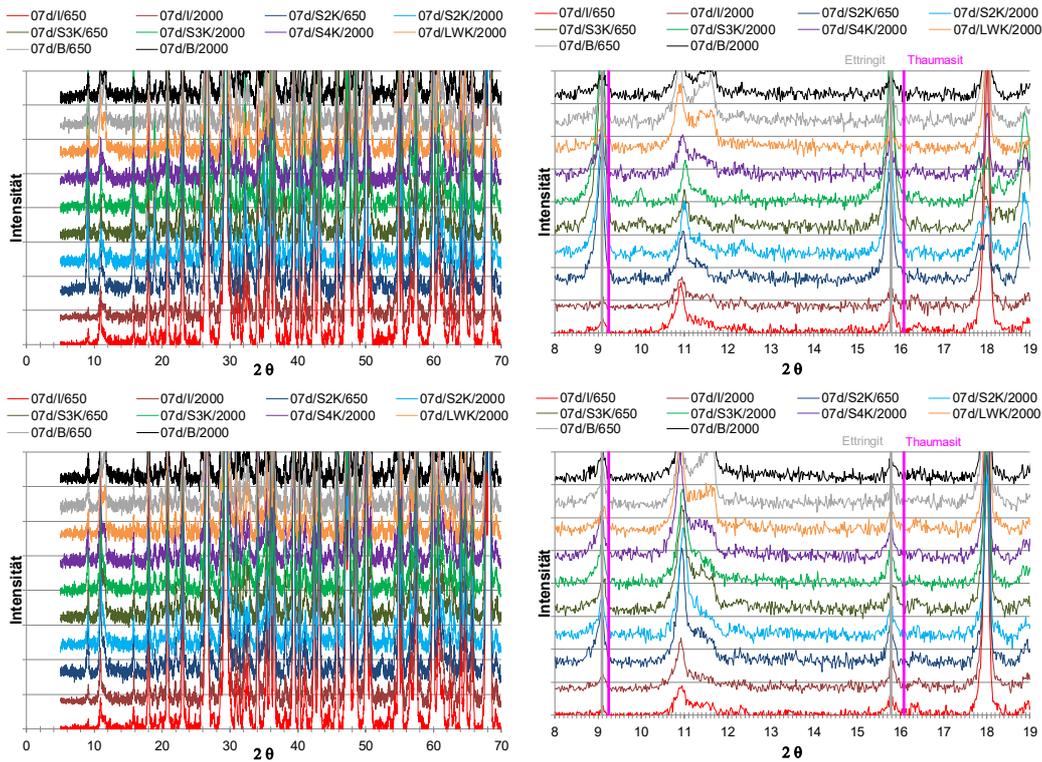


Abbildung 6-279: Mineralogische Zusammensetzung der Verfüllbaustoffe 07d im Versuch 2 bei ca. 8 °C, Probe von Außenfläche des Probenkörpers (oben) und Probe von Mitte des Probenkörpers (unten)

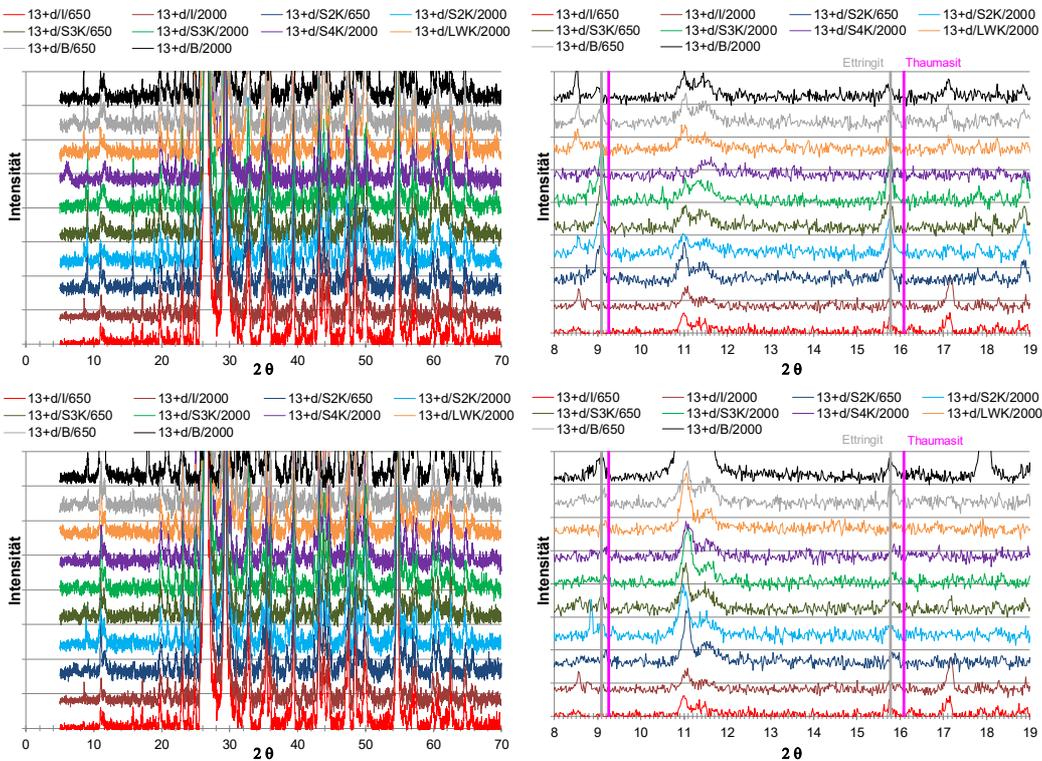


Abbildung 6-280: Mineralogische Zusammensetzung der Verfüllbaustoffe 13+d im Versuch 2 bei ca. 8 °C, Probe von Außenfläche des Probenkörpers (oben) und Probe von Mitte des Probenkörpers (unten)

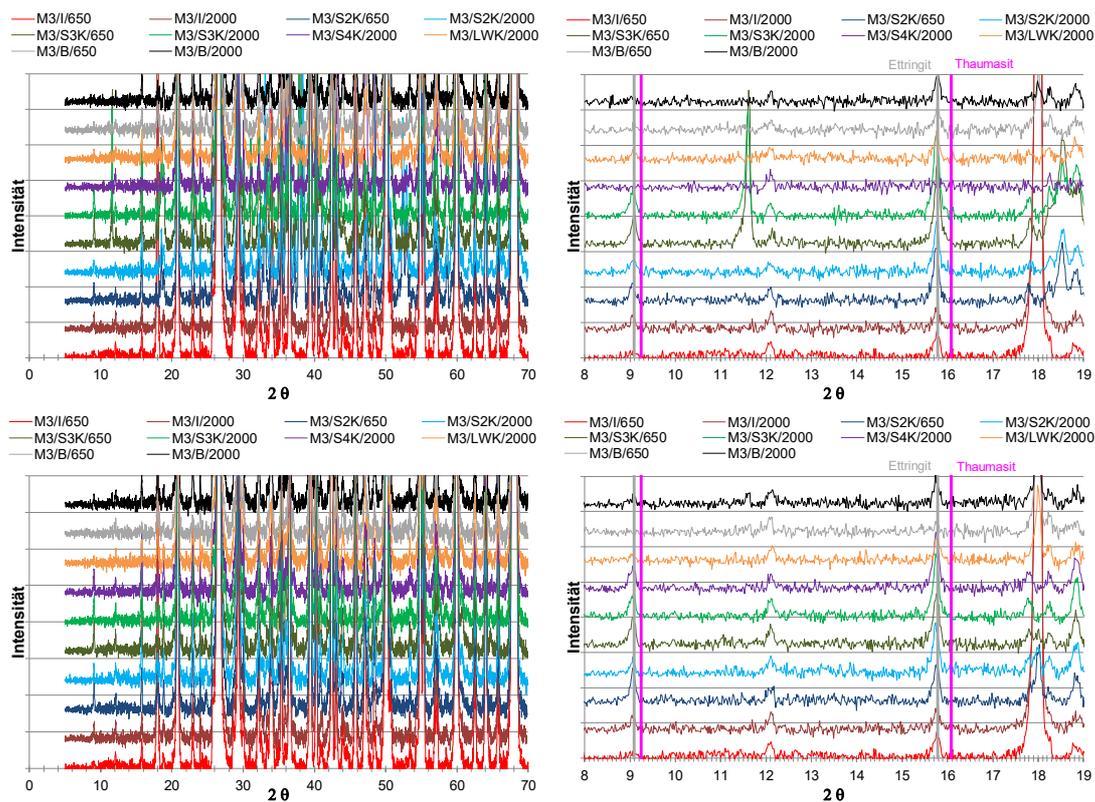


Abbildung 6-281: Mineralogische Zusammensetzung des Verfüllbaustoffs M3 im Versuch 3 bei Raumtemperatur, Probe von Außenfläche des Probenkörpers (oben) und Probe von Mitte des Probenkörpers (unten)

Von den Probekörpern wurde der Karbonatgehalt nach DIN 18129 (2011) bestimmt. Hierbei kann bedingt durch die Probenvorbereitung auch ein Teil des Portlandits miterfasst worden sein, da in Verbindung mit dem CO_2 der Luft eine Karbonatisierung des Portlandits möglich ist. Deutlich auffallend ist, dass beim verwendeten Wasser S2 die Karbonatgehalte im Randbereich der Proben deutlich höher sind als dies bei den übrigen Wässern der Fall ist (Abbildung 6-282). Dies deckt sich mit den Ergebnissen der visuellen Auswertung, in der diese Proben eine deutliche Schicht an Ausfällungen zeigen. Hierbei sind aufgrund des pH-Werts, sowie der Anwesenheit von Mg^{2+} und Ca^{2+} , vorwiegend Hydroxide ausgefallen, die sich im Versuchsverlauf, aufgrund der Versuchsbedingungen, zu Karbonat und Gips umwandelten. In Abbildung 6-282 zeigt sich darüber hinaus auch, dass im Randbereich der Karbonatgehalt i.d.R. höher ist als im Inneren der Probenkörper. Dies ist ebenfalls ein Indiz für die Karbonatisierung. Hierbei diffundierten die Ca^{2+} -Ionen der Lösung in den Probenkörper und bildeten dort Portlandit, der sich wiederum zu Karbonat umformte. Die Versuche mit den verwendeten Wässern S4 bildet eine Sonderstellung. Hier wurde neben dem Sulfatangriff auch ein Säureangriff simuliert. Aufgrund des physikalisch gelösten CO_2 stellte sich während des gesamten Versuchs entsprechend des Kalk-Kohlesäuregleichgewichts ein pH-Wert um 6 ein. In diesem pH-Bereich sind Karbonate sowie der Portlandit nicht mehr stabil und lösen sich auf. Dies zeigt sich besonders für den Verfüllbaustoff 13+d. Hier sind die Karbonatgehalte im Randbereich der Probenkörper deutlich geringer, als die der Initialproben, der Blindproben sowie in der Mitte der untersuchten Proben. Mit dem Lösungsvorgang der Karbonate

steigt in diesem Bereich auch die Porosität und damit der Stofftransport von Ionen aus den verwendeten Reaktionswässern. Dies führt letztendlich auch zu einer Reduktion des Feststoff-pH-Werts zwischen 8 und 9 innerhalb der Probenkörper (Abbildung 6-283). Für die Verfüllbaustoffe 07d, M3 und M4 ist keine deutliche Karbonatreduktion erkennbar, was auch der pH-Wertentwicklung in diesen Proben entspricht, der in diesen Proben zwischen 9 und 10 liegt. Die Porenöffnungsverteilung dieser Proben zeigt aber eine deutliche Vergrößerung des Porenraums, was durch Lösungsprozesse der Karbonate sowie des Portlandits hervorgerufen werden muss. Bei der Betrachtung der Röntgendiffraktogramme (Abbildung 6-278 bis Abbildung 6-281, Kapitel 10.7.7) fällt auf, dass bei den Initial- und Blindproben dieser Baustoffe ein deutlicher Peak des Portlandits ausgeprägt ist. Dieser Peak ist bei den Probenkörpern, die mit dem Wasser S4 umströmt wurde, nicht mehr vorhanden. Daher steht bei diesen 3 Baustoffen die Portlanditlösung im Vordergrund, während beim Baustoff 13+d, der so gut wie keinen Portlandit in den Initial- und Blindproben aufweist, der Säureangriff die Karbonatphasen erfasst.

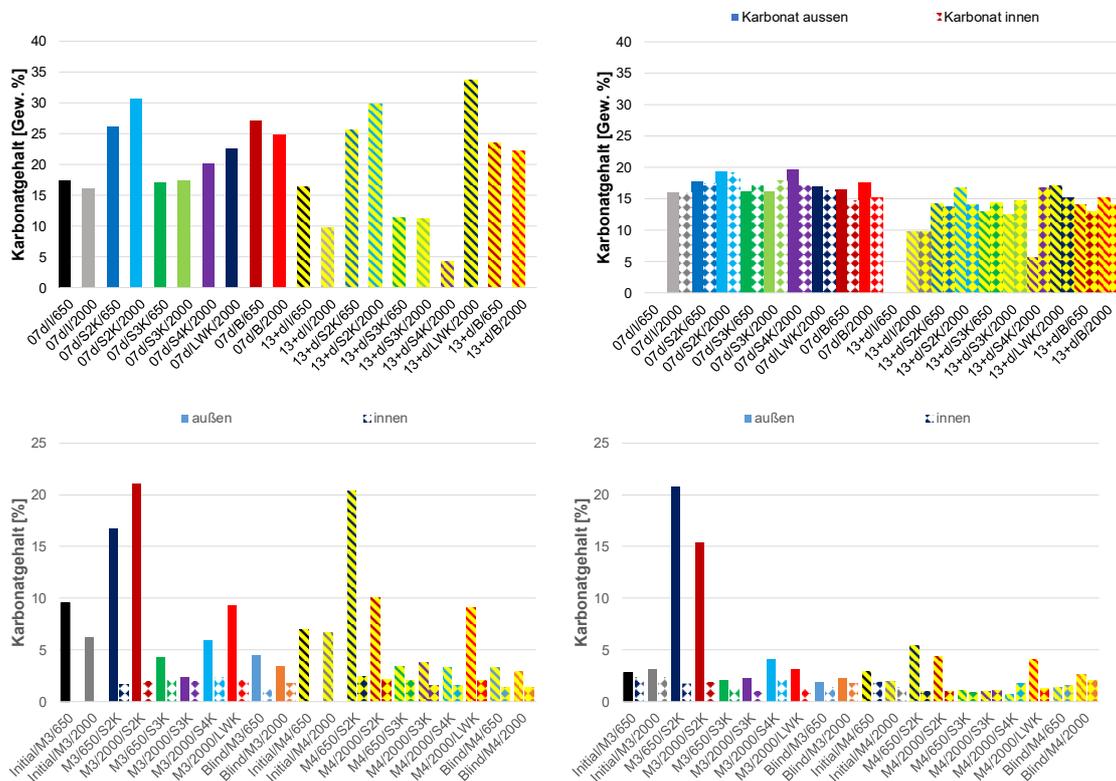


Abbildung 6-282: Karbonatgehalt der Versuchsprismen (links oben und unten bei Raumtemperatur; rechts oben und unten bei ca. 8 °C)

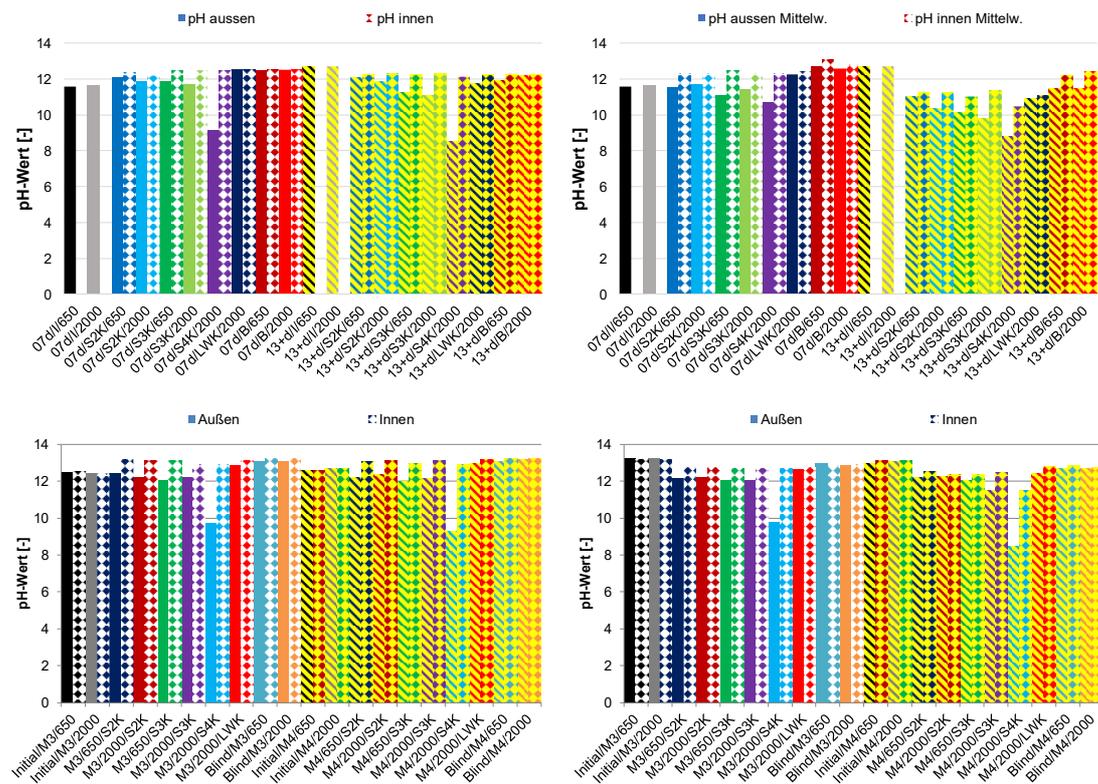


Abbildung 6-283: pH-Wert im Feststoff der Versuchsprismen (links oben und unten bei Raumtemperatur; rechts oben und unten bei ca. 8 °C)

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 6-284) 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).

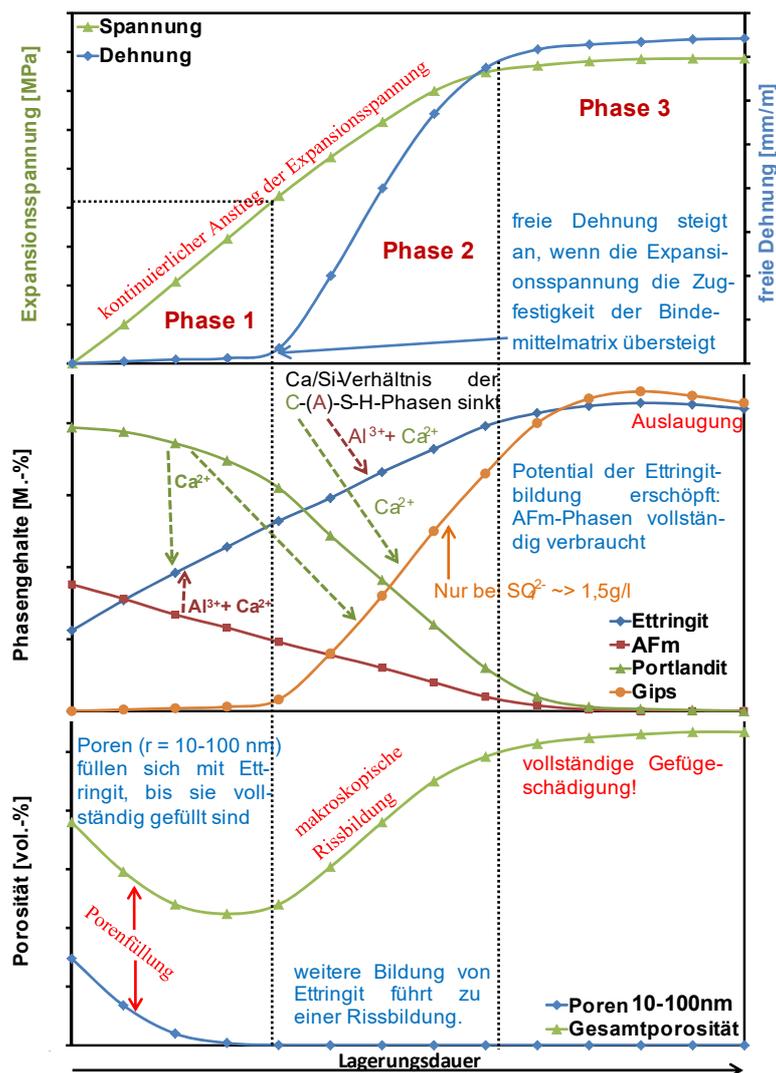


Abbildung 6-284: Schematische, qualitative Darstellung der Entstehung der Dehnung von kleinformatigen Mörtelproben (aus Müllauer 2013)

Aufgrund des Messverfahrens bei der Quecksilberporosimetrie können Bereiche mit makroskopisch sichtbaren Rissen bedingt auch durch die Probennahme und Probenvorbereitung nicht gemessen werden. Mikroskopische Risse, die durch die Gefriertrocknung keinen strukturellen Veränderungen unterworfen sind, sind jedoch messbar. In Abbildung 6-285 und Abbildung 6-286 sowie im Anhang 10.7.8 sind die Porenöffnungsverteilungen der untersuchten Probenkörper dargestellt.

In den Versuchen mit den Wässern S2 und S3 zeigt der Verfüllbaustoff 07d, gegenüber den Initialwerten, eine Verschiebung der Porenöffnungsweite hin zu kleineren Werten. Diese Entwicklung ist bei den Versuchen unter Raumtemperatur und einer Anmischgeschwindigkeit von 650 U/min am stärksten ausgeprägt. Der Grund für diese Entwicklung ist zum einen die andauernde Hydratation sowie die mögliche Bildung sekundärer Mineralphasen im Zuge des Sulfatangriffs. Da auch bei den Blindproben eine ähnliche Tendenz erkennbar ist, ist für den Versuchs-

zeitraum von 112 Tagen die Hydratation der dominierende Prozess für diese Porenraumentwicklung. Dennoch trägt auch die Bildung von sekundärem Ettringit, wie er auch durch die Röntgendiffraktometrie nachgewiesen wurde (Abbildung 6-267, Abbildung 6-268), zur Verfüllung des Porenraums bei. Diese Mineralneubildung hat jedoch zu keiner deutlichen Bildung von Mikrorissen geführt. Hierbei muss jedoch angemerkt werden, dass im Zuge des notwendigen Trocknungsprozesses, Mikrorisse Schwachstellen darstellen und die Proben an diesen Strukturen zerfallen und somit quecksilberporosimetrisch nicht erfassbar sind. Die visuelle Beobachtung hat für den Baustoff 07d bei Raumtemperatur eine deutliche Rissbildung gezeigt, die, wie bereits erwähnt, quecksilberporosimetrisch nicht erfasst werden können. Diese Risse sind vorzugsweise in einen Abstand von 2 – 4 mm parallel zur Probenoberfläche entstanden. Die Bildung von sekundären Schadmineralen wird durch die Porenstruktur, die Zusammensetzung des Baustoffes sowie dem Chemismus des Reaktionswassers bestimmt. Die untersuchten Baustoffe weisen Porenöffnungsweiten $< 3\mu\text{m}$ auf. Der Stofftransport erfolgt daher durch Diffusion und verläuft somit naturgemäß langsam. Die Eindringtiefen der Ionen aus der Reaktionslösung sind damit auf wenige Millimeter begrenzt und die Bildung von Schadmineralen ist auf diese Reaktionszone in Abhängigkeit zu den dort herrschenden Bedingungen begrenzt.

Beim Verfüllbaustoff 13+d zeigt sich keine Vergrößerung der Porenöffnungsweite im Zuge des Sulfatangriffs. Die Porenöffnungsweiten verringern sich gegenüber den Initialwerten und liegen in etwa im Bereich der Blindproben. Somit besteht für diesen Baustoff kein Indiz für die Bildung von Mikrorissen die durch die Bildung von Sekundärmineralen hervorgerufen werden. Da sich die Blindwerte von denen der behandelten Proben nur unwesentlich unterscheiden, kann auch davon ausgegangen werden, dass nur eine untergeordnete Neubildung von Gips und Ettringit stattgefunden haben kann, da ansonsten in diesem Stadium des Sulfatangriffs mit einer Reduktion des Porenraums zu rechnen gewesen wäre (Abbildung 6-284).

Bezüglich des Säureangriffs (Wasser S4) ist bei allen untersuchten Proben eine Verschiebung des Porenspektrums hin zu größeren Porenöffnungsweiten eindeutig erkennbar. Hier zeigen die Versuche, die bei Raumtemperatur durchgeführt wurden, eine etwas ausgeprägter Beeinträchtigung als die Versuche, die bei ca. $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchgeführt worden sind. Darüber hinaus zeigt der Baustoff 13+d die stärkste Vergrößerung des Porenraums, wohingegen der Baustoff 07d am geringsten beeinflusst wurde.

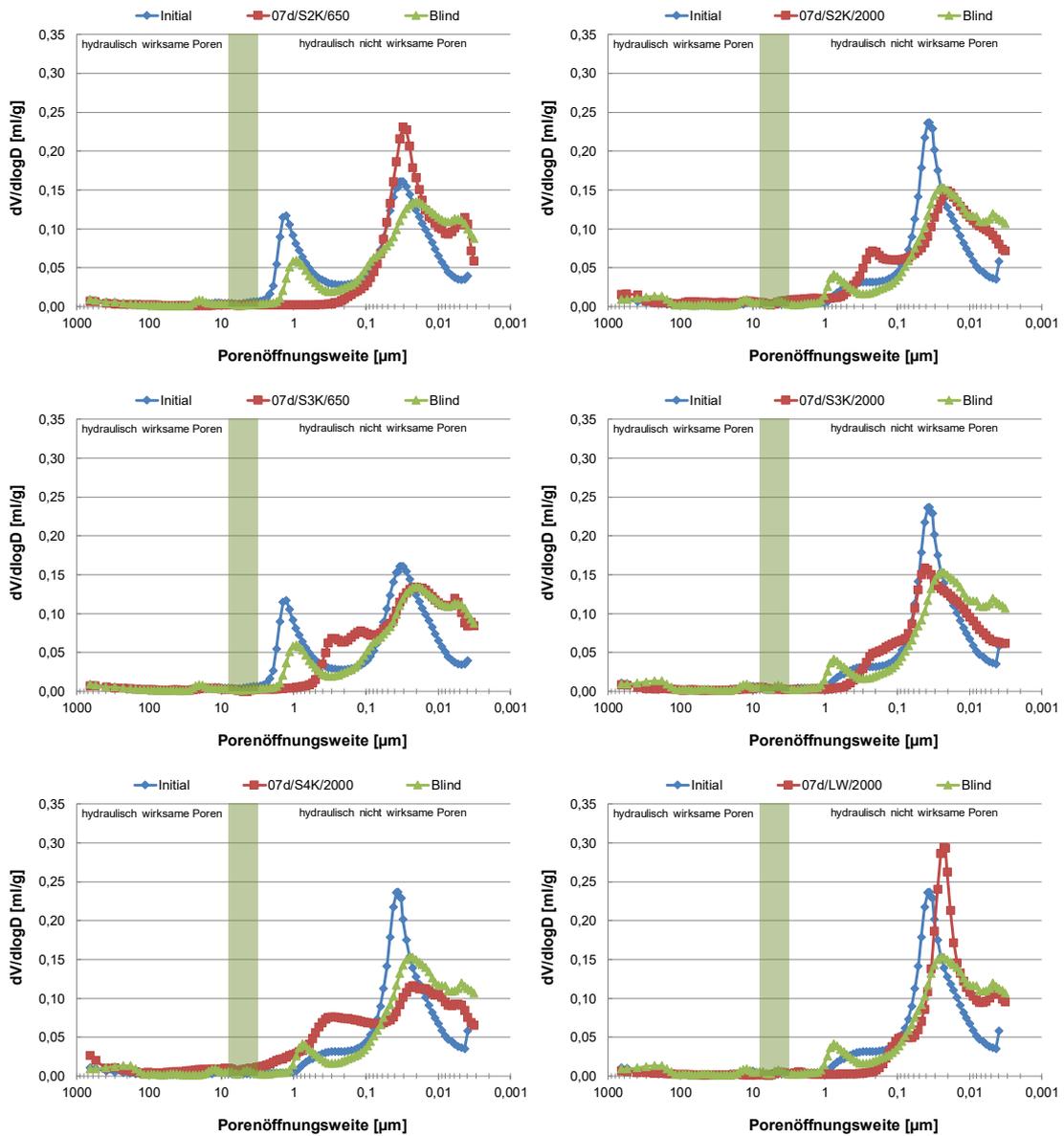


Abbildung 6-285: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs 07d bei Raumtemperatur

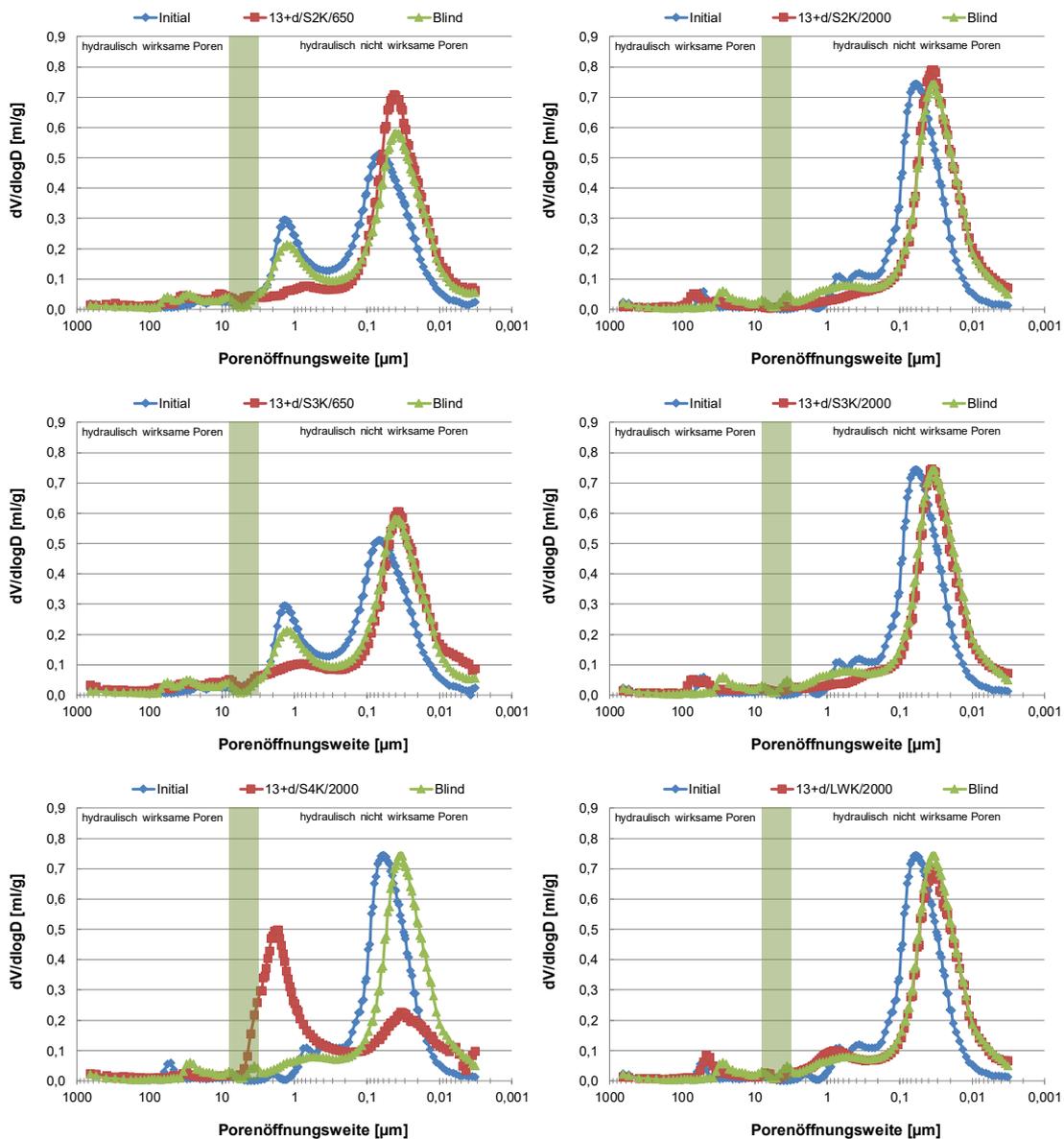


Abbildung 6-286: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs 13+d bei Raumtemperatur

Zement hat eine hohen Sulfatwiderstand, wenn die relative Biegezugfestigkeit (β_E , S/β_{LW}) von Kleinprismen (10 x 10 x 60 mm) $\geq 0,7$ ist und die bezogene Längenänderung von Flachprismen (10 x 40 x 160 mm) 0,5 mm/m nicht übersteigt (Stark & Wicht 2012). Daher wurde die Biegezugfestigkeit, die Druckfestigkeit sowie der Nadelpenrometerwiderstand aller Proben gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-287 bis Abbildung 6-289 dargestellt sowie in Tabelle 6-61 quantitativ bewertet.

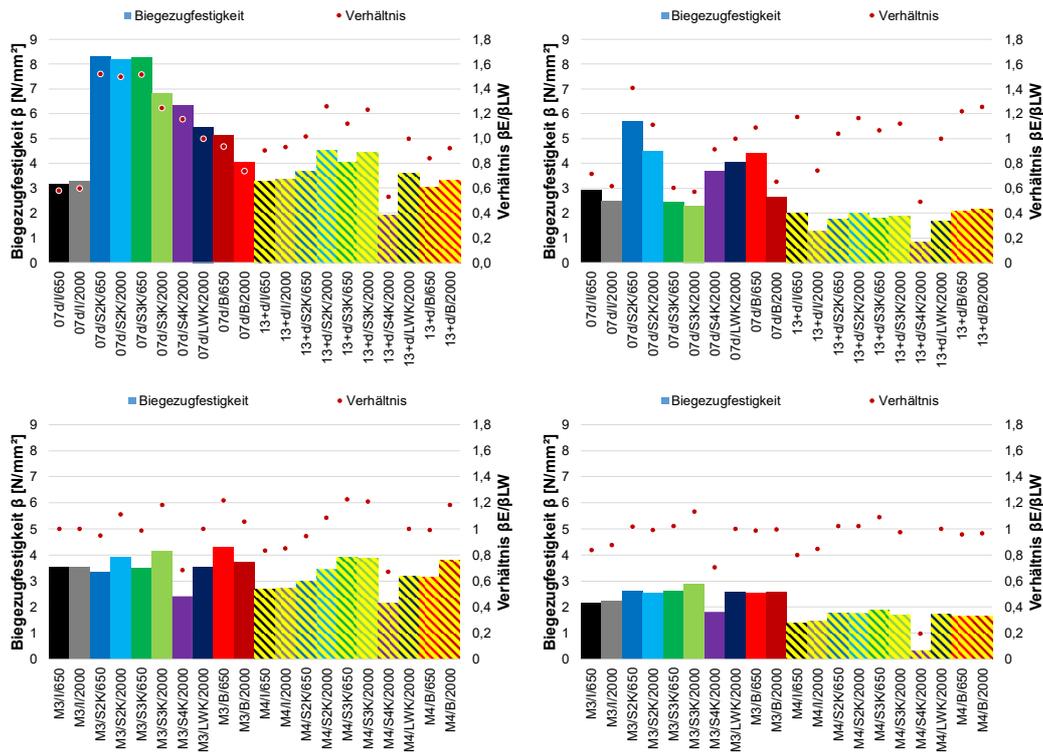


Abbildung 6-287: Biegezugfestigkeit der Versuchsprismen (links oben und unten bei Raumtemperatur; rechts oben und unten bei ca. 8 °C)

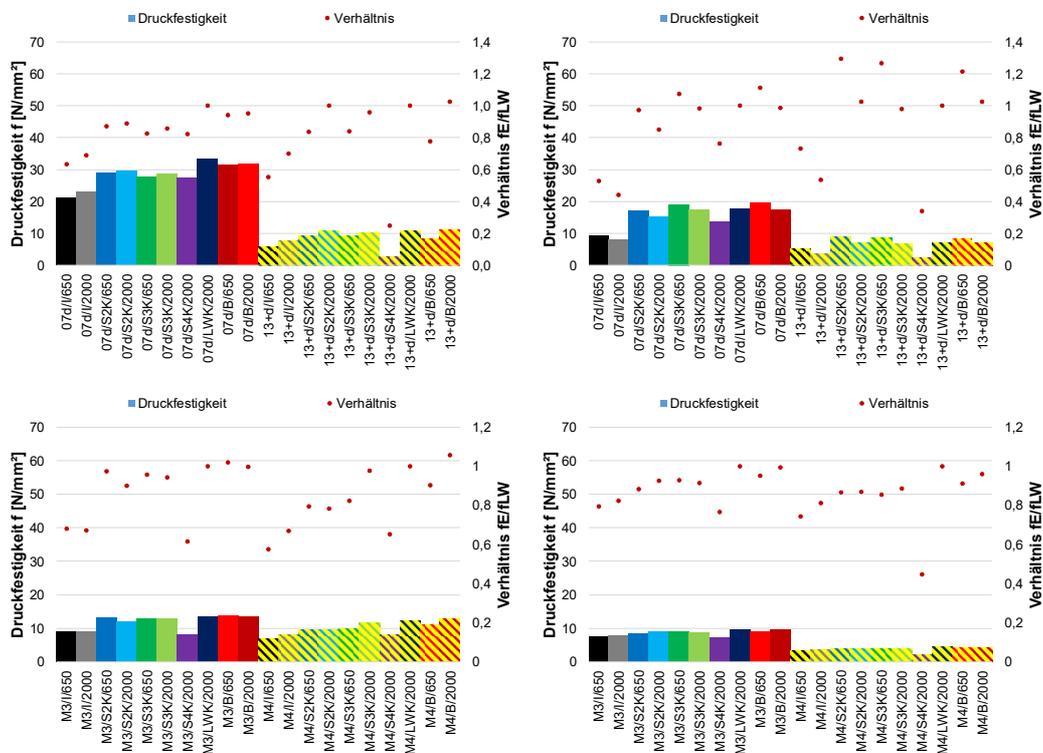


Abbildung 6-288: Druckfestigkeit der Versuchsprismen (links oben und unten bei Raumtemperatur; rechts oben und unten bei ca. 8 °C)

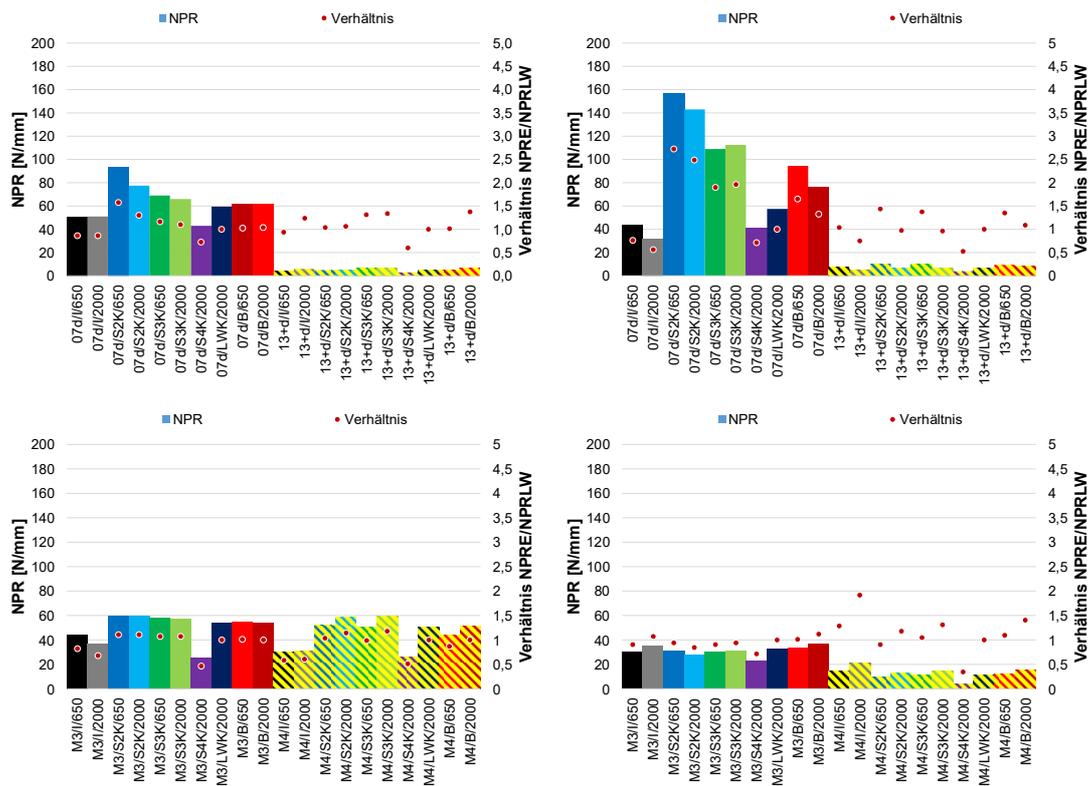


Abbildung 6-289: Nedelpeneterometerwiderstand der Versuchsprismen (links oben und unten bei Raumtemperatur; rechts oben und unten bei ca. 8 °C)

Hierbei zeigt sich für den Sulfatangriff, dass die Biegezugfestigkeit für alle Versuche bis auf 07d/S3/650 und 07/S3/2000 bei ca. 8 °C diese Vorgaben erfüllen. Da die Eindringtiefe der Reaktionsfront jedoch nur wenige Millimeter beträgt, ist nicht sicher, ob dieses Kriterium bei den durchgeführten Versuchen unter den gegebenen Versuchsbedingungen, herangezogen werden kann. Dies ist besonders bei den Versuchen des Baustoffs 07d unter Raumtemperatur von Interesse, da hier aus der visuellen Beobachtung eine deutliche Schädigung der Probenkörper in Folge des Sulfatangriffs aufgetreten ist, die relative Biegezugfestigkeit jedoch Werte zwischen 1,25 und 1,52 aufweisen. Diese Beobachtung gilt auch für den Fall, dass als Bezugsgröße für die relative Biegezugfestigkeit die Werte der Blindproben herangezogen werden. Um gesicherte Aussagen hinsichtlich der Sulfatbeständigkeit treffen zu können, müssen daher entweder die Versuchszeiten deutlich höher angesetzt werden (> 365 Tage) oder die Probenkörper müssen kleiner sein (z. B. Kleinprismen). Die Druckfestigkeit und der NPR zeigen weitgehend die gleichen Ergebnisse. Hier bestehen die zwei oben erwähnten Versuche allerdings das Kriterium der Sulfatbeständigkeit. Für den Säureangriff sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen jedoch eindeutig. Hier sind die Werte der relativen Biegezugfestigkeit deutlich geringer und für den Baustoff 13+d liegen sie unterhalb 0,7. Damit erfüllt dieser Baustoff die Kriterien nicht. Die relativen Biegezugfestigkeiten sind bei allen untersuchten Baustoffen - außer Baustoff 07d - deutlich geringer als beim Sulfatangriff. Da aber die Reaktionsfront auch beim Säureangriff nicht vollständig in den Probenkörper eingedrungen ist, lässt sich die Frage nach einem eindeutigen Kriterium für die Schädigung infolge eines Säureangriffs nicht abschließend bewerten.

Tabelle 6-61: Auswertung der Versuchsprismen nach Versuchsende (Versuche bei Raumtemperatur; Versuche bei ca. 8 °C)

Versuch	Ettringit/Thaumasit	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	NPR
07d/S2K/650	+ E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S2K/2000	+ E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S3K/650	+ E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S3K/2000	+ E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S4K/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/LWK/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S2K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S2K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S3K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S3K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S4K/2000	-	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7
13+d/LWK/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S2K/650	+ E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S2K/2000	+ E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S3K/650	+ E	< 0,7/< 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S3K/2000	+ E	< 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
07d/S4K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/< 0,7
07d/LWK/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S2K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S2K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S3K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S3K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
13+d/S4K/2000	-	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7
13+d/LWK/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7

+ stark; o schwach; - nicht erkennbar, E = Ettringit, Th = Thaumasit, Bei den Festigkeitswerten und NPR ist der erste Wert auf den Versuch mit Leitungswasser bezogen, der zweite Wert ist auf den Blindwert bezogen.

Versuch	Ettringit/Thaumasit	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	NPR
M3/S2K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S2K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S3K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S3K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S4K/2000	-	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7
M3/LWK/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S2K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S2K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S3K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S3K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S4K/2000	-	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7
M4/LWK/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S2K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S2K/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S3K/650	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S3K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M3/S4K/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/< 0,7
M3/LWK/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S2K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S2K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S3K/650	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S3K/2000	o E	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7
M4/S4K/2000	-	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7	< 0,7/< 0,7
M4/LWK/2000	-	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7	> 0,7/> 0,7

+ stark; o schwach; - nicht erkennbar, E = Ettringit, Th = Thaumasit, Bei den Festigkeitswerten und NPR ist der erste Wert auf den Versuch mit Leitungswasser bezogen, der zweite Wert ist auf den Blindwert bezogen.

Die durchgeführten Umströmungsversuche haben gezeigt, dass sie prinzipiell dazu geeignet sind, Verfüllbaustoffe hinsichtlich zementaggressiver Wässer zu bewerten. Dennoch gibt es einige Versuchsparameter, die es zu optimieren gilt, um gesicherte Aussage zur dauerhaften Verwendung zementhaltiger Verfüllbaustoffe im Umfeld zementaggressiver Wässer zu erlauben. Ein wesentlicher Parameter ist die Anpassung der Probengröße an die Versuchsdauer. In dieser Studie wurden die Standardversuchsprismen zur Festigkeitsuntersuchung nach DIN EN 196-1 (2016) verwendet. Aufgrund ihrer Größe sind hierbei jedoch sehr lange Versuchszeiten erforderlich. Um hier wirtschaftlicher und zielorientierter agieren zu können, wäre eine Umstellung auf Kleinprismen sinnvoll, wodurch auch die Versuchszeiten auf ca. 100 Tage reduziert werden könnte. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Festlegung des Chemismus der Reaktionslösung. Hierbei gilt es realitätsnahe Bedingungen abzubilden, da die ablaufenden Prozesse bei der Mineral(um)bildung neben der Zusammensetzung des Verfüllbaustoffs sehr stark von den verfüg-

baren Ionen, deren Konzentration, sowie den physikochemischen Bedingungen in der Reaktionslösung abhängt. Konzentrationen ($14.400 \text{ mg/l SO}_4^{2-}$) wie sie beim Wittkeindt-Verfahren eingesetzt werden, bedingen zwar einen aggressiven Sulfatangriff, hierbei verlaufen die Prozesse jedoch nicht realitätsnah und es ist somit nicht gesichert, ob der Verfüllbaustoff den Anforderungen an die Verfüllkriterien nach VDI 4640 Blatt 2 erfüllt. Aufgrund der Wechselwirkungen Verfüllbaustoff/Reaktionslösung verändert sich der Chemismus, sowie die physikochemischen Eigenschaften der Reaktionslösung. Daher sollten die Probenkörper, wie in dieser Studie, kontinuierlich umströmt werden.

Hinsichtlich den Untersuchungsmethoden sowie der Beurteilungskriterien sollten noch weitere Untersuchungen erfolgen.

Nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15697 (2008) werden üblicherweise folgende Untersuchungsmethoden durchgeführt.

- Änderung der Länge (Längenausdehnung);
- Änderung der Druckfestigkeit;
- Änderung der Biegezugfestigkeit;
- Änderung der Masse;
- Änderung des Erscheinungsbildes;
- Änderung des elastischen dynamischen Moduls

Die Kriterien zur Beurteilung eines hohen Sulfatwiderstands sind dann gegeben, wenn die relative Biegezugfestigkeit von Kleinprismen wenigstens 0,7 beträgt und die bezogene Längenänderung von Flachprismen $0,5 \text{ mm/m}$ nicht übersteigt (Stark & Wicht 2012). Da in diesen Fällen unterschiedliche Probenkörper herzustellen wären und diese auch unterschiedliche Umströmungszellen erfordern, wäre dies mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Daher wäre es sinnvoll, die Versuche mit einer einheitlichen Probengröße durchzuführen. Diese muss so gewählt werden, dass die Untersuchungsmethoden reproduzierbare Werte liefern, der Verfüllbaustoff mit der Reaktionslösung realitätsnah agiert, der Probenkörper vollständig reagiert hat und die Versuchszeit möglichst kurz ist. Unter diesen Gesichtspunkten wäre eine Probengröße von $10 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ (Flachprismen) sinnvoll. Es hat sich in den durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass die verwendeten Wässer S2 und S3 einen Sulfatangriff simulieren und gleichzeitig dem Grundwasserchemismus nahekommen, sodass beide Wässer für weitere Untersuchungen in Frage kommen. Dies gilt auch für das Wasser S4, das für den Säureangriff herangezogen wurde. So kann in weiteren Untersuchungen unter den genannten Bedingungen überprüft werden, ob die aus der Zementindustrie stammenden Beurteilungskriterien auch für Verfüllbaustoffe herangezogen werden können.

Hinsichtlich der Beständigkeit von Verfüllbaustoffen gegenüber zementaggressiven Wässern sollten die ausgehärteten Suspensionen einige physikalische und chemische Anforderungen erfüllen:

- Physikalische Bedingungen:
 - geringe Porenöffnungsweiten und Porositäten
 - hoher Verdichtungsgrad
- Chemische Bedingungen:
 - geringe Mengen an aluminiumhaltigen Hydratphasen nach der Erhärtung

6.8.3. Reaktivität und Reaktionskinetik von Verfüllbaustoffen im Kontakt mit Gipskeuper

Die im Antrag beschriebene Fragestellung zur Beurteilung des Potentials von Schadreaktionen (in erster Linie der Bildung von Ettringit und/oder Thaumasit) infolge des Kontakts von EWS-Verfüllbaustoffen zu sulfathaltigen Gesteinen und/oder Grundwässern sollte an ausgewählten Verfüllbaustoffen experimentell untersucht werden.

Zu diesem Zweck wurden zwei kommerzielle Verfüllbaustoffe herangezogen, welche bereits in vorangegangenen Projekten am IMB/MPA Karlsruhe untersucht worden waren und von denen bekannt war, dass sie bei einem in Baden-Württemberg bestehenden Schadensfall zum Einsatz gekommen waren. Proben der Verfüllbaustoffe wurden zusammen mit Gips- und Anhydrit-führenden „Gipskeuper“-Gesteinen und Wasser als Batch- und Kontaktversuche über einen längeren Zeitraum unter naturnahen Bedingungen (in Bezug auf Wasserzusammensetzung und Temperatur) gelagert. Insgesamt wurden bereits im Mai 2016 16 Batchversuche und 14 Kontaktversuche angesetzt, detailliert sind die Versuche in den Abschnitten 6.8.3.1 und 6.8.3.2 beschrieben. Zu fünf Zeitpunkten (zwischen 1,5 und 46 Monaten nach Versuchsstart) wurden von den Batch- und Kontaktversuche Materialproben entnommen und mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) auf das Vorhandensein von Ettringit und Thaumasit untersucht. Diese beiden Minerale können durch Umwandlung aus Zementbestandteilen in Anwesenheit einer Sulfatquelle (z.B. Gips oder Anhydrit) entstehen und geben Hinweise auf eine mögliche Reduzierung der Bohrlochanbindung an das umgebende Gestein. Beide Mineralumwandlungen führen dabei zu einer Volumenzunahme, die Umwandlung zu Thaumasit kann außerdem zu einer Vergelung des Verfüllbaustoffs und somit zu einer starken Abnahme der Festigkeit führen.

6.8.3.1. Probenmaterial

Verfüllbaustoffe

Zwei bei einem in Baden-Württemberg bestehenden Schadensfall in der Vergangenheit eingesetzte kommerzielle Verfüllbaustoffe wurden für die Untersuchungen herangezogen:

- im Folgenden **Verfüllbaustoff A** genannt
- im Folgenden **Verfüllbaustoff B** genannt

Zum Zeitpunkt des Beginns der Untersuchungen war nur noch Verfüllbaustoff A auf dem Markt verfügbar. Deshalb konnte nur von Verfüllbaustoff A frisch angemischtes Material für die Kontaktversuche eingesetzt werden (Abschnitt.6.8.3.2).

Daneben lagen von beiden Verfüllbaustoffen für die Versuchsdurchführungen ausgehärtetes Material aus überbohrten EWS sowie aus an der MPA Karlsruhe in der Vergangenheit bearbeiteten Projekten vor. Dieses kam sowohl bei den Batchversuchen als bei Verfüllstoff B zusätzlich bei den Kontaktversuchen zum Einsatz (Abschnitt .6.8.3.2).

XRD-Untersuchungen der beiden Verfüllbaustoffe (ausgehärtetem Material aus überbohrten EWS) zu Beginn der Langzeituntersuchungen zeigten prinzipiell eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung der beiden Verfüllbaustoffe. Die dominierenden mit XRD detektierbaren kristallinen Phasen sind beim ausgehärteten Material jeweils Quarz und Calcit, sehr untergeordnet treten daneben Glimmer und Feldspäte auf. Unhydratisierte Zementphasen (insbesondere C₃S oder C₂S) sind in den ausgehärteten Proben nicht mehr nachweisbar.

Gesteine des „Gipskeupers“

Für die Durchführung der Versuche wurde vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) zur Verfügung gestelltes Material aus einer Kernbohrung aus dem Bereich der Grabfeld-Formation („Gipskeuper“) verwendet, wie es auch am oben genannten in Baden-Württemberg bestehenden Schadensfall im Kontakt mit den Verfüllbaustoffen A und B anzutreffen gewesen war. Das Material lag in Form von Gesteinsmehl und Festgestein vor. XRD-Untersuchungen zeigten, dass das Gesteinsmaterial häufig die Minerale Gips und Anhydrit nebeneinander enthielt, jedoch in deutlich variierenden Mengenverhältnissen. Für die Batch- und Kontaktversuche wurde jeweils sowohl Gips-dominiertes als auch Anhydrit-dominiertes Material verwendet (im Folgenden in den Tabelle 6-63 bis Tabelle 6-67 bei Gestein als Gips oder Anhydrit bezeichnet).

Eingesetztes Mineralwasser

Die Laborversuche sollten mit einem Wasser durchgeführt werden, dessen Zusammensetzung möglichst dem des Grundwassers entsprach, welches am Ort des oben genannten bestehenden Schadensfalls in direktem Kontakt mit den Verfüllbaustoffen A und B gestanden hatte. Für die Laborversuche wurde ein auf dem Markt erhältliches Mineralwasser verwendet, da es eine sehr ähnliche Zusammensetzung wie das besagte Grundwasser aufwies. Zur exakten Charakterisierung wurde das in allen Versuchen eingesetzte Mineralwasser nasschemisch auf seine Hauptionen untersucht. Eine vergleichende Darstellung der Analysenergebnisse des lokalen Grundwassers vom Ort des Schadensfalls, der Herstellerangaben des verwendeten Mineralwassers sowie der im Projekt ermittelten Laborergebnisse des Mineralwassers ist in Tabelle 6-62 dargestellt. Hierbei zeigen die Analysen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Herstellerangaben.

Tabelle 6-62: Hauptionengehalte des Grundwassers der Schadensstelle sowie des bei den Versuchen verwendeten Mineralwassers

Ion	Grundwasser [mg/l]	Mineralwasser	
		Herstellerangabe [mg/l]	Laborergebnisse [mg/l]
Natrium	23	17	18,7
Kalium	11	5	6,1
Calcium	477	485	521
Magnesium	60	65	68,7
Chlorid	28	28	30,7
Sulfat	1140	1110	1176
Hydrogencarbonat	360	412	409

6.8.3.2. Untersuchungsprogramm

Batchversuche

Die Batchversuche dienten zur Untersuchung der prinzipiellen Neigung zur Ettringit- und/oder Thaumasilbildung der verwendeten Verfüllbaustoffe A und B mit dem für die Versuche ausge-

wählten Mineralwasser in Gegenwart von Gips- oder Anhydrit-führenden Gesteinen (im Folgenden als Gips und Anhydrit bezeichnet). Verfüllbaustoffe und Gesteine lagen in den Batchversuchen in aufgemahlener Form miteinander vermengt vor, um infolge eines sehr hohen Verhältnisses von Feststoffoberfläche zu Flüssigkeitsvolumen ein erhöhtes Potential für eine rasche und ausgeprägte Mineral- Neubildung von Ettringit- und/oder Thaumazit zu erzielen.

Für die Batchversuche wurden aus vorliegenden Reststücken der vier Materialien (Anhydrit, Gips, Verfüllbaustoff A und B) in einer Achatmühle Pulverproben hergestellt. Von Verfüllbaustoff A wurden hierfür vorhandene Prismen aus dem Vorgängerprojekt EWS-tech verwendet (Herstellung der Proben 08.2014 bis 04.2015, Lagerung bei 20 °C und 100 % Luftfeuchtigkeit). Von Verfüllbaustoff B wurde Material aus einer überbohrten EWS verwendet.

Je Einzelversuch betrug die Einwaage 400 Gramm des Mineralwassers sowie jeweils 100 Gramm eines Verfüllbaustoff und eines Gesteins. Die Versuche wurden in 500-ml-PE-Weithalsflaschen bei langsamer und konstanter Rotation im Überkopfschüttler durchgeführt (Abbildung 6-290). Das Versuchsprogramm ist Tabelle 6-63 zu entnehmen, es deckt vier Feststoff-Kombinationsmöglichkeiten von Verfüllbaustoffen und Gesteinen sowie zwei Anordnungen ohne Gestein ab (= sechs Anordnungen). Die Versuche erfolgten überwiegend bei einer Temperatur von 10 °C, was typischen Umgebungstemperaturen der EWS im Untergrund entspricht. Alle sechs Anordnungen wurden bei 10 °C jeweils doppelt ausgeführt. Vier Batchversuche (einer je Feststoff-Kombination) wurden zusätzlich als Vergleichsversuche bei Raumtemperatur (20 °C) durchgeführt. Alle Batchversuche starteten im Mai 2016.

Tabelle 6-63: Versuchsprogramm der Batchversuche

Probe	Temperatur [°C]	Verfüllbaustoff	Gestein
B1	10	B	-
B2	10	B	-
B3	10	B	Gips
B4	10	B	Gips
B5	10	B	Anhydrit
B6	10	B	Anhydrit
B7	10	A	-
B8	10	A	-
B9	10	A	Gips
B10	10	A	Gips
B11	10	A	Anhydrit
B12	10	A	Anhydrit
B13	20	B	Gips
B14	20	B	Anhydrit
B15	20	A	Gips
B16	20	A	Anhydrit



Abbildung 6-290: Batchversuche im Überkopfschüttler im Kühlschrank bei 10 °C

Kontaktversuche - Überblick

Zusätzlich zu den Batchversuchen erfolgten Kontaktversuche bei denen eine realitätsnahe Simulation des Kontakts von Verfüllbaustoffen und Gesteinen in EWS im Vordergrund stand. Dabei war es von besonderer Bedeutung einen intensiven Kontakt der verschiedenen Materialoberflächen zu ermöglichen. Bei diesen Versuchen war das Verhältnis von Feststoffoberfläche zu Flüssigkeitsvolumen deutlich geringer als bei den Batchversuchen.

Das entsprechende Versuchsprogramm ist in Tabelle 6-64 zusammengefasst. Wie bei den Batchversuchen wurden alle vier Feststoff-Kombinationsmöglichkeiten von Verfüllbaustoffe und Gesteinen untersucht. Die Kontaktversuche wurden zudem in zwei verschiedenen Konfigurationen durchgeführt:

- **Halbzylinder-Versuch:** In einer Konfiguration wurden längs der Zylinderachsen halbierte Bohrkerne der Gesteine (Gips und Anhydrit) in Kontakt mit den Verfüllbaustoffen gebracht. Hierfür wurden aus Verfüllbaustoff B ebenfalls halbierte Bohrkerne (Abbildung 6-294) hergestellt und gegen das Gestein verspannt (Abbildung 6-296). Verfüllbaustoff A wurde dagegen frisch an die halbierten Gesteins-Bohrkerne „betoniert“ (Abbildung 6-298).
- **Bohrloch-Versuche:** In der anderen Konfiguration wurde ein miniaturisiertes Bohrloch innerhalb des Gesteins-Bohrkerns hergestellt und anschließend mit Verfüllbaustoff ausgefüllt (Abbildung 6-298). Diese Versuchskonfiguration konnte nur mit Material A hergestellt werden, da Material B nicht mehr auf dem Markt verfügbar war und somit nicht frisch angemischt und vergossen werden konnte.

Halbzylinder-Versuche aller vier Feststoff-Kombinationsmöglichkeiten wurden bei einer Lagerungstemperatur von 10 °C jeweils doppelt durchgeführt. Vier Halbzylinder-Versuche (einer je Kombination Gesteinsart/Verfüllbaustoff) wurden zusätzlich als Vergleichsversuche bei Raumtemperatur (20 °C) durchgeführt. Alle Kontaktversuche starteten im Mai 2016.

Tabelle 6-64: Versuchsprogramm und Konfiguration der Kontaktversuche

Probe	Temperatur [°C]	Verfüllbaustoff	Gestein	Konfiguration
K1	10	B	Anhydrit	Halbzylinder
K2	10	B	Anhydrit	Halbzylinder
K3	10	B	Gips	Halbzylinder
K4	10	B	Gips	Halbzylinder
K5	10	A	Anhydrit	Halbzylinder
K6	10	A	Anhydrit	Halbzylinder
K7	10	A	Anhydrit	Bohrloch
K8	10	A	Gips	Halbzylinder
K9	10	A	Gips	Halbzylinder
K10	10	A	Gips	Bohrloch
K11	20	B	Anhydrit	Halbzylinder
K12	20	B	Gips	Halbzylinder
K13	20	A	Anhydrit	Halbzylinder
K14	20	A	Gips	Halbzylinder

Kontaktversuche – Probenherstellung

Präparation von Gips und Anhydrit für Kontaktversuche

Die Präparation der Gesteine für alle Kontaktversuche erfolgte indem aus den Gips- und Anhydrit-Bohrkernen im Nasssägeverfahren 7 cm hohe Zylinder hergestellt wurden. Der Großteil dieser Zylinder wurde für die Versuchskonfiguration „Halbzylinder“ parallel der Zylinderachse halbiert (Abbildung 6-291). In jeweils zwei der Gips- und Anhydritzylinder wurde für die Herstellung der Versuchskonfiguration „Bohrloch“ eine Kernbohrung mit 5 cm Durchmesser eingebracht (Abbildung 6-292).



Abbildung 6-291: Halbierter Bohrkern Gips/Anhydrit

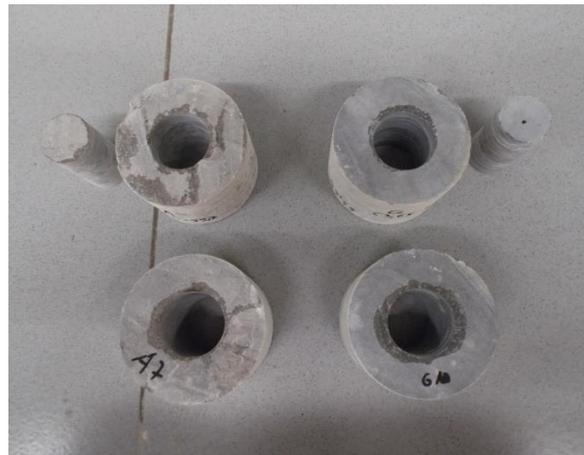


Abbildung 6-292: Anhydritbohrkern mit 5 cm Kernbohrung

Kontaktversuche mit Verfüllbaustoff B

Ein massiges Stück von Verfüllbaustoff B wurde mit einem 10 cm Kernbohrer durchbohrt (Abbildung 6-293). Anschließend wurde dieser Bohrkern ebenfalls in 7 cm hohe Zylinder gesägt und diese anschließend parallel der Zylinderachse halbiert (Abbildung 6-294). Nach dem Sägen wurden alle Halbzylinder (Gips, Anhydrit, Verfüllbaustoff B) bei 20 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit über mehrere Tage konditioniert.

Um während der Versuche intensiven Kontakt der Materialoberflächen von Gestein und Verfüllbaustoff zu ermöglichen, wurden spezielle Spannvorrichtungen entwickelt. Diese bestehen aus einem flexiblen, 7 cm hohen Edelstahlblech, das von je 2 Manschetten in Ringform gehalten wird (Abbildung 6-295). Gitter (Maschenweite 1 cm) auf der Ober- und Unterseite verhindern den Ausstrag grober Partikel während des Versuchs. Die Gitter werden durch 2 Stahlkreuze und 4 Gewindestangen von oben und unten gegen den Blechring verspannt (Abbildung 6-296). Alle Zylinder wurden so zusammengesetzt, dass durch die Lage der Gewindestangen ein Abstand von ca. 1 cm zum Untergrund eingehalten werden kann und die Proben somit später oben und unten in Kontakt zur Flüssigkeit stehen.



Abbildung 6-293: Bohrkern aus Verfüllbaustoff B



Abbildung 6-294: Halbierter Bohrkern aus Verfüllbaustoff B

Auf diese Art wurden Zylinderhälften von Verfüllbaustoff B und Gips (3 Stück) bzw. von Verfüllbaustoff B und Anhydrit (3 Stück) in Haltevorrichtungen eingebaut (Tabelle 6-64).



Abbildung 6-295: Haltevorrichtung für die Kontaktversuche

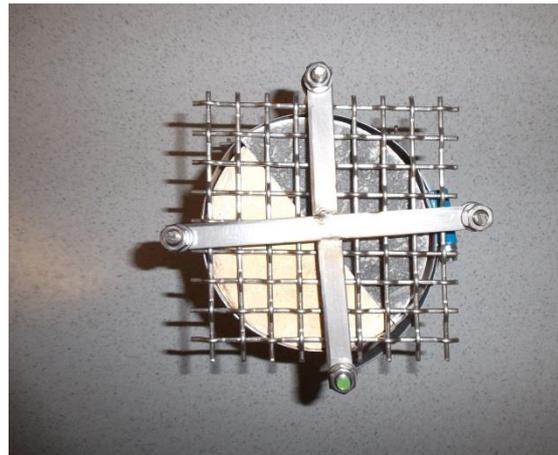


Abbildung 6-296: Gitter und Spannstreben

Kontaktversuche mit Verfüllbaustoff A

Für Konaktversuche mit Verfüllbaustoff A musste dieser frisch angemischt werden. Zur Verfüllung wurde zuerst der Edelstahlring mit Folie ausgekleidet und dann jeweils ein halber Gips-, bzw. Anhydritzylinder eingelegt siehe (Abbildung 6-297). Der freie Raum wurde anschließend mit dem Verfüllbaustoff A ausgegossen (3 Stück mit Gips, 3 Stück mit Anhydrit). In jeweils einem Gips- und Anhydrit-Zylinder wurden die miniaturisierten Bohrungen ebenfalls mit Verfüllbaustoff A vergossen (Abbildung 6-298). Nach einer Woche Abbindezeit wurden die Folien bei allen Proben entfernt und die Proben in Haltevorrichtungen geschraubt (Abbildung 6-295).



Abbildung 6-297: Gips- und Anhydritbohrkerne vor der Verfüllung mit Verfüllbaustoff A



Abbildung 6-298: Verfüllte Bohrkernbohrer, Hinterfüllbaustoff A

Konditionierung der Kontaktversuche

Alle 14 Proben wurden anschließend in ihrer Spannvorrichtung in je einen Plastikeimer mit 3 l Volumen gestellt (Abbildung 6-299). Diese wurden mit je 2 Liter Mineralwasser gefüllt, so dass alle Proben mit Wasser überdeckt waren (Abbildung 6-300), das Wasser wurde 2mal jährlich ausgetauscht. Die Eimer wurden mit Deckeln verschlossen. Die Lagerung der Kontaktversuche erfolgte nach der Wasserzugabe bei 10 °C im Kühlschrank und bei 20 °C im Klimaraum. Eine Liste aller Proben und der zugehörigen Lagerungstemperatur findet sich in Tabelle 6-64.

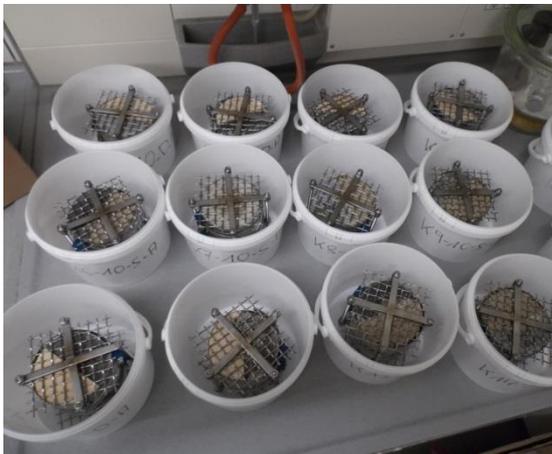


Abbildung 6-299: Proben für die Kontaktversuche, ohne Wasser



Abbildung 6-300: Finaler Versuchsaufbau, ohne Deckel

6.8.3.3. Untersuchungsergebnisse zu Reaktivität und Reaktionskinetik

Sulfat-Gehalte

Die Sulfatgehalte im Lagerungswasser der Kontaktversuche wurden in regelmäßigen Abständen mittels eines Schnelltests (Merck MQuant Test Sulfatos) analysiert. Sämtliche Messwerte, auch bereits nach einem Tag Versuchsdauer, liegen über dem Maximalwert des Testverfahrens mit > 1600 mg/l und damit im Bereich der Sulfatsättigung bzw. der Löslichkeit von Gips. Somit ist eine kontinuierliche Verfügbarkeit von gelöstem Sulfat über den Untersuchungszeitraum gewährleistet. Diese hohen Sulfatgehalte zeigen zudem, dass durch die Lösung von Sulfat aus den Gesteinen die Konzentration gegenüber der Ausgangskonzentration (Tabelle 6-62) im Wasser erhöht wurde. Da in allen Batchversuchen ein im Vergleich zu den Kontaktversuchen deutlich größeres Verhältnis von Feststoffoberfläche zu Flüssigkeitsvolumen vorlag ist bei den Batchversuchen ebenfalls davon auszugehen, dass stets Sulfatsättigung und damit eine andauernde Verfügbarkeit von gelöstem Sulfat für Mineralneubildungen gegeben war.

pH-Werte

Die während der Versuchsdauer mittels pH-Papier auf 0,5 pH-Stufen genau bestimmten pH-Werte der Suspension der Batchversuche sowie des Lagerungswassers der Kontaktversuche sind in Tabelle 6-65 zusammengestellt.

Batchversuche

Die Batchversuche weisen, wie zu erwarten, mehrheitlich basische pH-Werte auf, welche in erster Linie auf ihren Anteil an hydratisiertem Zement in den Verfüllbaustoffen und darin vor allem auf die Komponente Calciumhydroxid zurückzuführen ist. Insgesamt zeigten sich in den Suspensionen der Batch-Versuche allerdings weniger basische pH-Werte, als typischerweise bei frischen Zement-Suspensionen (mit etwa 12,5) gemessen werden, was wahrscheinlich auf den Verdünnungseffekt bei den Batchversuchen oder gegebenenfalls auch die durch das Alter der Proben nicht auszuschließende teilweise Karbonatisierung der Verfüllbaustoffe zurückgeführt werden kann.

Über die gesamte Versuchsdauer werden die höchsten Werte (bis 11,5) bei den vier Proben gemessen, welche nur Verfüllbaustoff und keine Gesteine enthalten (B1, B2, B7, B8), wobei es sich bei den niedrigen pH-Werte bei Probe B1 vermutlich um Fehlmessungen handelt.

Die Proben mit Gesteinen wiesen insgesamt etwas niedrigere pH-Werte auf als die vier Proben ohne Gesteine (B1, B2, B7, B8). Der Grund dafür dürfte sein, dass in diesen Proben neben Calciumhydroxid zusätzlich Gips und oder Anhydrit als weitere Calciumphasen im System vorliegen und es so zu einer Verschiebung des Lösungsgleichgewichts kommt.

Es lässt sich kein eindeutiger Hinweis darauf finden, dass die beiden Gesteine Gips und Anhydrit unterschiedlichen pH-Werten der jeweiligen Batchversuche zur Folge haben.

Dagegen zeigt sich jedoch ein Unterschied zwischen den Batchversuchen der unterschiedlichen Verfüllbaustoffe, Proben mit Verfüllbaustoff A weisen im Schnitt etwas niedrigere pH-Werte auf als vergleichbare Proben mit Verfüllbaustoff B (vgl. z.B. B3 bis B6 mit B9 bis B12). Wahrscheinlich sind Unterschiede in Art und Menge der in den Verfüllbaustoffen verwendeten Zemente dafür eine Erklärung.

Aus den gemessenen pH-Werten der Batchversuche lässt sich kein eindeutiger Trend (Abnahme, Zunahme) der pH-Wert-Entwicklung während der Versuchsdauer ableiten, die pH-Werte sind bei den meisten Proben über die Zeit mehr oder weniger konstant.

Kontaktversuche

Die Mehrzahl der Kontaktversuche weist während der gesamten Versuchsdauer pH-Werte im neutralen bis leicht basischen Bereich (ca. pH 6 bis 9) auf, und damit meist niedrigere Werte als die entsprechenden Batchversuche. Zu erklären ist dies durch den bei Kontaktversuchen infolge des größeren Flüssigkeitsvolumens bei geringerer Feststoffoberfläche viel kleineren Einfluss des zementhaltigen Verfüllbaustoffs auf den pH-Wert der untersuchten Lösungen, zudem bei den Kontaktversuchen ein regelmäßiger Austausch des Lagerungswassers erfolgte. Die vereinzelt gemessenen pH-Werte von 10 und 5 sind vermutlich als Fehlmessungen einzuschätzen.

Auffällige Ausnahme zu den mehrheitlich neutralen pH-Werten sind bei Halbzylinder-Versuchen mit Verfüllbaustoff A (K5, K6, K8, K9, K13, K14) zu beobachten, welche mit pH 12 und 12,5 nach 1,5 Monaten sehr basische pH-Werte aufweisen. Es ist davon auszugehen, dass der Grund hierfür die Verwendung von frisch angemischtem Verfüllbaustoff A bei der Herstellung der Kontaktversuche ist. Nach 1,5 Monaten dürfte der erst seit kurzer Zeit verfestigte Verfüllbaustoff A noch relativ viel un- bis frisch hydratisierten Zement enthalten haben was zur Folge hatte, dass Ausfallen und in Lösung gehen von Calciumhydroxid zu diesem Zeitpunkt den pH-Wert der Lösung dominierte. Im Gegensatz zu den Kontaktversuchen wurde bei den Batchversuchen mit Verfüllbaustoff A auf bereits seit längerem abgebundenes älteres Material zurückgegriffen, das nicht mehr das gleiche Potential zur pH-Werte-Absenkung der umgebenden Lösung aufwies (vgl. vorheriger Abschnitt).

Die Auswirkung des frischen Verfüllbaustoffs A ist lediglich bei der ersten pH-Messung nach 1,5 Monaten und vor dem ersten Austausch des Lagerungswassers zu beobachten, danach konnte Verfüllbaustoff A den pH-Wert des Lagerungswassers nicht mehr erneut absenken. Damit sind nach dem ersten Wasserwechsel sind keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen Versuchen mit Verfüllbaustoff A und Verfüllbaustoff B zu erkennen.

Die deutliche Absenkung des pH-Werts durch den frischen Verfüllbaustoffs A ist zudem nur bei Halbzylinder-Versuchen (K5, K6, K8, K9, K13, K14) zu beobachten, nicht bei den beiden Bohrloch-Versuchen (K7, K10). Als Grund ist die bei den Bohrlochversuchen deutlich kleinere mit der Lösung in Kontakt stehende Oberfläche des Verfüllbaustoffs A zu betrachten (Abbildung 6-298). Wie bei den Batchversuchen ist bei den Kontaktversuchen kein Unterschied zwischen Versuchen mit Gips oder Anhydrit zu beobachten.

Tabelle 6-65: pH Werte der Batch- und Kontaktversuche

Probe	Temperatur [°C]	Verfüllbau- stoff	Gestein	1,5 Monate [pH]	11 Monate [pH]	16 Monate [pH]	23 Monate [pH]	46 Monate [pH]
B1	10	B	-	11	6	6	11	10
B2	10	B	-	11	10	10	11	10
B3	10	B	Gips	9	10	10	10	8
B4	10	B	Gips	9	9	10	11	8
B5	10	B	Anhydrit	10	9	10	11	7,5
B6	10	B	Anhydrit	10	9	10	10	7,5
B7	10	A	-	11,5	9	10	11	9
B8	10	A	-	11,5	10	10	11	9
B9	10	A	Gips	8	10	7	7	7
B10	10	A	Gips	9	9	8,5	7	7
B11	10	A	Anhydrit	8	9	9	8	8
B12	10	A	Anhydrit	8	9	7	8	8
B13	20	B	Gips	11	9	10	10	10
B14	20	B	Anhydrit	10	9	10	11	10
B15	20	A	Gips	9	8	9	10	10
B16	20	A	Anhydrit	9	9	8	8	10,5
K1	10	B	Anhydrit	6	6	8	7	7,5
K2	10	B	Anhydrit	6	5	8	7	7,5
K3	10	B	Gips	6	6	8	7	7
K4	10	B	Gips	6	6	8	7	7
K5	10	A	Anhydrit	12,5	9	8	7	7
K6	10	A	Anhydrit	12,5	7	8	5	8,5
K7	10	A	Anhydrit	6	6	7,5	10	7
K8	10	A	Gips	12	7	7	10	9
K9	10	A	Gips	12	6	8	8	9
K10	10	A	Gips	8	6	8	8	7
K11	20	B	Anhydrit	6	7	8	5	7
K12	20	B	Gips	6	6	8	6	6
K13	20	A	Anhydrit	12,5	6	8	7	6,5
K14	20	A	Gips	12,5	7	7	7	7

pH-Skala:

5	6,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5
---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	----	------	----	------	----	------

Bildung von Ettringit und Thaumasit

Probennahme

Für die Untersuchung mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) auf mögliche Mineralneubildungen mussten zu jedem Prüfzeitpunkt zunächst lufttrockene pulverförmige Proben hergestellt werden.

Batchversuche

Bei Batchversuchen wurden dazu nach einer kurzen Unterbrechung der Rotation des Überkopfschüttlers mittels Spatel kleine Mengen des sedimentierten Materials aus den Flaschen entnommen und luftgetrocknet und anschließend zu Pulver zermörsert.

Kontaktversuche: Probennahme nach 1,5 Monaten

Bei den Kontaktversuchen wurde bei der ersten Probennahme nach 1,5 Monaten anders vorgegangen wie bei allen darauffolgenden Probennahmen, deshalb ist ein Vergleich der Ergebnisse der ersten Probennahme mit denen von späteren Probennahmen nicht sinnvoll. Die Ergebnisse werden infolgedessen im Folgenden getrennt besprochen.

Bei der ersten Probennahme nach 1,5 Monaten hatte sich in allen Proben ein mehr oder weniger deutlicher, weißlicher Niederschlag im Versuchswasser und an den Manschetten der Probekörper abgelagert.



Abbildung 6-301: Ablagerungen an den Manschetten der Probekörper K13 (links) und K6 (rechts)

Abbildung 6-301 zeigt beispielhaft zwei der Proben mit den größten Mengen an Präzipitaten. Die bevorzugte Ablagerung auf den Stahl-Manschetten ist möglicherweise auf das elektrochemische Potential der unedleren Manschette im Vergleich zum Edelstahl der restlichen Materialien zurückzuführen. Die weißen Ablagerungen waren insbesondere in den Versuchen der Kombination Anhydrit und Hinterfüllbaustoff A (K5, K6 und K13) sehr deutlich und in relativ großen Mengen vorhanden. Das weiße Präzipitat wurde bei allen Prüfkörpern bei denen eine ausreichende Menge vorhanden war, mit einem Spatel abgekratzt, luftgetrocknet und anschließend zermörsert. Nach der ersten Probennahme wurden die Stahlschellen durch Kabelbinder aus Kunststoff ersetzt, auf denen im Folgenden keine Neubildungen von Präzipitaten mehr zu beobachten war.

Kontaktversuche: Probennahmen ab 11 Monaten

Bei allen Probennahmen ab 11 Monaten wurde im Gegensatz zur ersten Probennahmen versucht Material von der Kontaktfläche bzw. aus dem direkten Kontaktbereich von Sulfatgestein und Verfüllbaustoff zu entnehmen. Wo möglich sollten so neben dem Ausgangsmaterial (Sulfatgesteins und Verfüllbaustoff) verstärkt Mineralneubildungen mit entnommen werden, deren Entstehung vor allem im Konaktbereich erwartet wurde. Auch bei diesen Probennahmen wurde Material mit einem Spatel abgekratzt, luftgetrocknet und anschließend zermörsert.

Messung und Auswertung

Die XRD- Untersuchung der luftgetrockneten Pulverproben wurde mit einem Röntgendiffraktometer Bruker D8 durchgeführt, die Auswertung erfolgte mit dem Softwaretool EVA (ebenfalls von Bruker). Die Auswertung der bei der Messung erstellten Diffraktogramme liefert die Identifikation der mittels der Methode nachweisbaren kristallinen Phasen in der Probe, röntgenamorphe oder amorphe Phasen werden nicht direkt detektiert. Bei der hier durchgeführten Art der qualitativen XRD liefert die Methode keine quantitativen Gehalte der Mineralphasen, die Höhenverhältnisse von detektierten Röntgenreflexen erlaubt jedoch eine ungefähre Abschätzung von Tendenzen und Entwicklungen, die bei der Interpretation der Ergebnisse nützlich ist. In Tabelle 6-66 und in Tabelle 6-67 werden deshalb bei der Beschreibung der detektierten Mineralmengen die folgenden Begriffe verwendet:

- nicht mit XRD nachweisbar,
- möglicherweise in geringen Mengen nachweisbar,
- nachweisbar,
- deutlich nachweisbar,
- In größeren Mengen vorhanden.

Während der Projektlaufzeit wechselten die durchführenden Personen der XRD-Untersuchungen infolge von Personalwechseln mehrfach, zudem wurden verbesserte Messroutinen am Röntgendiffraktometer eingeführt. Aus diesen Gründen sind die Diffraktogramme von verschiedenen Prüfzeitpunkten nur bedingt direkt miteinander zu vergleichen. Deshalb wurden zur Beurteilung von detektierten Mineralmengen stets Höhenverhältnisse von Röntgenreflexen (z.B. von den Sulfatphasen Ettringit und Thaumasil zu den stets vorhandenen Phasen Quarz und Calcit) und nie absolute Reflexhöhen verwendet.

Tabelle 6-66: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) auf Ettringit

Probe	Temperatur [°C]	Verfüllbau- stoff	Gestein	1,5	11	16	23	46
				Monate	Monate	Monate	Monate	Monate
				XRD	XRD	XRD	XRD	XRD
				Ettringit	Ettringit	Ettringit	Ettringit	Ettringit
B1	10	B	-	E -	E +	E +	E +	E +
B2	10	B	-	E -	E +	E ++	E +	E +
B3	10	B	Gips	E ++	E -	E -	E +	E ++
B4	10	B	Gips	E ++	E -	E +	E +	E +++
B5	10	B	Anhydrit	E ++	E +	E +	E +	E ++
B6	10	B	Anhydrit	E -	E +	E +	E +	E ++
B7	10	A	-	E -	E o	E +	E o	E +
B8	10	A	-	E -	E o	E +	E o	E +
B9	10	A	Gips	E -	E -	E +	E -	E ++
B10	10	A	Gips	E -	E -	E +	E o	E ++
B11	10	A	Anhydrit	E ++	E +	E +	E o	E ++
B12	10	A	Anhydrit	E ++	E +	E ++	E o	E ++
B13	20	B	Gips	E ++	E +	E +	E +	E ++
B14	20	B	Anhydrit	E ++	E +	E +	E +	E ++
B15	20	A	Gips	E ++	E ++	E +	E +	E ++
B16	20	A	Anhydrit	E ++	E +	E ++	E +	E ++
K1	10	B	Anhydrit		E -	E -	E ++	E +
K2	10	B	Anhydrit		E -	E -	E -	E -
K3	10	B	Gips		E -	E -	E -	E -
K4	10	B	Gips	E -	E -	E -	E ++	E ++
K5	10	A	Anhydrit	E +++	E -	E +	E +	E +
K6	10	A	Anhydrit	E +++	E +	E +	E +	E ++
K7	10	A	Anhydrit	E -	E ++	E +++	E +++	E ++
K8	10	A	Gips	E +++	E -	E ++	E +++	E ++
K9	10	A	Gips	E +++	E -	E +++	E ++	E ++
K10	10	A	Gips	E -	E -	E +	E ++	E o
K11	20	B	Anhydrit	E -	E -	E -	E -	E -
K12	20	B	Gips	E -	E -	E -	E -	E +
K13	20	A	Anhydrit	E +++	E -	E -	E o	E +
K14	20	A	Gips	E +++	E -	E -	E -	E +

nicht mit XRD nachweisbar	möglicherweise in geringen Mengen nachweisbar	nachweisbar	deutlich nachweisbar	In größeren Mengen vorhanden
-	o	+	++	+++

Tabelle 6-67: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) auf Thaumazit

Probe	Temperatur [°C]	Verfüllbaustoff	Gestein	1,5 Monate	11 Monate	16 Monate	23 Monate	46 Monate
				XRD Thaumazit	XRD Thaumazit	XRD Thaumazit	XRD Thaumazit	XRD Thaumazit
B1	10	B	-	T -	T -	T -	T -	T -
B2	10	B	-	T -	T -	T -	T -	T -
B3	10	B	Gips	T -	T +++	T +++	T +++	T +++
B4	10	B	Gips	T -	T +++	T +++	T +++	T +++
B5	10	B	Anhydrit	T -	T +++	T ++	T +++	T +++
B6	10	B	Anhydrit	T -	T ++	T +++	T +++	T ++
B7	10	A	-	T -	T -	T -	T -	T -
B8	10	A	-	T -	T -	T -	T -	T -
B9	10	A	Gips	T -	T -	T +	T o	T +
B10	10	A	Gips	T -	T -	T -	T -	T o
B11	10	A	Anhydrit	T -	T -	T -	T o	T +
B12	10	A	Anhydrit	T -	T -	T -	T o	T +
B13	20	B	Gips	T -	T +	T ++	T +++	T +++
B14	20	B	Anhydrit	T -	T +	T ++	T +++	T +++
B15	20	A	Gips	T -	T -	T -	T -	T +
B16	20	A	Anhydrit	T -	T -	T +	T +	T +
K1	10	B	Anhydrit		T -	T -	T +++	T +++
K2	10	B	Anhydrit		T -	T -	T -	T -
K3	10	B	Gips		T -	T -	T -	T -
K4	10	B	Gips	T -	T -	T -	T +++	T +++
K5	10	A	Anhydrit	T -	T -	T +	T +	T ++
K6	10	A	Anhydrit	T -	T ++	T ++	T +	T +++
K7	10	A	Anhydrit	T -	T -	T +++	T +++	T +++
K8	10	A	Gips	T -	T -	T ++	T +++	T +++
K9	10	A	Gips	T -	T -	T +++	T +++	T +++
K10	10	A	Gips	T -	T -	T ++	T +++	T +++
K11	20	B	Anhydrit	T -	T -	T -	T -	T -
K12	20	B	Gips	T -	T -	T -	T -	T +
K13	20	A	Anhydrit	T -	T -	T -	T -	T +
K14	20	A	Gips	T -	T -	T -	T -	T +

nicht mit XRD nachweisbar	möglicherweise in geringen Mengen nachweisbar	nachweisbar	deutlich nachweisbar	In größeren Mengen vorhanden
-	o	+	++	+++

Untersuchungsergebnisse

In den Tabelle 6-66 und Tabelle 6-67 sind die Ergebnisse der XRD-Untersuchungen auf Ettringit und Thaumazit zusammengefasst und zur besseren Leslichkeit farbcodiert dargestellt.

Neben den im Fokus der Untersuchungen stehenden Minerale Ettringit und Thaumazit wurden mittels XRD bei Batchproben und Kontaktversuchen weitere Bestandteile identifiziert, die hier kurz zusammengefasst, im Folgenden jedoch nicht weiter diskutiert werden. Als Hauptbestandteile wurden vor allem die kristallinen Phasen der beteiligten Ausgangsmaterialien Verfüllbaustoff und Sulfatgestein bestimmt, in erster Linie sind dies Quarz und Calcit sowie Gips und Anhydrit. Zu

geringen Anteilen wurden zudem teils Feldspäte oder Glimmer sowie weitere Calciumcarbonate (Vaterit oder Arabonit) identifiziert. Sämtliche Proben mit Sulfatgesteins-Mehl enthalten sowohl Gips als auch Anhydrit; es ist davon auszugehen, dass das gemeinsame Auftreten beider Minerale hauptsächlich auf deren natürliches Vorhandensein im Gestein zurückzuführen ist und eine sekundäre Bildung von Gips demgegenüber eher untergeordnet ist.

Das nachgewiesene Calciumcarbonat hat im Zusammenhang mit den vorliegenden Untersuchungen eine besondere Bedeutung, da es neben CO_2 aus der Atmosphäre und Hydrogencarbonat aus dem Wasser als Quelle für das bei der Thaumasitbildung benötigte Carbonat-Ion dienen kann (Köhler 2009). Da praktisch in allen Proben Calciumcarbonat nachweisbar war, ist davon auszugehen, dass diese Grundvoraussetzung für die Thaumasitenstehung bei allen Proben von Beginn der Versuche an bestand.

Batchversuche

Bei den Batchversuchen waren teilweise bereits nach 1,5 Monaten deutliche Mengen von Ettringit identifizierbar. Thaumasit war dagegen frühestens nach 11 Monaten nachweisbar und zudem überwiegend in Proben, in denen bereits zuvor Ettringit gefunden worden war. Bei einigen Proben nehmen die identifizierten Mengen an Ettringit mit der Zeit eher zu, bei vielen Proben sind jedoch ab der Probennahme bei 11 Monaten mehr oder weniger konstante Mengen an Ettringit zu beobachten. Die Anzahl an thaumasithaltigen Proben sowie die Mengen an identifiziertem Thaumasit steigen von Probenzeitpunkt zu Probenzeitpunkt, also mit steigender Versuchsdauer eher an. Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit Beobachtungen anderer Autoren, z.B. zeigte Köhler 2009, dass Thaumasit sich erst nach längeren Zeiträumen ggf. über die Zwischenphase des Ettringits bildet.

Bei den Proben B1, B2, B7 und B8, denen lediglich Verfüllbaustoff, jedoch kein Sulfatgestein zugegeben wurde, ist ab dem Probenzeitpunkt 11 Monate Ettringit nachweisbar. Thaumasit ist bei diesen Proben zu keinem Zeitpunkt zu finden. Die Mengen an Ettringit liegen zwar eher unter denen von Proben mit Sulfatgestein, das Ergebnis zeigt jedoch, dass für eine mäßige Ettringitbildung das in Verfüllbaustoff und Mineralwasser vorhandene Sulfat für eine Neubildung von Ettringit ausreicht, jedoch offenbar nicht für eine nachweisbare Entstehung von Thaumasit.

Die in den Versuchen vorhandene Art des Sulfatgesteins (Gips oder Anhydrit) spielt nach den vorliegenden Ergebnissen keine wesentliche Rolle für die Entstehung von Ettringit und Thaumasit, es sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen, eher das prinzipielle Vorhandensein von Sulfat-Ionen scheint für die entstehende Menge der beiden Minerale von Bedeutung zu sein.

Betrachtet man die beiden Verfüllbaustoffe, sei erneut daran erinnert, dass im Falle der Batchversuche das verwendete Material beider Verfüllbaustoffe als alte, bereits seit längerer Zeit erhärtete Reststücke aus überbohrten EWS vorlag. Wie weiter oben beschreiben, wiesen die Batchproben mit Verfüllbaustoff B im Schnitt etwas höhere pH-Werte auf, als Batchversuche mit Verfüllbaustoff A, dies könnte z.B. auf einen etwas höheren Zementgehalt bei Verfüllbaustoff B hinweisen, jedoch kann dies im Nachhinein nicht mehr einwandfrei ermittelt werden. Der Vergleich der Batchversuche der beiden Verfüllbaustoffe könnte jedoch in eine ähnliche Richtung deuten: Ettringit ist bei Proben mit Verfüllbaustoff im Schnitt in etwas größeren Mengen und etwas früher nachweisbar als bei Verfüllbaustoff A. Bei Thaumasit ist die Situation noch sehr viel deutlicher, In Batchversuchen mit Verfüllbaustoff B entsteht viel mehr Thaumasit in den Proben als mit Verfüllbaustoff

A, bei welchen Thaumasit außerdem stets später auftritt als bei vergleichbaren Proben mit Verfüllbaustoff B.

Zuletzt soll betrachtet werden, ob ein signifikanter Einfluss der Versuchstemperatur auf die Mineralneubildungen bei Batchversuchen zu beobachten war. Hierbei scheint Ettringit bei 20 °C etwas früher zu entstehen (bei allen Proben bereits nach 1,5 Monaten nachweisbar) als bei 10 °C. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit Literaturdaten von Ogawa & Roy 1981, die beobachteten, dass die Ettringitbildung durch Temperaturerhöhung (bis 60 °C) beschleunigt wird. Im Gegensatz dazu scheint in den vorliegenden Batchversuchen die Entstehung von Thaumasit bei der niedrigeren Temperatur von 10 °C im Schnitt etwas ausgeprägter zu sein. Dies bestätigt die bekannte Annahme, dass die Thaumasitbildung bei niedrigen Temperaturen beschleunigt stattfindet (z.B. Köhler 2009, Pipilikaki et al. 2008). Eine wichtige Rolle bei diesem Verhalten könnte z.B. die erhöhte Löslichkeit von CO₂ bei niedrigeren Temperaturen spielen.

Kontaktversuche: Probennahme nach 1,5 Monaten

Bei der ersten Probennahme nach 1, 5 Monaten wurden bei Kontaktversuchen lediglich die weißlichen Niederschläge im Versuchswasser und an den Manschetten der Probenkörper untersucht. Solche Niederschläge bildeten sich in ausreichender Menge bei allen Proben außer K1, K2 und K3. Es zeigte sich, dass keiner der untersuchten Niederschläge Thaumasit enthielt. Bei sechs Proben bestanden die weißlichen Niederschläge jedoch überwiegend aus Ettringit (K5, K6, K8, K9, K13, K14), bei allen anderen Niederschlägen konnte lediglich Gips identifiziert werden. Die sechs Proben, die Ettringit enthielten, wurden alle mit Verfüllbaustoff A und Gips oder Anhydrit als Halbzylinder-Versuche hergestellt. Höchstwahrscheinlich ermöglicht der bei diesen Proben gemessene hohe pH-Wert (Tabelle 6-65) die Bildung von Ettringit außerhalb des Porenraums auf den Manschetten der Probenkörper. Wie weiter oben beschreiben wird der hohe pH-Wert bei diesen Proben auf das erst kurze Zeit zuvor abgebundene zementäre Bindemittel in Verfüllbaustoff A zurückgeführt. In der Literatur wird vielfach beschrieben, dass Ettringit nur im deutlich alkalischen pH-Bereich größer etwa 10,5 stabil ist (z. B. Cody et al. 2004, Damidot & Glasser 1993). Dies erklärt, dass bei der Probennahme nach 1,5 Monaten Ettringit-Niederschläge lediglich in den Kontaktversuchen nachzuweisen waren, deren Lagerungsflüssigkeit pH-Werte in diesem Bereich aufwiesen.

Kontaktversuche: Probennahmen ab 11 Monaten

Bei der Mehrzahl der Kontaktversuche waren sowohl Ettringit als auch Thaumasit an den Kontaktflächen von Sulfatgestein und Verfüllbaustoff erst nach Versuchsdauern über einem Jahr nachweisbar. Dabei waren Ettringit und Thaumasit fast immer ab dem gleichen Zeitpunkt im Probenmaterial zu identifizieren. Lediglich bei den Proben K7 und K13 wurde Ettringit jeweils bereits einen Probennahmezeitpunkt vor Thaumasit gefunden. Für Proben, die Thaumasit und Ettringit enthielten, nahmen über die fast vierjährige Versuchsdauer die nachgewiesenen Mengen dieser Minerale mit wenigen Ausnahmen stets zu.

Wie auch bei den Batchversuchen ist kein signifikanter Unterschied bei den Mineralneubildungen zwischen Proben mit Anhydrit und Gips als Sulfatgestein festzustellen.

Etwas anders als bei den Batchversuchen stellt sich dagegen die Situation der Mineralneubildungen bei den Kontaktversuchen in Bezug auf die Versuchstemperatur dar: Viel deutlicher als bei

den Batchversuchen ist zu erkennen, dass die Thaumasitbildung bei niedrigen Temperaturen beschleunigt wird, bei vielen Kontaktversuchen bei 10 °C ist bereits nach 16 Monaten Thaumasit zu finden, bei den Kontaktversuchen bei 20 °C frühestens nach 46 Monaten. Anders als bei den Batchversuchen ist jedoch auch die Ettringitbildung bei den Kontaktversuchen bei 20 °C im Vergleich zu Versuchen bei 10 °C erst sehr spät im Versuchsverlauf nachzuweisen, was derzeit nicht schlüssig erklärt werden kann.

Ein weiter deutlicher Unterschied zwischen Batch- und Kontaktversuchen ist bei der Betrachtung der Verfüllbaustoffe zu erkennen. Während bei den Batchversuchen mit Verfüllbaustoff B hergestellte Proben höhere Bildungsgeschwindigkeiten und -Mengen an Ettringit und Thaumasit hervorbrachten, sind bei den Kontaktversuchen mit Verfüllbaustoff A deutlich höhere Bildungsgeschwindigkeiten und -Mengen an Ettringit und Thaumasit zu beobachten. Wie weiter oben beschreiben, ist der Grund dafür wahrscheinlich in der Tatsache zu sehen, dass für die Kontaktversuche frisch angemischter Verfüllbaustoff A verwendet werden musste, der vermutlich zu Versuchsbeginn noch nicht vollständig hydratisiert und damit deutlich reaktiver war. Verfüllbaustoff B lag dagegen in derselben Form vor wie für die Batchversuche. Aus dem beschriebenen Grund ist leider ein abschließender Vergleich der beiden Verfüllbaustoffe bei der vorliegenden Datenlage wenig sinnvoll.

Betrachtet man abschließend die Halbzylinderversuche mit den beiden Bohrlochversuchen fällt auf, dass bei den beiden Versuchskonfigurationen bei gleichen Verfüllbaustoff/Sulfatgesteinkombinationen die Bildung von Ettringit und Thaumasit zu ähnlichen Zeitpunkten und in ähnlicher Höhe erfolgte.

Quellerscheinungen und Störung des Gefüges

Nach der letzten Probennahme 46 Monate nach Versuchsbeginn wurden die Kontaktversuche nochmals genau in Augenschein genommen, um deutliche Quellerscheinungen optisch feststellen zu können. Um Erweichungs- bzw. Zerfallserscheinungen feststellen zu können, wurde zudem bei jeder Probe die Oberfläche des Verfüllbaustoffs mit einem Stahlstift abgeklopft und angekratzt. Falls erkennbar, könnten solche Erweichungs- bzw. Zerfallserscheinungen auf eine tiefgehenden Schädigung der Zementsteinstruktur und eine Gelbbildung infolge Ettringit- und vor allem Thaumasitbildung hinweisen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst und werden zudem in Kontext mit den Ergebnissen der XRD-Untersuchungen auf Thaumasit gesetzt. Grob lassen sich die Proben in drei Gruppen unterteilen:

Gruppe 1 (Abbildung 6-302):

- Zu dieser Gruppe gehören die Proben K1 bis K4 und K11 bis K14
- Merkmale der Proben dieser Gruppe:
 - Ausschließlich Halbzylinderproben
 - Sowohl Proben mit Gips als auch Anhydrit
 - Bei Versuchstemperatur 10 °C lediglich Proben mit Verfüllbaustoff B
 - Bei Versuchstemperatur 20 °C Proben beider Verfüllbaustoffe
- Beschreibung des Zustands des Verfüllbaustoffs nach 46 Monaten:
 - Die Oberfläche des Verfüllbaustoffs erscheint noch weitgehend glatt.

- Klopfen auf der Oberfläche hört sich teilweise noch hell und scharf an, teilweise jedoch dumpf.
- An hell klingenden Stellen ist die Oberfläche noch weitgehend hart, in dumpf klingenden Bereichen ist sie dagegen bereits etwas erweicht und lässt sich leicht mit dem Stahlstift ankratzen.
- Kein deutliches Quellen zu beobachten.
- Mineralneubildungen:
 - Teils war bei diesen Proben kein Thaumasit nachweisbar
 - Teils war bei diesen Proben zwar Thaumasit in bis zu größeren Mengen nachweisbar, dann jedoch erst relativ spät im Verlauf der Versuche (frühestens nach Zeitpunkt 23 Monaten).
 - Ettringitbildung ca. analog zur Thaumasitbildung



Abbildung 6-302: Probe K4 nach einer Versuchsdauer von 46 Monaten

Gruppe 2 (Abbildung 6-303):

- Zu dieser Gruppe gehören die Proben K5, K6, K8 und K9
- Merkmale der Proben dieser Gruppe:
 - Ausschließlich Halbzylinderproben
 - Sowohl Proben mit Gips als auch Anhydrit
 - Ausschließlich Proben mit Verfüllbaustoff A
 - Ausschließlich bei Versuchstemperatur 10 °C
- Beschreibung des Zustands des Verfüllbaustoffs nach 46 Monaten:
 - Die Oberfläche nur noch teilweise glatt, in Bereichen schuppig zerfallend.

- In der Mitte der Verfüllbaustoff-Fläche hört sich das Klopfen auf der Oberfläche noch hell und scharf an, die Oberfläche ist hier noch weitgehend hart
- Bereiche welche an die Stahlschalung angrenzen oder nahe an der Kontaktfläche zum Gesteins-Halbzylinder liegen sind deutlich geschädigt. Sie hören sich beim darauf klopfen dumpf an, sie zerfallen schuppig oder besitzen bereits eine sehr weiche bis breiige Konsistenz.
- Kein deutliches Quellen zu beobachten.
- Mineralneubildungen:
 - Bei allen Proben Thaumasit in deutlichen bis größeren Mengen nachweisbar
 - Bei allen Proben Thaumasit relativ früh im Verlauf der Versuche (mindestens seit Zeitpunkt 16 Monate) nachweisbar.
 - Ettringitbildung ca. analog zur Thaumasitbildung



Abbildung 6-303: Probe K8 nach einer Versuchsdauer von 46 Monaten

Gruppe 3 (Abbildung 6-304):

- Zu dieser Gruppe gehören die Proben K7 und K10
- Merkmale der Proben dieser Gruppe:
 - Ausschließlich Bohrlochproben
 - Sowohl Proben mit Gips als auch Anhydrit
 - Ausschließlich Proben mit Verfüllbaustoff A
 - Ausschließlich bei Versuchstemperatur 10 °C
- Beschreibung des Zustands des Verfüllbaustoffs nach 46 Monaten:
 - Die gesamte Oberfläche ist nicht mehr glatt, sondern schuppig zerfallend und besitzt eine sehr weiche bis breiige Konsistenz.

- Deutliches Quellen des Verfüllbaustoff-Kerns der Proben zu erkennen. Der Kern ist relativ zur Oberfläche des Gesteins bereits um einige mm gequollen, so dass sich der Verfüllbaustoff in die Maschen des Stahlgitters hineingequetscht hat.
- Mineralneubildungen:
 - Bei beiden Proben Thaumasit in größeren Mengen nachweisbar
 - Bei beiden Proben Thaumasit seit Zeitpunkt 16 Monate nachweisbar.
 - Ettringitbildung ca. analog zur Thaumasitbildung

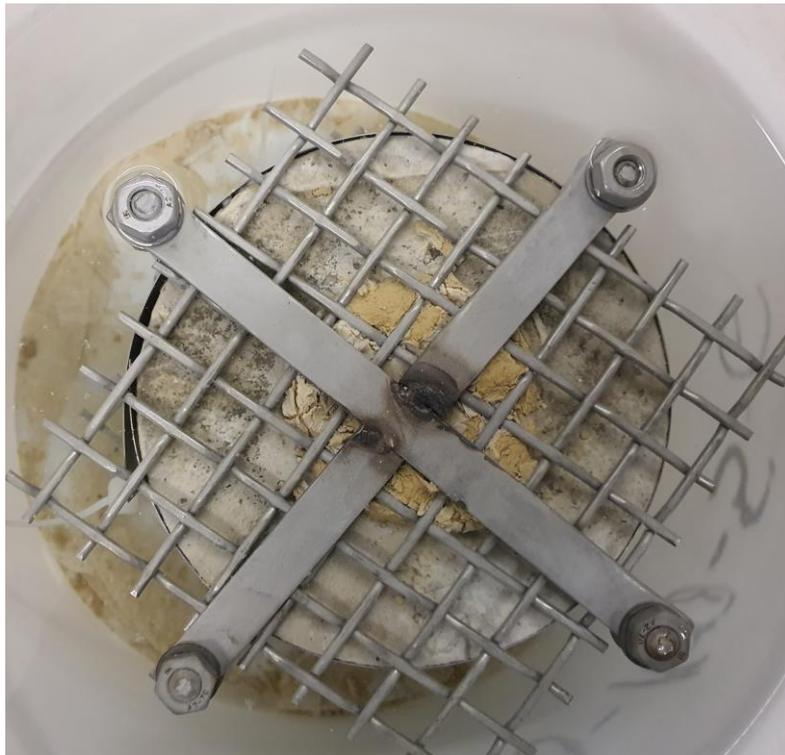


Abbildung 6-304: Probe K10 nach einer Versuchsdauer von 46 Monaten

Die Untersuchungen bestätigen damit deutlich den in der Literatur beschriebenen (vgl. z.B. Hobbs & Taylor 2000) Zusammenhang zwischen Schädigungen der Zementsteinstruktur mit einer verstärkten Thaumasilbildung.

6.8.3.4. Fazit zu Reaktivität und Reaktionskinetik

- In den entwickelten Modellversuchen kann die Ettringit- und Thaumasilbildung bei der Wechselwirkung von Verfüllbaustoff, Sulfatgesteinen und Grundwasser zielgerichtet nachgebildet werden.
- Die Verwendung von Batch und Kontaktversuchen erwies sich als durchaus sinnvoll.
- Die Versuche sollten jedoch als Langzeitversuche angelegt werden, da sich erst nach mehreren Jahren deutliche Mengen an Thaumasil bilden und Schädigungen beobachtet werden können.
- Die Versuchstemperatur spielt eine große Rolle, die bereits häufig beschriebene Thaumasilbildung bei niedrigen Temperaturen konnte bestätigt werden.
- Ob Gips- oder Anhydritdominiertes Umgebungsgestein vorliegt, hat auf die Neubildung von Thaumasil und Ettringit keinen nachweisbaren Einfluss.
- Die Rolle des verwendeten Verfüllbaustoffs konnte nur bedingt beurteilt werden, da die verwendeten Verfüllbaustoffe nicht in der gleichen und so vergleichbaren Form vorlagen. Diese Thematik sollte daher bei nachfolgenden Forschungsarbeiten nochmals aufgenommen werden.
- Eine starke Zersetzung der Zementsteinstruktur und Quellerscheinungen konnten bei einigen Proben festgestellt werden. In weiteren Forschungsarbeiten sollten zum einen die Reaktionsprodukte, zum anderen die zeitliche Entwicklung des Zerstörungsprozesses genauer untersucht werden.

6.8.4. Entwicklung und Bau einer Simulationszelle zur experimentellen Bestimmung der Quelldrücke

Im Rahmen des Projekts sollte eine Druckmesszelle entwickelt werden, mit welcher die Quell-/Schwelldrücke eines anhydrithaltigen Gesteins und eines EWS-Verfüllbaustoffs separat bestimmt werden können, bei gleichzeitiger Beobachtung von Durchflussänderungen im System. Ziel war eine Überprüfung der Machbarkeit und der Funktionalität dieser Messapparatur vor dem Hintergrund der Beurteilung von bestehenden EWS-Anlagen in kritischen geologischen Gebieten (Anhydrit/artesischer Aquifer). Die messtechnische Erfassung der Quell-/Schwelldrücke sowie der Durchflussänderungen sollte eine Beurteilung der Quell-/Schwellvorgänge als potentielle Schadensursache ermöglichen. Aufgrund der komplexen technischen Umsetzung der Fragestellung sollte diese in drei Arbeitsschritten erfolgen:

- Erfassung der Quell-/Schwelldrücke von Anhydrit und Verfüllbaustoff als Einzelmaterien sowie Erfassung des Quell-/Schwelldrucks der kombinierten Materialien. Diese Ver-

suche sollten in bestehenden Messzellen am KIT (Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, IFB) durchgeführt werden. Ergänzt wurde dieser Punkt durch eine Basis-Literatursichtung zum Quellverhalten der Materialien.

- Entwicklung von Herstellungsverfahren für kombinierte Probekörper aus den Komponenten Anhydrit und Verfüllbaustoff für den Einsatz in der Druckmesszelle. In den Probekörpern sollten Anhydrit und Verfüllbaustoff räumlich getrennt, aber im Kontakt, vorliegen, damit ein unabhängiges Quellen/Schwellen beider Komponenten unter realen (Kontakt-)Bedingungen in vertikaler Richtung möglich war.
- Planung und Konstruktion der Druckmesszelle. Mit der Druckmesszelle sollte die Erfassung von Durchflussänderungen im kombinierten Anhydrit-Verfüllbaustoff-System bei gegebener Vorspannung möglich sein.

In der Literatur wird teilweise zwischen den Begriffen Quellen und Schwellen unterschieden, wobei Quellen für Tone (physikalische Wasseraufnahme bei Tonen) und Schwellen für Anhydrit (chemische Umwandlung von Anhydrit zu Gips) verwendet wird (Kolymbas 1998). Da bei den folgenden technischen Betrachtungen lediglich das Phänomen „Volumenzunahme bzw. Druckanstieg infolge Wasseranlagerung“ im Vordergrund steht und weniger die dahinterstehenden chemischen und physikalischen Mechanismen, wird im Folgenden nicht zwischen Schwellen und Quellen unterschieden, sondern alle entsprechenden Phänomene vereinfachend als Quellen bezeichnet.

6.8.4.1. Literatursichtung und Vorversuche zur Erfassung der Quelldrücke der verwendeten Materialien

Neben einer ersten Sichtung von Literaturdaten zum Quellverhalten der in den Versuchen einzusetzenden Materialien wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Ziel dabei war es, potentiell entstehenden Quelldrücke der verwendeten Materialien abzuschätzen zu können, auf deren Basis die Dimensionierung der zu entwickelnden Druckmesszelle gestützt werden sollte.

Versuchsdurchführung

Dazu wurden Pulverpresslinge aus aufgemahlenem Anhydritgestein, aus aufgemahlenem abgebundenem Verfüllbaustoff (Referenzverfüllbaustoff M2) sowie aus einer Mischung beider Materialien am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF) des KIT hergestellt. Das für die Pulverpresslinge verwendete Ausgangsmaterial (Anhydritgestein und Referenzverfüllbaustoff M2) wurde jeweils auf Korngrößendurchmesser kleiner 125µm aufgemahlen, in dafür vorgesehene Stahlringe in einer Verpressvorrichtung eingefüllt (Abbildung 6-305) und für eine Dauer von 30 min mit 200 kN verpresst. Die so erhaltenen Pulverpresslinge wiesen Rohdichten von 1,6 g/cm³ (M2), 1,75 g/cm³ (M2 + Anhydrit) und 1,8 g/cm³ (Anhydrit) auf und sind damit etwas weniger dicht als die Ausgangsmaterialien.



Abbildung 6-305: Verspressvorrichtung des IBF für die Herstellung von Pulverpresslingen

Anschließend wurden die Pulverpresslinge in Ödometer-Versuchsständen am IBF eingebaut und mittels Quellversuchen untersucht. Abbildung 6-306 zeigt einen Ödometer-Versuchsstand am IBF, Details über Versuchsaufbau und die Durchführung der Versuche am IBF können den folgenden Arbeiten entnommen werden: Mutschler & Fröhlich 2011, Pimentel & Anagnostou 2013, Vergara et al. 2014.



Abbildung 6-306: Beispiel eines Ödometer-Versuchsstandes am IBF

Versuchsergebnisse

In den Abbildung 6-307 bis Abbildung 6-309 sind drei Quelldruckkurven dargestellt, die mittels der Ödometerversuche an Pulverpresslingen (Proben: M2, Anhydrit, M2 + Anhydrit) ermittelt wurden.

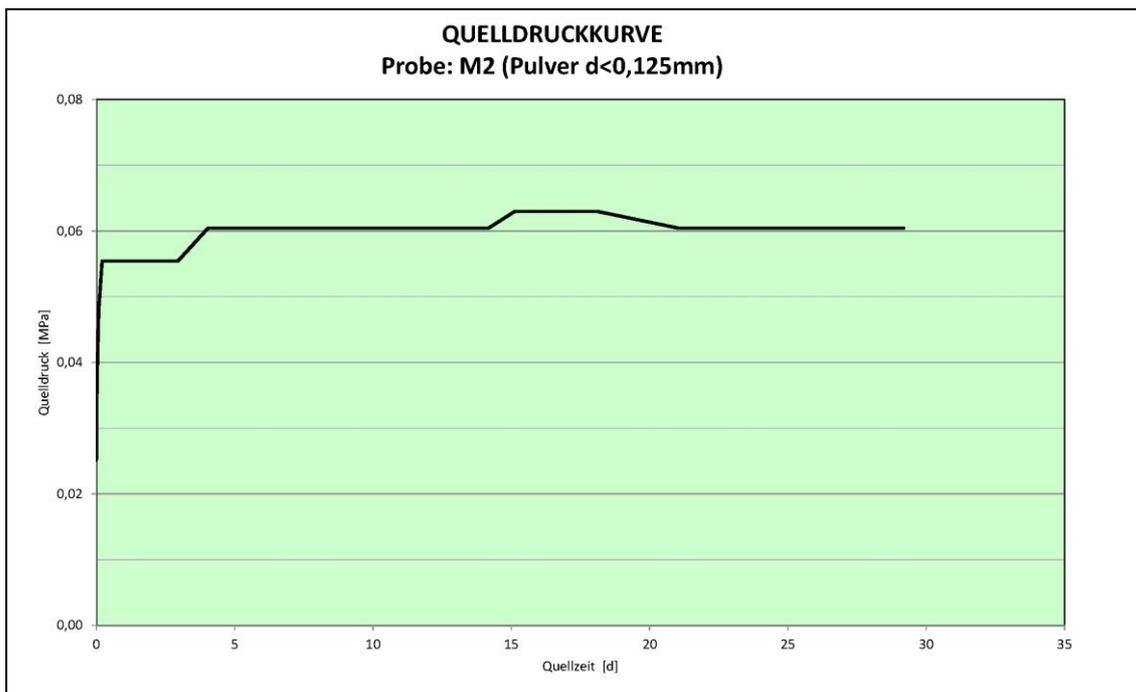


Abbildung 6-307: Quelldruckkurve eines Pulverpresslings aus aufgemahlenem Referenzverfüllbaustoff (M2)

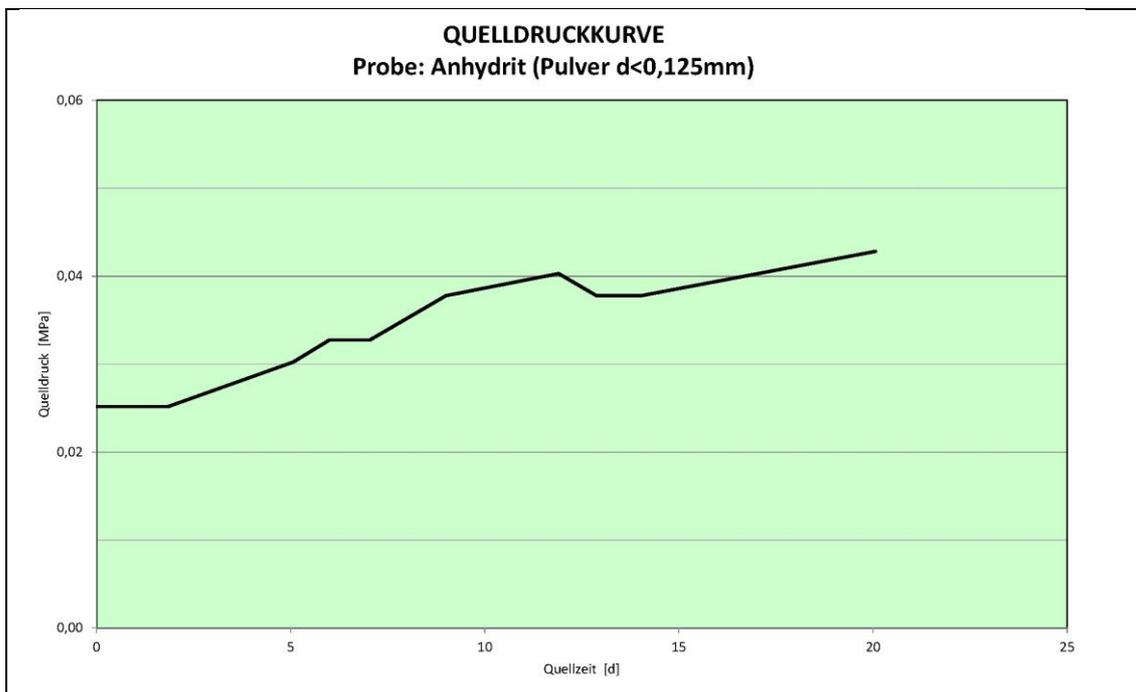


Abbildung 6-308: Quelldruckkurve eines Pulverpresslings aus aufgemahlenem Anhydritgestein

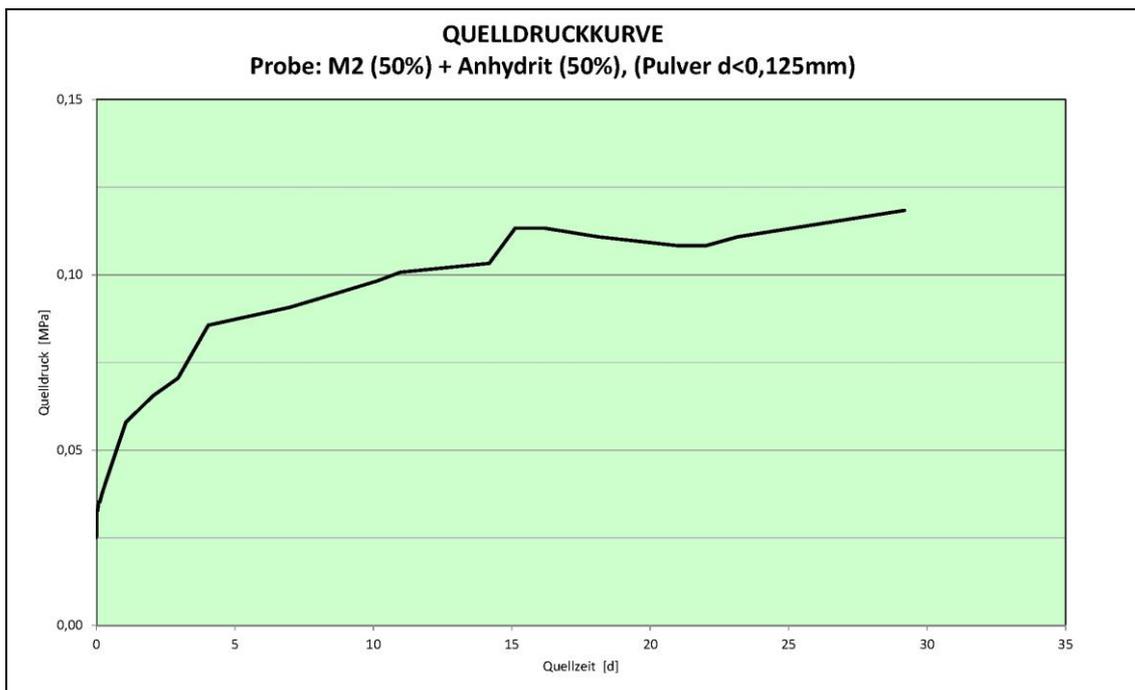


Abbildung 6-309: Quelldruckkurve eines Pulverpresslings einer Mischung aus aufgemahlenem Referenzverfüllbaustoff (M2) und Anhydritgestein

Die Quelldruckkurven des Verfüllbaustoffs (Abbildung 6-307) und des Anhydrits (Abbildung 6-308) zeigen bereits bei der kurzen Versuchsdauer von weniger als 30 Tagen einen grundsätzlichen Unterschied in ihrem Verlauf. Während der Quelldruck beim Verfüllbaustoff bereits nach weniger als 5 Tagen praktisch nicht mehr weiter ansteigt, wächst der Quelldruck des Anhydrits während des Versuchs in erster Näherung linear weiter an. Die abflachende Form der Quelldruckkurve der Pulvermischung beider Stoffe (M2 + Anhydrit, Abbildung 6-309) kann in Ansätzen als eine Überlagerung der beiden Kurvenformen der Einzelkomponenten interpretiert werden.

Aus der Literatur ist bekannt, dass für Anhydrit ein träges aber stetiges Quellverhalten typisch ist, das über Jahre andauern kann, infolge dessen können in Ödometerversuchen mit Anhydrit die Quelldrücke über Jahre allmählich bis zu hohen Drücken von über 8 MPa ansteigen (Mutschler & Fröhlich 2011, Pimentel & Anagnostou 2013, Kovári & Chiaverio 2007). Die oben abgebildete Quelldruckkurve der Anhydritprobe (vgl. Abbildung 6-308) steigt zwar, wie in der Literatur beschreiben, während des Versuchs stetig an, jedoch sind die erreichten Quelldruckwerte um ca. 1,5 Größenordnungen geringer als für reinen Anhydrit während der Versuchsdauer zu erwarten gewesen wäre (Extrapolation und Vergleich mit Kurvenverläufen aus Mutschler & Fröhlich 2011). Zur Klärung dieser Beobachtung wurde im Nachgang der Ödometerversuche das bis dahin verwendete Anhydritgestein mittels XRD erneut untersucht und neben großen Mengen Gips nur geringe Mengen gefunden, was die zwar für Anhydrit typische Form aber auch die geringe Steigung der Quelldruckkurve erklärt.

Der relativ geringe Quelldruck, der im Ödometerversuch mit Verfüllbaustoff M2 erreicht wurde (vgl. Abbildung 6-307), war so zu erwarten, da der zementhaltige Verfüllbaustoff M2 als solcher kaum eine Neigung zum Quellen besitzt.

Die im Verlauf des Ödometerversuchs mit der Pulvermischung beider Stoffe gemessenen Quelldrücke sind höher als die der Einzelkomponenten M2 und Anhydrit (Abbildung 6-309). Dies kann mehrere Gründe haben: Zum einen besaß die Misch-Probe nach dem Verpressen mit $1,75 \text{ g/cm}^3$ eine etwas höhere Packungsdichte als bei einer Kombination der Komponenten M2 und Anhydrit zu erwarten gewesen wäre (rechnerisch $1,7 \text{ g/cm}^3$) und damit eventuell ein etwas höheres Quellpotential. Hauptverantwortlich ist jedoch wahrscheinlich in erster Linie die Neubildung von im Vergleich zu den Vorgänger-Phasen sehr voluminösem Mineral Ettringit, welche bei der vorliegenden Durchmischung von zementhaltigem Verfüllbaustoff und sulfathaltigem Gestein bereits nach einer relativ kurzen Versuchsdauer zu erwarten war.

Schlussfolgerungen

Aus den oben beschriebenen Beobachtungen der Ödometerversuche sowie aus den Informationen aus der Literatur wurden für die Dimensionierung der Druckmesszelle und die Herstellung der Probekörper verschiedene Schlüsse gezogen und Punkte angepasst:

- Der maximale Quelldruck von anhydrithaltigen Gesteinen ist erst nach Jahren zu erwarten. Maximale Werte können bei über 8 MPa liegen (Mutschler & Fröhlich 2011, Pimentel & Anagnostou 2013, Kovári & Chiaverio 2007).
- Gesteine, die quellfähige Tone enthalten können ebenfalls hohe Endwerte des Quelldrucks von bis zu 3 MPa aufweisen (Hauber). Im Gegensatz zu anhydrithaltigen Gesteinen werden die maximalen Quelldrücke bei Tonen jedoch bereits nach viel kürzerer Zeit (innerhalb von Tagen bis Wochen) erreicht. (vgl. Pimentel & Anagnostou 2013, Hauber et al. 2005).
- Der beim Zusammentreffen von zementhaltigem Verfüllbaustoff und sulfathaltigem Gestein zu erwartende Quelldruck ist noch wenig erforscht (Kapitel 6.8.3). Im Verlauf von vielen Monaten bis Jahren sind jedoch durchaus erhebliche Quelldrücke zu erwarten.
- Um möglichst rasch und effizient die Funktion der zu konstruierenden Druckmesszelle überprüfen und gegebenenfalls verbessern zu können, ist bei den ersten Testläufen der Einsatz von rasch und stark quellenden Pulverpresslingen vorgesehen. Infolgedessen wurden für die Herstellung der Pulverpresslinge in der Testphase die folgenden Materialien ausgewählt (Abschnitt 6.8.4.2):
 - Es wird weiterhin der zementhaltige Verfüllbaustoff M2 verwendet
 - Das oben beschriebene Anhydritgestein wird durch eines mit nachweislich höherem Gehalt an Anhydrit ersetzt.
 - Um bei den Testläufen der Druckmesszelle nicht auf das langsame Quellverhalten des Anhydrits angewiesen zu sein und bereits nach wenigen Tagen hohe Quelldrücke erreichen zu können, wird dem Anhydritgestein quellfähiger Ton (Bentonit) beigegeben (Massenverhältnis Anhydritgestein : Bentonit = 1 : 1). Dieses Vorgehen stützt sich u. a. auf Pimentel & Anagnostou 2013, die das starke Quellen natürlich vorkommender sulfathaltiger Tonsteine beschreiben.
- Bei der Planung und Konstruktion der Druckmesszelle musste darauf geachtet werden, dass je nach untersuchtem Material sowohl die geringen Quelldrücke zu Beginn eines Versuchs als auch die hohen End-Quelldrücke (z.B. von Anhydrit) erfasst werden können. Gegebenen-

falls kann es dafür notwendig sein im Laufe eines ggf. Wochen oder Monate dauernden Versuchs verschiedene Messeinrichtungen für die Kraft mit unterschiedlichen Messbereichen bzw. Empfindlichkeiten zu verwenden.

6.8.4.2. Herstellungsverfahren für kombinierte Probekörpern

Bevor die Konstruktion der Druckmesszelle durchgeführt werden konnte, musste sichergestellt werden, dass eine Herstellung kombinierter Probekörper aus Verfüllbaustoff und Anhydrit/Ton umgesteuzt werden konnte. Die Probekörper sollten idealerweise miniaturisierte Querschnitte von Erdwärmesonden nachstellen, d. h. ein zylindrischer Kern aus Verfüllbaustoff sollte von einem Ring aus Umgebungsgestein (z.B. aus Anhydrit und/oder Ton) umgeben sein. In Anlehnung an die in Abschnitt 6.8.4.1 beschriebenen Ödometerversuche sollten das pulverförmige Probematerial in Stahlringen mit einem Innendurchmesser von 71 mm Durchmesser gepresst werden. Die so entstehenden Pulverpresslinge sollten eine Höhe ca. 20 mm aufweisen. Der zentrale Verfüllbaustoffkern der Proben sollte einen Durchmesser von 45 mm aufweisen und sich möglichst exakt in der Mitte des Stahlrings eingebracht werden. Zweck des beschriebenen Probenaufbaus ist, dass in der Druckmesszelle die Quelldrücke des zentralen Verfüllbaustoffkerns und des Rings aus Umgebungsgestein getrennt voneinander aufgenommen werden können.

Zur Herstellung solcher Pulverpresslinge wurden zwei unterschiedliche Verfahren entwickelt und erprobt. Bei beiden Verfahren kamen, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, drei Materialien zum Einsatz: Referenzverfüllbaustoff (M2), Anhydritgestein (nachweislich mit deutlichem Anhydritgehalt) und quellfähiger Ton (Bentontit). Wie in Abschnitt 6.8.4.1 beschrieben, wurde, mit dem Ziel einer schnellen Quelldruckentwicklung für den äußeren Ring des Pulverpresslings, eine Mischung aus Anhydrit und Ton eingesetzt.

Herstellungsverfahren 1 „Pulver-Kern-Presslinge“

Zu diesem ursprünglich verwendeten Verfahren wurde eine spezielle Verpressvorrichtung benutzt, die es erlaubte, um einen Kern aus ausgehärtetem Verfüllbaustoff herum einen Ring aus pulverisiertem Anhydrit/Ton zu pressen. Im Verpressvorgang wurden 200 kN aufgebracht und diese Kraft 30 min gehalten. Abbildung 6-310, links zeigt die Verpressvorrichtung, rechts ist ein mittels des Verfahrens hergestellter Pulverpressling zu sehen.



Abbildung 6-310: Herstellungsverfahren 1 „Pulver-Kern-Presslinge“. Links: Verpressvorrichtung für kombinierten Pulver-Zementstein-Presslinge; rechts: Kombiniertes Pulver-Zementstein-Pressling, mit noch ungeschliffenem Zementsteinkern.

Die Herstellung von Proben mit diesem Verfahren gelang zwar prinzipiell, sie wies jedoch einige schwerwiegenden Nachteile auf: Die Herstellung und das Zusägen des Verfüllbaustoffkerns war relativ aufwendig, da Schalungen oder Kernbohrungen notwendig waren. Nach dem Verpressen musste die Probe aus der Verpressvorrichtung entnommen werden und dabei brach in allen durchgeführten Versuchen der Kern ab. Dabei brach nur bei einem Versuch der Kern relativ zur glatten Oberfläche des Rings konvex (vgl., Abbildung 6-310 rechts) und konnte anschließend vorsichtig auf die Höhe des Rings herunter geschliffen werden. Bei allen anderen Versuchen brach der Kern relativ zur Oberfläche des Rings konkav ab, so dass die Proben für die weitere Verwendung unbrauchbar wurden, da bei einem Schleifen von Kern und Ring auf dieselbe Höhe nur noch sehr dünne Proben, deutlich kleiner 20 mm, übriggeblieben wären. Diese Methode zur Herstellung von Pulverpresslingen wurde deshalb als ungeeignet eingestuft und aufgegeben.

Herstellungsverfahren 2 „Pulver-in-Pulver Presslinge“

Da sich das ursprünglich geplante Verfahren zur Herstellung der kombinierten Pulver-Kern-Presslinge (Herstellungsverfahren 1) als ungeeignet erwiesen hatte, wurde die Verpressvorrichtung erweitert sowie eine Einfüllhilfe konzipiert und konstruiert. In Abbildung 6-311 und in Abbildung 6-312 ist die Herstellung eines kombinierten Pulver-in-Pulver Presslings Schritt für Schritt nachzuvollziehen:

Abbildung 6-311:

- 1) Vorgemischte und abgemessene Ausgangsstoffe zur Herstellung des Pulverpresslings. Für den Ring: Anhydrit/Ton-Mischung aus aufgemahlenem Anhydrit-Gestein und Bentonitpulver (Massenverhältnis 1:1). Für den Kern: aufgemahlener Verfüllbaustoff.

- 2) Ein leerer Stahlring wird zentral auf der Basisplatte platziert.
- 3) Der Stahlmantel der Verpressvorrichtung wird aufgesetzt
- 4) Damit beim Verpressen möglichst wenig Pulver zwischen Stahlmantel und den Stempel gelangen kann wird eine Kunststoffolie (DIN-A4 Format) passgenau röhrenförmig in den Stahlmantel gestellt.
- 5) Einfüllhilfe. Diese passt zentral genau in den mit der Folie ausgekleideten Stahlmantel und wird durch drei im 120°-Abstand angeordnete Stahlflügel zentriert. Die Einfüllhilfe besteht im unteren Bereich aus einer dünnwandigen (0,5 mm Wandstärke) Stahlblechröhre, die die Funktion hat, das Verfüllbaustoffpulver im Zentrum vom Anhydrit/Tonpulver im Ringbereich getrennt zu halten.
- 6) Die Einfüllhilfe wird in den mit der Folie ausgekleideten Stahlmantel gesetzt.

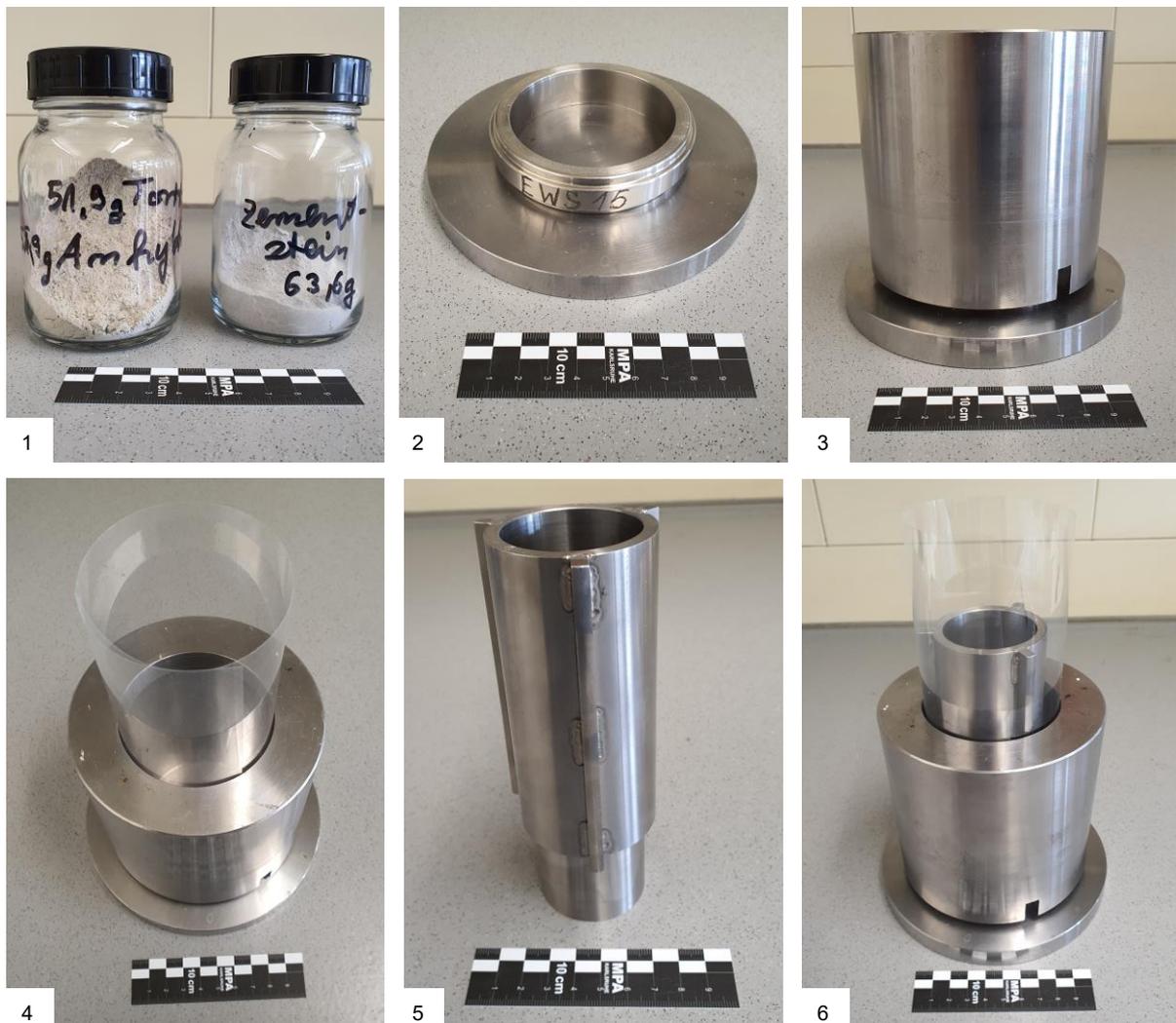


Abbildung 6-311: Herstellungsverfahren 2 „Pulver-in-Pulver Presslinge“: 1: vorgemischte Ausgangsstoffe der Presslinge; 2: Stahlring auf Basisplatte; 3: Stahlmantel der Verpressvorrichtung; 4: Kunststoffolie im Stahlmantel; 5: Einfüllhilfe; 6: Einfüllhilfe im mit Folie ausgekleideten Stahlmantel

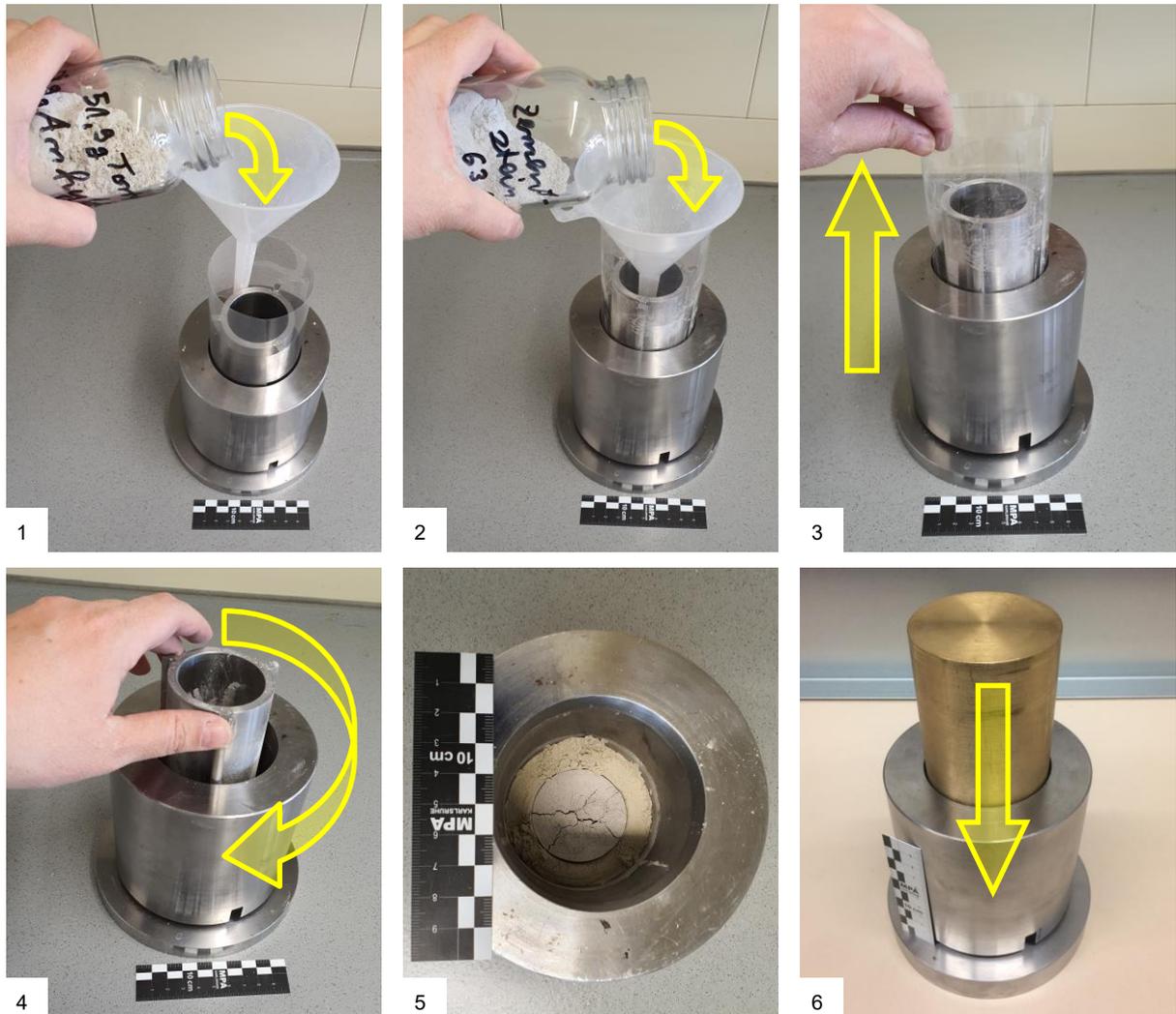


Abbildung 6-312: Herstellungsverfahren 2 „Pulver-in-Pulver Presslinge“ (Fortsetzung): 1: Einfüllen von Anhydrit/Tonpulver; 2: Einfüllen von Verfüllbaustoffpulver; 3: Entfernen der Kunststoffolie; 4: Drehen der Einfüllhilfe; 5: Blick von oben auf Pulverpressling vor dem Pressen; 6: Aufsetzen des Stempels

Abbildung 6-312

- 1) Ein Trichter wird zwischen den Stahlflügeln (ca. im Winkelabstand von 120°) zwischen Folie und Einfüllhilfe gesteckt und das Anhydrit/Tonpulver wird vorsichtig in den Ringraum eingefüllt.
- 2) Der Trichter wird in die zentrale Öffnung der Einfüllhilfe gesteckt und das Verfüllbaustoffpulver wird in den Kernraum eingefüllt.
- 3) Die Kunststoffolie wird vorsichtig nach oben entfernt.
- 4) Die Einfüllhilfe wird vorsichtig gedreht, so dass die Stahlflügel das Anhydrit/Tonpulver gleichmäßiger im Ring verteilen. Danach wird auch die Einfüllhilfe vorsichtig nach oben abgezogen.

- 5) Blick von oben auf die eingebrachten Pulver. Zentral im Kern Verfüllbaustoffpulver, im Ring Anhydrit/Tonpulver.
- 6) Der Stempel wird vorsichtig von oben auf das Pulver gesetzt.

Nach dem so erfolgten Befüllen der Verpressvorrichtung kann der Verpressvorgang stattfinden (Kraft 200 kN, Haltezeit 30 min). Abbildung 6-313 zeigt die Oberseite eines kombinierten Pulver-in-Pulver Presslings nach der Entnahme aus der Verpressvorrichtung. Die Unterseite der so erzeugten Presslinge muss nicht bearbeitet werden, weil der Kern zentral und im korrekten Durchmesser im Pressling liegt. Lediglich an der Oberseite des Presslings können sich infolge von leichten Unterschieden in den Einfüllhöhen der Pulver zu Beginn des Verpressens kleine Unregelmäßigkeiten in der Form des Kerns ergeben. Diese können jedoch durch das Abschleifen einer dünnen Schicht von der Oberfläche des gesamten Presslings relativ einfach und ohne starke Beeinträchtigung der Probe entfernt werden. Mit dieser Methode hergestellte Proben erreichten in bisher durchgeführten Versuchen Rohdichten von größer gleich 2 g/cm^3 und sind damit relativ nah bei den Dichten der Ausgangsstoffe.

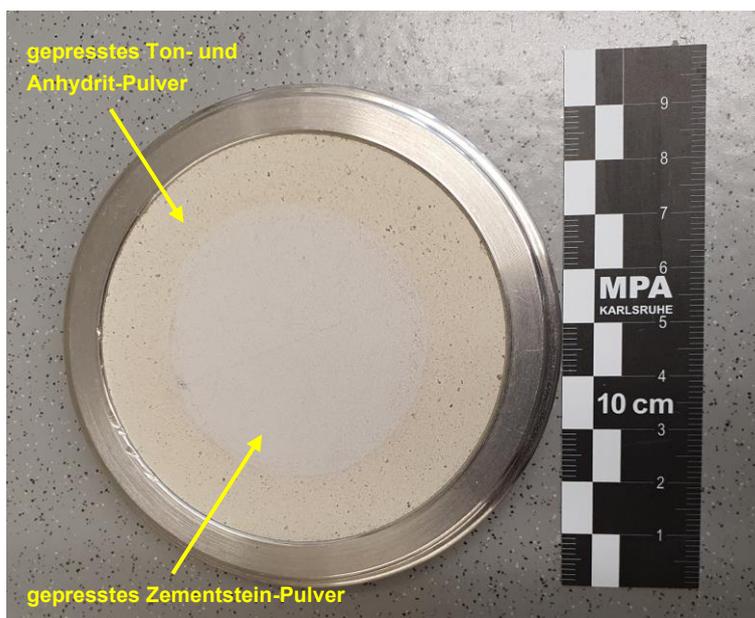


Abbildung 6-313 Herstellungverfahren 2 „Pulver-in-Pulver Pressling“ 2. Pressling, Oberseite noch ungeschliffen.

6.8.4.3. Planung und Konstruktion der Druckmesszelle

Allgemeines

Für Langzeituntersuchungen dieser Art sollten mechanisch betriebene nicht automatisierte Versuchsvorrichtungen verwendet werden, da dann im Falle eines Stromausfalls keine Störung im Versuchsablauf eintritt.

Alle Angaben zu Drücken beziehen sich auf den absoluten Druck.

Probe

Die zu prüfende Probe besteht aus einem Pulverpressling. Sie wird als gepresste Tablette von 20 mm Dicke und 71 mm Durchmesser in einem sie umschließenden Stahling hergestellt. Die beiden pulverförmigen Bestandteile der Probe werden in einem Arbeitsgang verpresst. Dazu wird eine spezielle Verpressvorrichtung sowie eine Einfüllhilfe verwendet, die es erlauben, in einen Ring aus pulverisiertem Anhydrit einen Kern aus pulverisiertem Verfüllbaustoff zu pressen. Der Kern aus pulverisiertem Verfüllbaustoff hat einen Durchmesser von 45 mm. Die Probe bildet somit einen miniaturisierten Querschnitt einer Erdwärmesonde. Die Herstellung der Probe ist in Abschnitt 6.8.4.2 beschrieben und bebildert.

Aufbau der Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung besteht aus einem stehend angeordneten steifen Rahmen mit vier in den Ecken der drei im Grundriss quadratischen Querhäupter positionierten Säulen. Auf dem unteren Querhaupt ist der Reaktor - das Kernelement der Druckmesszelle - positioniert. Gegen das mittlere Querhaupt stützt sich die Belastungsvorrichtung für den kreisringförmigen äußeren Teil der Probe ab. Gegen das obere Querhaupt stützt sich die Belastungsvorrichtung für den kreisförmigen inneren Teil der Probe ab. Durch die getrennte Abstützung der beiden Belastungsvorrichtungen wird jegliche gegenseitige Beeinflussung vermieden.

Reaktor

Der Reaktor bildet das Kernelement der Druckmesszelle. Im Reaktor wird die Probe von unten über eine Siebplatte mit darauf liegender Filterplatte gleichmäßig und vollflächig mit der Prüfflüssigkeit beaufschlagt. Der Druck, mit dem die Prüfflüssigkeit eingeleitet wird, ist einstellbar und wird konstant gehalten. Die Probe wird von oben über eine Siebplatte mit darunter liegender Filterplatte gleichmäßig und vollflächig gestützt. Siebplatte und Filterplatte haben die gleiche Geometrie wie die beiden Bestandteile der Probe, sind also jeweils zweiteilig. Die beiden oberen Siebplatten sind jeweils mit einer eigenständigen Belastungsvorrichtung verbunden. Der Druck der aus der Probe nach oben austretenden Flüssigkeit ist einstellbar und wird konstant gehalten. Es erfolgt eine Messung der in den Reaktor eingeleiteten Menge an Prüfflüssigkeit sowie eine Messung der aus dem Reaktor austretenden Menge an Flüssigkeit.

Sofern es im Reaktor zu einem Quellen von Anhydrit und/oder Verfüllbaustoff kommt, so wird der Quelldruck jeweils über die Kraftmesseinrichtung in den beiden oberhalb der Probe angeordneten Belastungsvorrichtungen erfasst.

Zulaufseite

Unterhalb der Probe ist eine Filterplatte angeordnet, durch die die Probe mit der Prüfflüssigkeit versorgt und die entstehende Flächenpressung vollflächig abgetragen wird.

Als Prüfflüssigkeit wird ein Mineralwasser ohne Kohlensäure verwendet. Dieses wird so gewählt, dass es den in der zu simulierenden Umgebung anzutreffenden Wässern in seiner Zusammensetzung ähnelt.

Unterhalb der Filterplatte ist eine Siebplatte angeordnet, durch die die Filterplatte mit der Prüfflüssigkeit vollflächig versorgt wird, so dass keine quergerichtete Strömung in der Filterplatte entsteht. Die Prüfflüssigkeit wird in einem Vorratsgefäß an der Versuchsvorrichtung bereitgehalten, und bei Bedarf nachgefüllt. Die Prüfflüssigkeit wird vor der Verwendung durch Anlegen eines Vakuums entlüftet.

Die Prüfflüssigkeit im Zulauf wird mit einem (einstellbaren) Druck von 4,0 bar vorgespannt und in die Sieb- und Filterplatte geleitet. Der Druck wird durch ein vorgelagertes Druckluftsystem mit einstellbarem Druckminderer mit Filter erzeugt.

In der Zulaufstrecke ist ein lotrecht angeordnetes Rohr aus Acrylglas installiert, in dem der Meniskus der Säule der Prüfflüssigkeit sichtbar ist. Neben dem Rohr ist ein Lineal angeordnet, so dass die Lage und die Lageveränderung des Meniskus und damit die Menge verbrauchter Prüfflüssigkeit visuell erfasst und dokumentiert werden kann. Dabei wird akzeptiert, dass die Oberfläche der Prüfflüssigkeit mit Luft in Berührung kommt. Auf eine trennende Ölschicht wird bewusst verzichtet, um im Falle eines Durchschlagens (spontane Entstehung einer unerwartet großen Durchlässigkeit) der Probe, diese nicht mit dem Öl zu kontaminieren.

Die Zulaufseite ist so gestaltet, dass das Befüllen der Anlage mit Prüfflüssigkeit, das unter Drucksetzen, das Betreiben und das Nachfüllen von Prüfflüssigkeit unter Aufrechterhaltung des Flüssigkeitsdrucks an der Probe realisiert werden kann.

Ablaufseite

Auf dem die Probe umschließenden Stahlring ist ein Stahlmantel identischen Innendurchmessers aufgesetzt, der das nach oben quellende Material seitlich umschließt. Zusätzlich führt dieser Stahlmantel die Filterplatte und die auf der Filterplatte liegende Siebplatte, so dass kein Querversatz entstehen kann.

Oberhalb der Probe - in oben genanntem Stahlmantel - ist eine Filterplatte angeordnet, durch die die aus der Probe austretende Flüssigkeit abgeleitet und die entstehende Flächenpressung vollflächig abgetragen wird. Diese Filterplatte ist entsprechend der Geometrie von Anhydrit und Verfüllbaustoff in einen außen liegenden Ring und einen innenliegenden Kreiszyylinder geteilt.

Oberhalb der Filterplatte ist eine Siebplatte angeordnet, über die die aus der Filterplatte austretende Flüssigkeit vollflächig abgeführt und ausgeleitet wird. Diese Siebplatte ist entsprechend der Geometrie von Anhydrit und Verfüllbaustoff bzw. der Filterplatte in einen außen liegenden Ring und einen innenliegenden Kreiszyylinder geteilt.

Die Prüfflüssigkeit im Ablauf ist mit einem (einstellbaren) Druck von 3,5 bar, und somit mit einer Druckdifferenz von 0,5 bar bei 4,0 bar Eingangsdruck, vorgespannt. Der Druck wird durch ein nachgelagertes Druckluftsystem mit einstellbarem Druckminderer mit Filter und einstellbarem Druckbegrenzungsventil erzeugt.

In der Ablaufstrecke ist ein lotrecht angeordnetes Rohr aus Acrylglas installiert, in dem der Meniskus der Säule der ausgetretenen Flüssigkeit sichtbar ist. Neben dem Rohr wird ein Lineal angeordnet, so dass die Lage und die Lageveränderung des Meniskus und damit die Menge an Flüssigkeit visuell erfasst und dokumentiert werden kann, die die Probe passiert. Dabei wird akzeptiert, dass die Oberfläche der Flüssigkeit mit Luft in Berührung kommt.

Die austretende Flüssigkeit wird in einem Sammelgefäß an der Versuchsvorrichtung aufgefangen. Durch regelmäßige Wägung des Sammelgefäßes nebst Inhalt kann eine Kontrolle der Menge der ausgetretenen Flüssigkeit erfolgen.

Die Ablaufseite ist so gestaltet, dass das Befüllen der Anlage mit Prüfflüssigkeit, das unter Drucksetzen, das Betreiben und das Nachfüllen von Prüfflüssigkeit unter Aufrechterhaltung des Flüssigkeitsdrucks an der Probe realisiert werden kann.

Aufstellort

Die Simulationszelle ist in einem Raum mit nahezu konstanter Temperatur aufgestellt, um zu vermeiden, dass durch Temperaturveränderungen Längenänderungen im Aufbau stattfinden, die sich auf den Belastungszustand der Probe auswirken.

Messkonzept

Da es sich gegebenenfalls um Versuche mit einer Dauer von mehreren Monaten oder Jahren handeln kann, kann die Simulationszelle unabhängig von der Versorgung mit elektrischer Energie betrieben werden. Die Messung von Verschiebungen erfolgt mittels mechanischer Messuhren. Die Messung von Kräften erfolgt durch mechanisch arbeitende Kraftmesseinrichtungen. Die Messung von Temperaturen erfolgt mit Analogthermometern. Die Messung der Zeit erfolgt mittels konventioneller Uhr und Kalender. Die Messung des Füllstands am Zulauf und am Ablauf erfolgt mittels Lineal. Die Messung der Masse des Sammelgefäßes erfolgt mittels Wägung.

Versuchsablauf

Vor der Verwendung der Prüfflüssigkeit wird diese entlüftet. Die Filterplatten werden vor Gebrauch in entlüfteter Prüfflüssigkeit vorgehängt. Nachdem die Sieb- und Filterplatten mit der Probe auf der Bodenplatte aufgeschichtet wurden, wird der Reaktor durch Absetzen des Mantels geschlossen und dicht verschraubt.

Beim Befüllen der Anlage wird diese auf der Zu- und Ablaufseite komplett entlüftet. Anschließend wird der Druck im Zu- und Ablauf zunächst gleich eingestellt, dann wird der Druck auf der Zulaufseite um die gewünschte Druckdifferenz erhöht, damit startet der Versuch. Die Auswertung der Entwicklung des Quelldrucks kann bereits während des laufenden Versuchs auf Grundlage der verschiedenen Messwerte und von Datum und Zeit erfolgen.

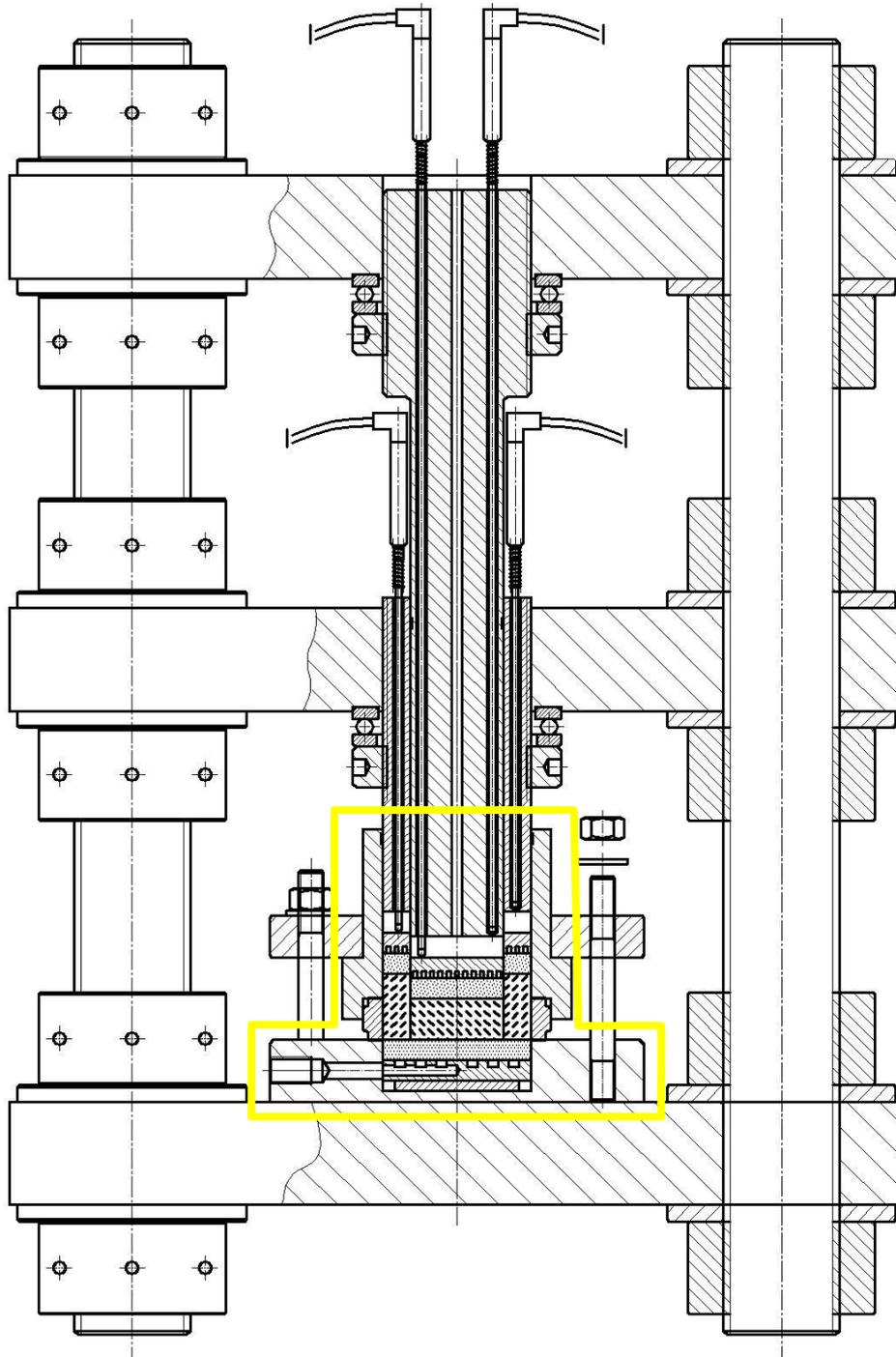
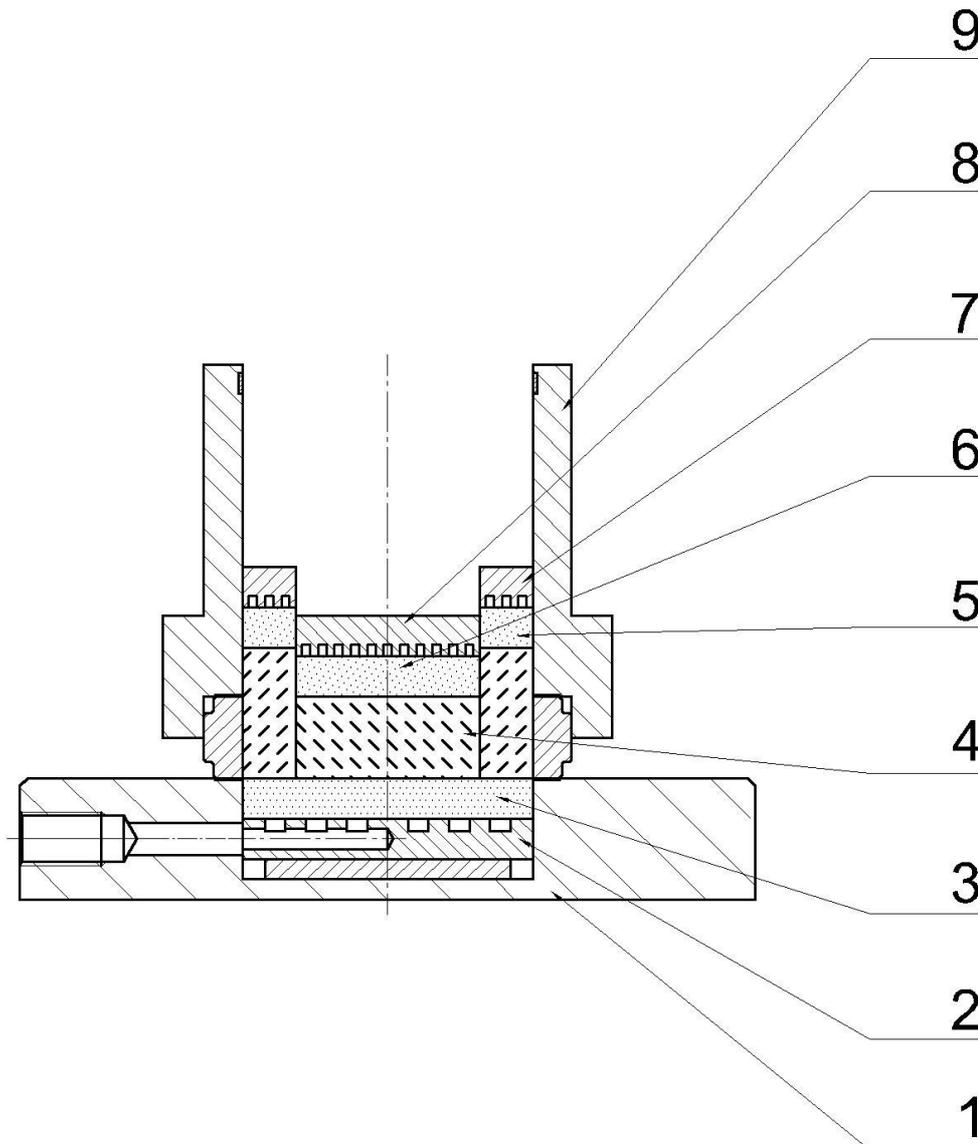


Abbildung 6-314: Gesamtansicht der Druckmesszelle, gelb markiert ist der in Abbildung 6-315 dargestellte Bereich des Reaktors



Legende

- 1 Bodenplatte
- 2 Siebplatte, unten
- 3 Filterplatte, unten
- 4 Probe
- 5 Filterplatte, Ring, oben
- 6 Filterplatte, Zylinder, oben
- 7 Siebplatte, Ring, oben
- 8 Siebplatte, Zylinder, oben
- 9 Stahlmantel

Abbildung 6-315: Reaktor der Druckmesszelle

Abbildung 6-314 zeigt die technische Zeichnung der Druckmesszelle als Gesamtansicht. In Abbildung 6-315 ist der in Abbildung 6-314 gekennzeichnete Ausschnitt des Reaktors als beschriftete Detailansicht dargestellt.

Bau der Druckmesszelle

Die nachfolgende Abbildung 6-316 dokumentieren Einzelkomponenten der Druckmesszelle vor dem Zusammenbau. In Abbildung 6-317 ist der komplette Versuchsstand (Druckmesszelle mit Zu- und Ablaufinstallation) zu sehen. Abbildung 6-318 zeigt zur besseren Kenntlichmachung einen Verpressring mit einem zweifarbigen Holz-Dummy statt eines Pulver-in-Pulver Pressling.



Abbildung 6-316: Bau der Druckmesszelle: Einzelkomponenten und Dokumentation der Montage

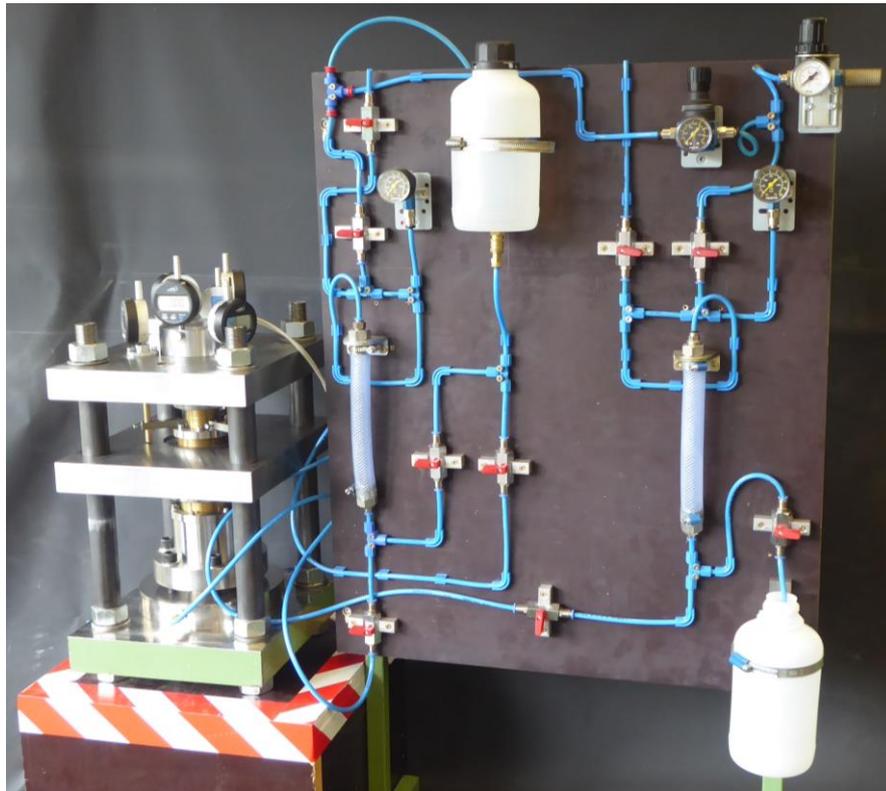


Abbildung 6-317: Versuchsstand: Druckmesszelle mit Zu- und Ablaufinstallation



Abbildung 6-318: Verpressung mit einem zweifarbigen Holz-Dummy

Funktionstest

Die Funktionstüchtigkeit der Zelle konnte in einem ersten Test mit schnellquellendem Material wie im Projekt geplant bestätigt werden. Des Weiteren sind aktuell Versuche mit Pulver-in-Pulver Presslingen aus Anhydrit/Ton-Mischung und aufgemahlenem Verfüllbaustoff in der Durchführung sowie in Planung.

6.8.4.4. Fazit zu Entwicklung und Bau einer Simulationszelle

- Mithilfe von Ödometervorversuchen wurden für die Untersuchungen in der Druckmesszelle sinnvolle Zusammensetzungen von Proben ermittelt, die bei den ersten Versuchsreihen eine rasche und ausreichend hohe Quelldruckentwicklung liefern kann.
- Eine Methode zur zuverlässigen Herstellung von kombinierten Pulver-in-Pulver-Presslingen als Nachbildungen von EWS-Querschnitten für den Einsatz in der Druckmesszelle wurde entwickelt und erprobt.
- Die Druckmesszelle wurde geplant und konstruiert:
- Um bei Langzeitversuchen möglichst stabil und über Jahre laufen zu können wurde die Druckmesszelle als mechanisch betriebenes nicht automatisiertes System entwickelt.
- Die Druckmesszelle kann voneinander unabhängig die entstehenden Quelldrücke von einem Kern aus Verfüllbaustoff und einem Ring aus Umgebungsgestein erfassen und gleichzeitig einem Druckgefälle ausgesetzt von Fluid durchströmt werden.

6.8.5. Versuche zu Korrosion von Magnetit im Milieu zementgebundener Verfüllbaustoffe

Zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Magnetit im Milieu zementgebundener Verfüllbaustoffe wurden neben einer ersten Literatursichtung an einem kommerziellen Verfüllbaustoff Batch- und Einlagerungsversuche durchgeführt.

Da die Ergebnisse dieser Untersuchung nur wenige Erkenntnisse lieferten wurden zusätzlich zwei magnetitdotierte kommerzielle Verfüllbaustoffe zum einen im unreaktierten Ausgangszustand, zum anderen drei Jahre nach dem Abbinden mittels Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) betrachtet und verglichen.

6.8.5.1. Literatursichtung

Die Langzeitstabilität von Magnetit in zementär gebundenen Systemen und damit auch die von Magnetit-Dotierungen in EWS-Verfüllbaustoffen ist bisher nach Kenntnis der Autoren nicht oder kaum wissenschaftlich untersucht worden. Da sowohl die thermodynamische Stabilität als auch die Löslichkeit als indirektes Maß der Stabilität von Magnetit stark von zahlreichen Faktoren, wie z. B. pH-Wert, Redoxpotential, Temperatur, Partikelgröße oder vorhandenen Reaktionspartnern abhängt, ist die Übertragung von Erkenntnissen aus vorhandenen Arbeiten anderer Fachbereiche nur begrenzt möglich. Eingeschränkt kann eine Literatursichtung jedoch Hinweise auf die zu erwartende Stabilität von Magnetit in EWS-Verfüllbaustoffen geben.

Beverkog & Puigdomenech 1996 betrachten die thermodynamische Stabilität von Eisen und seinen Oxiden und Hydroxiden in Pourbaix-Diagrammen (pH-Potential-Diagrammen) für den Temperaturbereich von 25 °C bis 300 °C. In Abbildung 6-319 sind beispielhaft zwei übersichtliche Pourbaixdiagramme für Eisen für 25 °C (links) und 200 °C dargestellt (McCafferty 2010).

Betrachtet man Abbildung 6-319 wird unter anderem ersichtlich, dass Magnetit bei einer Temperatur von 25 °C und einem Normalpotential gegen Wasserstoff (S.H.E.) von etwa -0,45 V im leicht bis deutlich alkalischen Bereich (ca. von pH 8,5 bis 12) thermodynamisch stabil ist. Zur besseren Lesbarkeit ist in beiden Diagrammen in Abbildung 6-319 eine horizontale Linie bei -0,45 V Normalpotential gegen Wasserstoff eingezeichnet. Nach dem Pourbaixdiagramm können sowohl

Veränderungen des Potentials (vertikale Bewegungen im Diagramm) als auch Veränderungen des pH-Werts (horizontale Bewegungen im Diagramm) dazu führen, dass der Stabilitätsbereich von Magnetit verlassen wird. Infolgedessen wäre z. B. bei 25 °C (Abbildung 6-319, links) zu erwarten, dass sich Magnetit über pH 12 in Magnetit umwandelt und unter pH 8,5 in Lösung geht (Fe²⁺ als stabile Phase). Abbildung 6-319, rechts ist zudem zu entnehmen, dass eine Erhöhung der Temperatur zu einer Verkleinerung des Stabilitätsbereich von Magnetit führt und diesen zudem zu niedrigeren pH-Werten hin verschiebt.

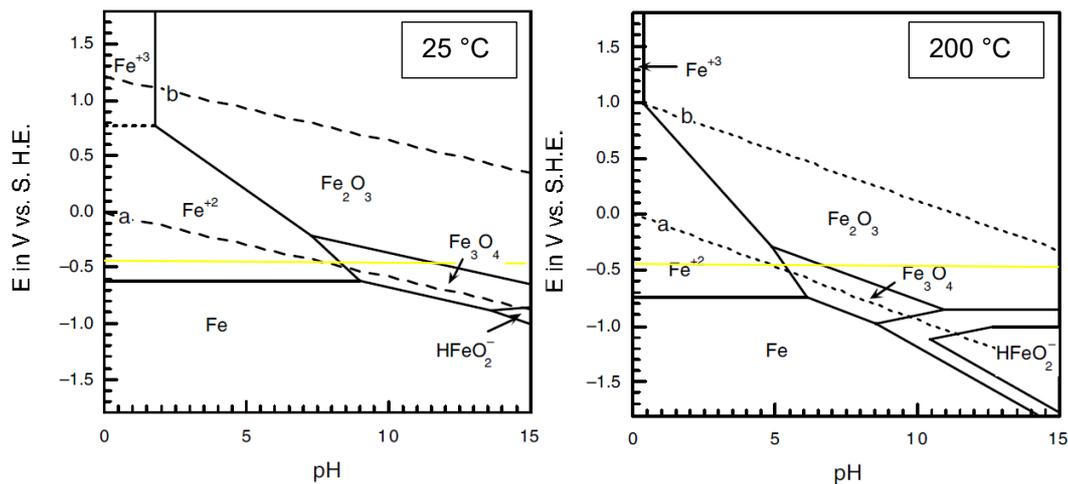


Abbildung 6-319: Pourbaix-Diagramme für Eisen aus McCafferty 2010. Links: für eine Temperatur von 25 °C, rechts: für eine Temperatur von 200 °C. Gelbe Horizontale kennzeichnet in etwa ein Normalpotential gegen Wasserstoff von -0,45 V

Hermansson 2004 fasst in einer Literaturrecherche Arbeiten zur thermodynamischen Stabilität und zur Löslichkeit von Magnetit zusammen. Viele der bei Hermansson 2004 zitierten Quellen stehen dabei im thematischen Zusammenhang mit der Lagerung von radioaktiven Abfällen, bei der Magnetit als Passivierungsschicht von Bedeutung ist. Dabei sind in erster Linie Daten beschrieben, die bei deutlich erhöhten Temperaturen (bis zu mehreren 100 °C) und bei reduzierenden Bedingungen (z.B. in der Anwesenheit von H₂) ermittelt wurden (Macdonald et al. 1972, Sweeton & Baes 1970, Styrikovich et al. 1971). Selbst wenn diese Randbedingungen bei EWS nicht gegeben sind, lassen die Löslichkeitsbetrachtungen der genannten Autoren ähnliche Schlüsse zu wie die Betrachtung der Pourbaixdiagramme. Es wird beobachtet, dass die Löslichkeit von Magnetit vom sauren in den mäßig alkalischen Bereich deutlich abnimmt und sich erst bei höheren pH-Werten, ab ca. pH 10 oder 11 wieder erhöht, jedoch auch dann unter der Löslichkeit des sauren Bereichs bleibt (Macdonald et al. 1972, Sweeton & Baes 1970, Styrikovich et al. 1971). Unabhängig von den pH-Werten sind jedoch die in der Literatur beschriebenen Löslichkeiten von Magnetit absolut betrachtet als gering einzuschätzen (ca. 10⁻⁶ bis 10⁻⁷ mol/kg, vgl. Hermansson 2004).

Schlussfolgernd kann angenommen werden, dass infolge des Stabilitätsbereichs von Magnetit im alkalischen Bereich sowie der in der Literatur beschriebenen geringen absoluten Löslichkeit von Magnetit eine hohe Stabilität von Magnetit in EWS, zumindest über viel Jahre hin, zu erwarten

ist, soweit nicht im Bereich der EWS mit starken Auslaugungsvorgänge oder stark oxidierende Bedingungen gerechnet werden muss.

6.8.5.2. Batch- und Einlagerungsversuche

Um das Korrosionsverhalten von Magnetit zu untersuchen, wurden Langzeit- und Batchversuchen durchgeführt. Hierfür wurde ein kommerzieller Verfüllbaustoff, der bereits im Projekt EWS-tech untersucht worden war mit Magnetit dotiert. Die Korngrößenverteilung des Magnetit-Pulvers lag mit Korngrößen zwischen 0,1 µm und 100 µm in einem mit dem Verfüllbaustoff vergleichbaren Korngrößenbereich.

Batchversuche

Bei den Batchversuchen wurde zu Pulver aufgemahlener abgebundener Verfüllbaustoff mit Magnetit-Pulver und Wasser gemischt, die Zugabemenge an Magnetit-Pulver betrug 10 M.-% des unreaktierten Verfüllbaustoffs, das Massenverhältnis $\frac{\text{Wasser}}{\text{aufgemahlener Verfüllbaustoff}}$ betrug 1,27 bzw. 1,42. Als Referenzprobe wurde zudem Verfüllbaustoff lediglich mit Wasser gemischt. Alle Mischungen wurden in Flaschen gefüllt und über 8 Wochen in einem Überkopfschüttler rotiert (Abbildung 6-320, links). Nach 4 und 8 Wochen wurde aus den Flaschen Flüssigkeit entnommen, vakuumfiltriert und die klare Flüssigkeit mittels MP-AES auf verschiedene Schwermetallgehalte untersucht. Der verbleibende Flascheninhalt wurde nach Versuchsende jeweils getrocknet und erneut aufgemahlen. An den so erhaltene Pulvern erfolgte eine Messung der magnetischen Suszeptibilität mittels MS2B Dual Frequency Sensor der Fa. Bartington Instruments (Abbildung 6-320, rechts).

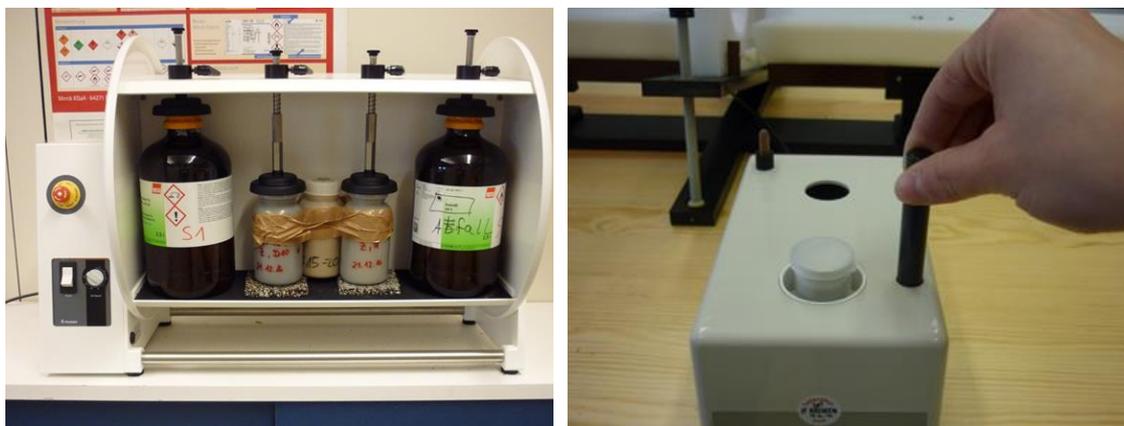


Abbildung 6-320: Überkopfschüttler mit eingebauten Batch-Proben (links), Messung einer Batchprobe mit MS2B Dual Frequency Sensor (rechts)

Die mittels MP-AES ermittelten Schwermetallgehalte zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen reinen Zementsteinproben und magnetitdotierten Proben.

Die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen an den über 8 Wochen mit Wasser wechselwirkenden Verfüllbaustoff-Pulvern wurde verglichen mit solchen, welche an Verfüllbaustoff-Pulvern

ermittelt wurden, die nicht mit Wasser in Wechselwirkung gestanden hatten und somit nur unkorrodierten Magnetit enthalten konnten. Es konnten dabei keine signifikanten Unterschiede in der magnetischen Suszeptibilität festgestellt werden. Hier finden sich keine Hinweise auf eine Veränderung des Magnetits während der Versuchsdauer von 8 Wochen.

Einlagerungsversuche

Für die Einlagerungsversuche wurden aus dem unreaktierten Verfüllbaustoff, Wasser und Magnetit Zylinder gegossen (Durchmesser 104 mm, Höhe 200 mm). Bei der Herstellung der Zylinder betrug die Zugabemenge von Magnetit-Pulver bei dotierten Proben 5 oder 10 M.-% des unreaktierten Verfüllbaustoffs (im Folgenden als 5% oder 10 % Magnetit abgekürzt). Daneben wurden Referenzproben ohne Magnetit hergestellt. Das Massenverhältnis $\frac{\text{Wasser}}{\text{Verfüllbaustoff}}$ wurde für alle Proben auf 0,8 festgelegt.

Die abgebundenen ausgeschalteten Zylinder wurden im Folgenden entweder zur Hälfte oder komplett mit Wasser bedeckt in verschlossenen Behältern für 8 Wochen in einem Klimaraum bei 20 °C gelagert (Abbildung 6-321, links). Halbbedeckte Proben wurden während des Versuchs alle 4 Tage 180 ° um die eigene Achse gedreht. 24 Stunden nach Einlagerungsbeginn hatte sich im Lagerungswasser der halb bedeckten Proben ein pH von ca. 12 und in dem der voll bedeckten Proben ein pH von ca. 10 eingestellt. Daraus kann geschlossen werden, dass wie erwartet, im Porenfluid der Proben ein deutlich alkalisches Niveau mit dem Magnetit in Wechselwirkung steht. Nach 4 und 8 Wochen wurde aus den Behältern mit den Zylindern jeweils einige ml Flüssigkeit entnommen, und mittels MP-AES auf verschiedene Schwermetallgehalte untersucht. An allen Zylindern wurde zudem vor Versuchsbeginn und nach 8 Wochen die magnetischen Suszeptibilität mittels MS2C Core Logging Sensor der Fa. Bartington Instruments (Abbildung 6-321, rechts) gemessen. Dabei wurde der zu messende Zylinder von einem ringförmigen Sensor umgeben. Für jeden Messpunkt wurden Sensor und Probe in 1 cm Schritten gegeneinander verschoben, und damit ein Profil der magnetischen Suszeptibilität über die Länge des Zylinders aufgezeichnet.



Abbildung 6-321: Einlagerung von Probezylindern in Wasser, halb bedeckt (links), Messung eines Probezylinders mit MS2C Core Logging Sensor (rechts)

In Abbildung 6-322 sind die mittels MP-AES bestimmte Gehalte verschiedener Schwermetalle im Lagerungswasser der Einlagerungsversuche nach einer Versuchsdauer von 4 und 8 Wochen

dargestellt. Unabhängig davon, welche Gruppe von Messpunkten betrachtet wird (4 oder 8 Wochen Versuchsdauer, halb oder voll bedeckt, dargestellt durch unterschiedliche Symbole), ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen, die darauf hindeutet, dass während der Versuchsdauer aus Magnetit-haltigen Proben signifikant andere Mengen an Schwermetallen eluiert werden als aus Magnetit-freien Proben. Dieses Ergebnis könnte darauf hindeuten, dass während der Versuchsdauer von 8 Wochen keine stärkere Auslaugung von Komponenten aus Proben mit Magnetit als aus Proben ohne Magnetit stattgefunden hat. Wie weiter oben angedeutet, sollte die Aussagekraft dieses Ergebnisses kritisch betrachtet werden, da im Vorfeld der Untersuchungen keine Bestimmung der Schwermetallgehalte des Verfüllbaustoffs und des Magnetits stattfand, und so nicht bekannt ist welche Mengen an Schwermetallen überhaupt maximal eluierbar wären.

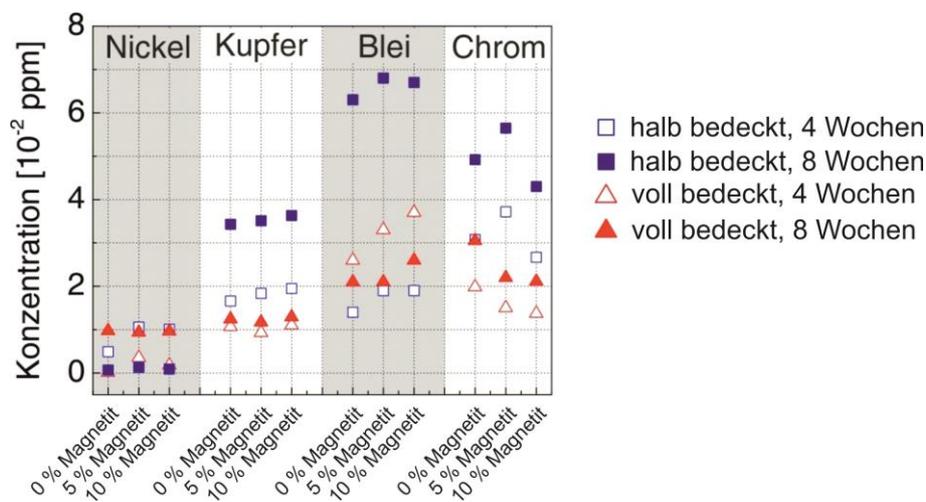


Abbildung 6-322: Mittels MP-AES bestimmte Gehalte verschiedener Schwermetalle im Lagerungswasser bei Einlagerungsversuchen. Jeder dargestellte Messpunkt wurde aus den Messungen an zwei Zylindern gemittelt.

Abbildung 6-323 zeigt verschiedene Profile der magnetischen Suszeptibilität über die Länge der Zylinderproben. Es sind sowohl Profile von zwei Zylindern mit 5 % (links) als auch von zwei Zylindern mit 10 % Magnetit (rechts) dargestellt. Die Suszeptibilitäts-Messungen wurden an jedem Zylinder sowohl vor Versuchsbeginn als auch nach 8 Wochen der Einlagerung durchgeführt (Kurven in Abbildung 6-323 mit vorher und nachher bezeichnet). Bei keiner der untersuchten Proben ist ein signifikanter Unterschied im Messprofil zwischen der Messung vor und nach der Einlagerung zu erkennen. Erneut sind keine Hinweise auf eine Veränderung des Magnetits während der Versuchsdauer von 8 Wochen festzustellen.

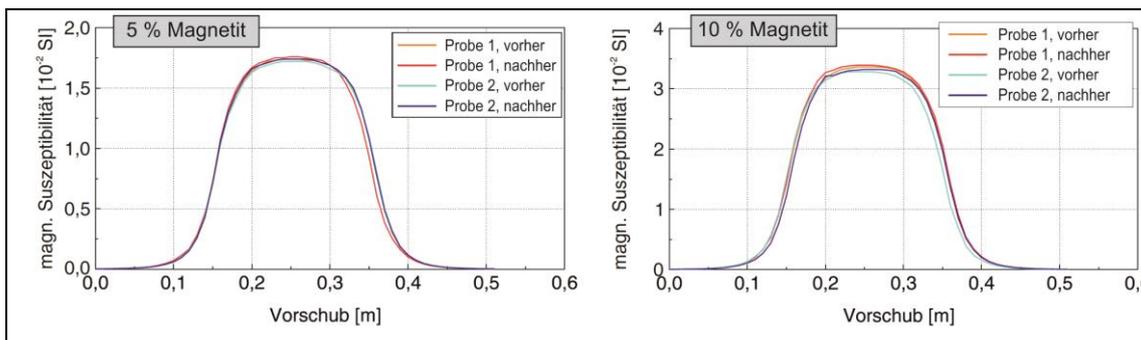


Abbildung 6-323: Darstellung von Profilen der magnetischen Suszeptibilität über die Länge von Zylinderproben. Links: Proben mit 5 M.-% Magnetit bezogen auf den unreaktierten Verfüllbaustoff, rechts: Proben mit 10 M.-% Magnetit bezogen auf den unreaktierten Verfüllbaustoff. Vohrer: Messung vor Beginn der Einlagerung, nachher: Messung nach der 8-wöchigen Einlagerung

6.8.5.3. ESEM-Untersuchungen

Da die in Abschnitt 6.8.5.2 beschriebene Bestimmung von Schwermetallgehalten in Eluaten lediglich indirekte Hinweise bei der Beurteilung der Stabilität von Magnetit liefern kann und zudem in den durchgeführten Versuchen eine relativ große Streuung der Messwerte festzustellen war, sollte eine alternative, aussagekräftigere und besser geeignete Analysemethode ermittelt werden. Zudem stellte sich die im Antrag vorgesehene Bearbeitungsdauer von drei Monaten als deutlich zu kurz heraus um sichere Aussagen treffen zu können.

Deshalb wurde zum einen beschlossen gegen Ende der Projektlaufzeit möglichst alte Proben, welche zu Projektbeginn im Rahmen anderer Arbeitspakete hergestellt worden waren auf den Zustand des in ihnen enthaltenen Magnetits hin zu untersuchen, zum anderen wurden ESEM-Untersuchungen zur optischen Beurteilung des Zustands von Magnetit als geeignete Analysemethode identifiziert.

Es wurden drei Jahre alte Proben zweier abgebundener Verfüllbaustoffe (A1 und A2) vom Projektpartner EIFER zur Verfügung gestellt sowie deren unreaktiertes Ausgangspulver (P1 und P2). Bei beiden Verfüllbaustoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche mit Magnetit dotierte Fertigmischungen.

Die abgebundenen Proben der Verfüllbaustoffe waren seit ihrer Herstellung, drei Jahre zuvor, feucht in verschlossenen Behältern gelagert, die unreaktierten Ausgangspulver trocken, beide bei Raumtemperatur. Alle vier Proben (zwei abgebundene Verfüllbaustoffe (A1 und A2), zwei unreaktierte Ausgangspulver (P1 und P2)) wurden am Institut für Funktionelle Grenzflächen (IFG) des KIT mittels ESEM untersucht. Die Proben wurden zuvor bei 40 °C für mehrere Stunden getrocknet, eine weitere Präparation war nicht notwendig.

Abbildung 6-324 zeigt beispielhaft ESEM-Bilder des unreaktierten Ausgangspulvers des Verfüllbaustoffs V1. Im Bild 1 ist das Pulver in 100facher Vergrößerung als Rückstreuелеktronenbild zu sehen. Bei den beiden mit Pfeilen markierten hell erscheinenden Körnern handelt es sich um Magnetitkörner, welche aufgrund ihrer höheren mittleren Ordnungszahl (hoher Eisengehalt) im Vergleich zu den restlichen Komponenten des Verfüllbaustoffs im Rückstreuелеktronenbild hell erscheinen und so gut zu identifizieren sind. Bild 2 und Bild 3 zeigen Magnetitkörner bei höheren Vergrößerungen (1000fach und 2000fach), bei denen die Oberflächenstruktur und Form der un-

korrodierten, „frischen“ Magnetitkörner gut zu erkennen ist. Besonders deutlich ist die Oberflächentopographie der Magnetitoberfläche auf dem Sekundärelektronenbild, Bild 3, sichtbar. Die Magnetit-Körner besitzen kantige Forme, ihre Oberflächen erscheinen teilweise glatt, teilweise jedoch auch stufig rau.

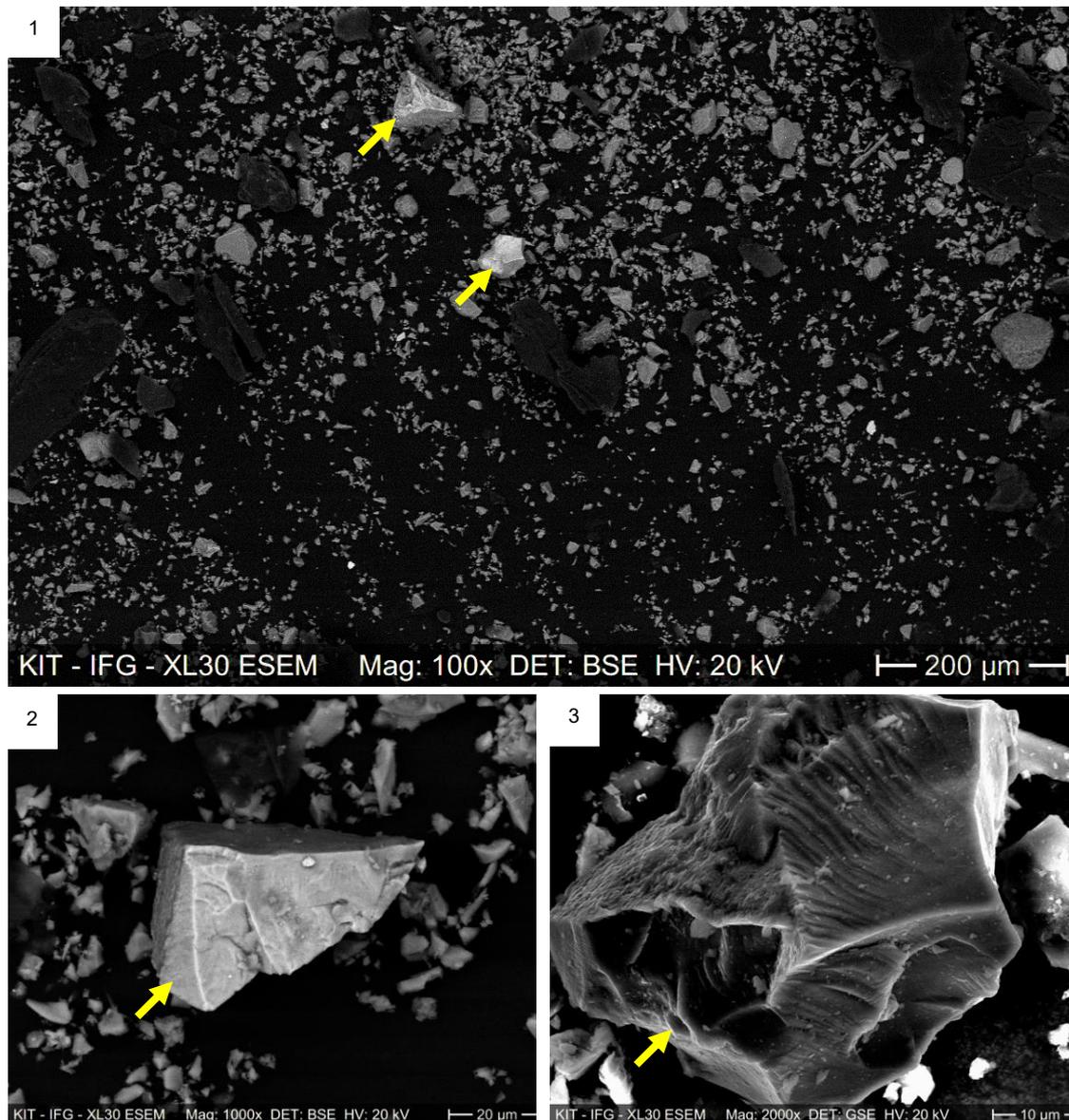


Abbildung 6-324: ESEM-Bilder des unreaktierten Pulvers des Versfüllbaustoffs, P1. Magnetitkörner sind mit Pfeilen markiert. 1: 100fach vergrößertes Rückstreuelektronenbild, 2: 1000fach vergrößertes Rückstreuelektronenbild, 2000fach vergrößertes Sekundärelektronenbild

In den Abbildung 6-325 und Abbildung 6-326 sind Rückstreuelektronenbilder von Magnetit-Körnern bei 1000facher Vergrößerung zu sehen. Abbildung 6-325 zeigt A2 und P2, Abbildung 6-326

Verfüllbaustoff A1 und P1. Oben sind jeweils die unreaktierten Ausgangsmaterialien der Verfüllbaustoffe gezeigt, unten die drei Jahre alten verfestigten Materialien.

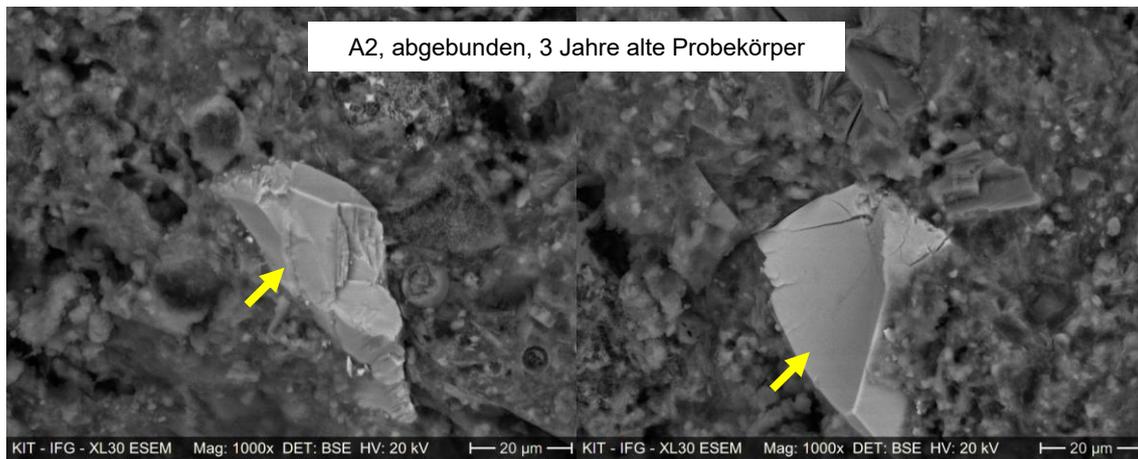
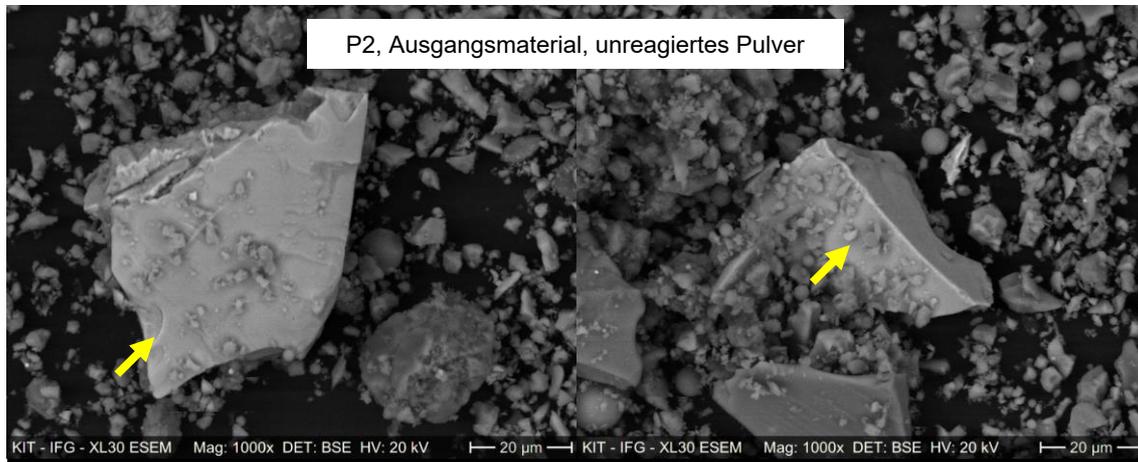


Abbildung 6-325: Rückstreuerelektronenbilder: Verfüllbaustoff als Ausgangsprodukt P2 und erhärtetes Material A2, 1000fach vergrößert. Magnetitkörner sind mit Pfeilen markiert. Oben: unreaktiertes Pulver, unten: abgebunden, 3 Jahre alter Probekörper

Beim Vergleich von Form und Oberflächentopographie von aus unreaktiertem und aus abgebundenem Material stammendem Magnetit sind keine grundsätzlichen Unterschiede zu erkennen. Kantige Kornformen sowie glatte bis stufig raue Oberflächen sind genauso bei Körnern zu finden, die drei Jahre lang mit zementärem Bindemittel in Kontakt standen wie bei Magnetitkörnern aus dem unreaktierten Ausgangspulver. Es sind keine deutlich ausgeprägten Veränderungen an Magnetitkörnern zu erkennen, welche auf ausgeprägte Lösungsvorgänge oder starke Umwandlungen des Magnetits z. B. zu Hämatit, hinweisen.

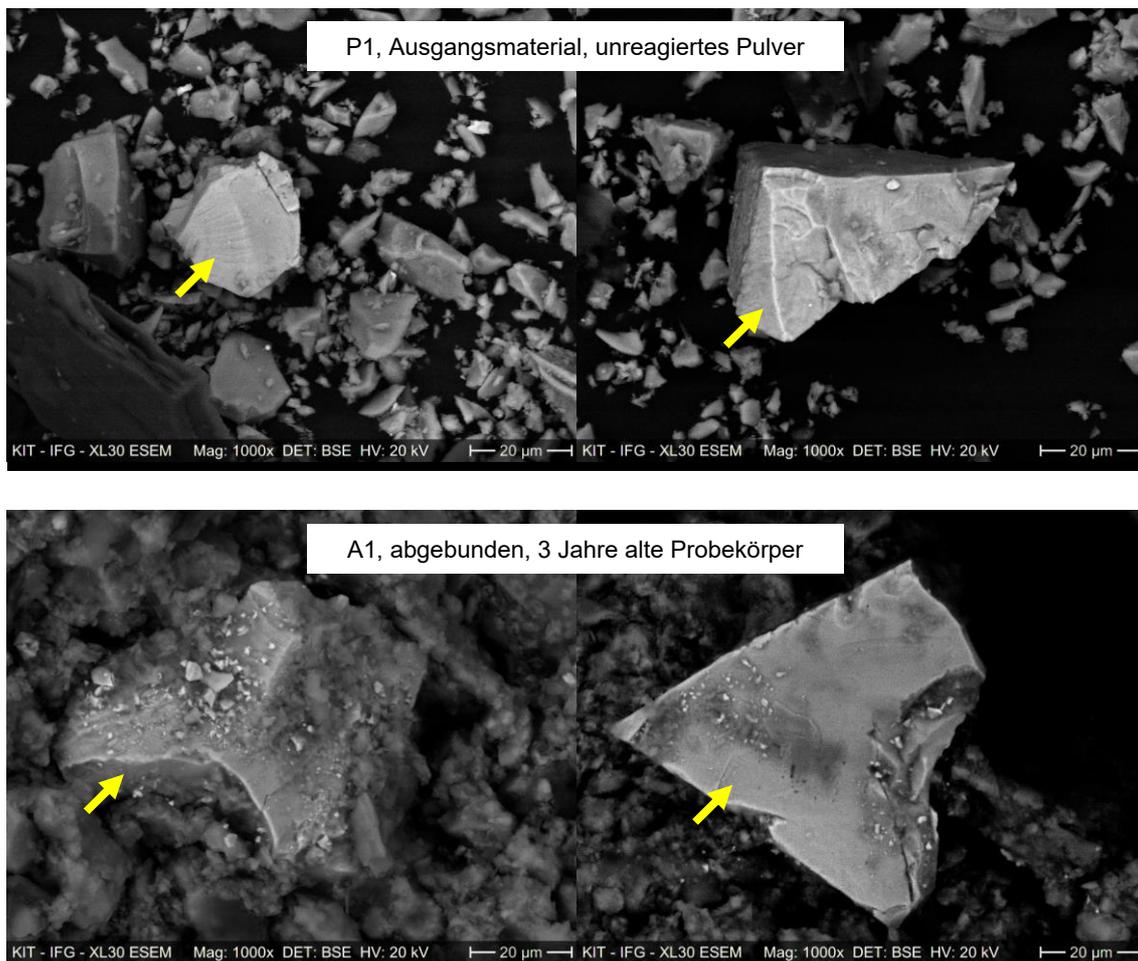


Abbildung 6-326: Rückstreuelektronenbilder: Versfüllbaustoff als Ausgangsprodukt P1 und erhärtetes Material A1, 1000fach vergrößert. Magnetitkörner sind mit Pfeilen markiert. Oben: unreaktiertes Pulver, unten: abgebunden, 3 Jahre alter Probekörper

Die ESEM-Untersuchungen lassen auch nach drei Jahren Wechselwirkung mit der alkalischen Porenlösung des Versfüllbaustoffs keine auffälligen Korrosions- bzw. Alterationserscheinungen am Magnetit erkennen. Dies deutet auf eine in der Praxis zu erwartende relativ hohe Stabilität des Magnetits und damit der zu messenden magnetischen Suszeptibilität auch Jahre nach Einbau der EWS hin.

An den hier untersuchten Proben maß der Projektpartner EIFER direkt nach der Probenherstellung sowie nach drei Jahren Lagerung die magnetischen Suszeptibilität. In Bestätigung des mittels ESEM ermittelten Befunds wurden keine signifikanten Unterschiede der Messwerte festgestellt.

6.8.5.4. Fazit zu Korrosion von Magnetit im Milieu zementgebundener Versfüllbaustoffe

- Eine Literaturrecherche ergab Hinweise darauf, dass kaum ein starkes in Lösung gehen von Magnetit in mäßig alkalischem Milieu zu erwarten ist.

- Bei Batch- und Einlagerungsversuchen konnte nach zwei Monaten keine signifikante Änderung in der magnetischen Suszeptibilität von magnetitdotierten Verfüllbaustoffen gemessen werden, was auf eine Stabilität des Magnetits während der Versuchslaufzeit schließen lässt.
- Beim Vergleich von Magnetit aus unreaktiertem Verfüllbaustoff mit solchem, der über 3 Jahre mit hydratisiertem Verfüllbaustoff in Wechselwirkung stand, zeigten sich mittels ESEM keine signifikanten Korrosionserscheinungen des Magnetits.

6.9. Einfluss der Mischgeschwindigkeit auf die Eigenschaften der Verfüllbaustoffe

Die Eigenschaften der Suspension sowie des erhärteten Verfüllbaustoffs wird unter anderem auch von den Anmischbedingungen beeinflusst. Um die bestmöglichen Eigenschaften während der Verfüllung sowie im erhärtenden Zustand zu erzielen, muss der Verfüllbaustoff vollständig aufgeschlossen sein. Hierbei sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen:

- Größe und Form des Anmischgefäßes muss zum verwendeten Rührwerkzeug passen
- Rührwerkzeug muss zum verwendete Verfüllbaustoff passen
- Menge die angemischt wird, muss an das verwendete Rührwerkzeug und Anmischgefäß angepasst werden
- Rührzeit
- Rührgeschwindigkeit

Wie bereits in Kapitel 6.2 aufgezeigt wurde, hat die Anmischgeschwindigkeit bei der Probenherstellung einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Diese ist bei den Versuchen mit 2000 U/min um ca. 0,1 W/mK höher als die bei 650 U/min.

Auch bei der Betrachtung der Porenöffnungsweite ist ein deutlicher Trend zu erkennen. In Abbildung 6-327 ist die Porenöffnungsverteilung der Initial- und Blindproben der Verfüllbaustoffe 07d und 13+d bei 650 U/min sowie bei 2000 U/min dargestellt. Es zeigt sich für beide Baustoffe, dass die Porenöffnungsweite bei höherer Anmischgeschwindigkeit kleiner ist als bei niedriger Anmischgeschwindigkeit. Dies bedeutet, dass der Baustoff bei 2000 U/min besser aufgeschlossen war und somit ein homogenerer Hydratationsprozess stattgefunden hat. Dies führte letztendlich zu kleineren Poren im ausgehärteten Zustand. Diese kleineren Poren begünstigen sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die Sulfatbeständigkeit der Verfüllbaustoffe.

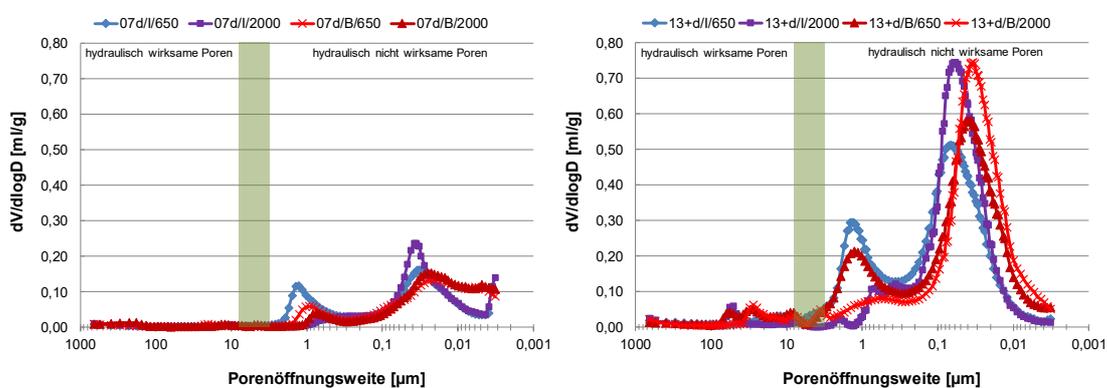


Abbildung 6-327: Porenöffnungsverteilung bei unterschiedlichen Anmischgeschwindigkeiten für den Baustoff 07d und 13+d

7. MECHANISMEN DER FEHLSTELLENBILDUNG (SOLITES)

In diesem Arbeitspaket sollte überprüft und bewertet werden, wie sich das Vorliegen eines gespannten Grundwasserleiters (GWL) bei verschiedenen Randbedingungen auf die Qualität der Hinterfüllung einer Erdwärmesonde (EWS) auswirkt. Dabei sollte auch diskutiert werden, welche Punkte der LQS EWS im Rahmen einer möglichen Fortschreibung der LQS weiter zu betrachten sind. Gewonnene Hinweise oder Empfehlungen zur Verfülltechnik bei Vorliegen von Grundwasserströmungen werden ebenso weitergegeben.

7.1. Problemstellung

Erdwärmesondenbohrungen, die Grundwasserstockwerke mit unterschiedlichen Druckpotentialen verbinden, müssen dauerhaft abgedichtet werden. Andernfalls kann durch Wasserwegsamkeiten im Erdwärmesondenbohrloch eine Wasserströmung zwischen den betroffenen Grundwasserleitern entstehen, deren Folge letztendlich Hebungs- oder Setzungsprozesse und damit möglicherweise verbundene Gebäudeschäden sein können (Abbildung 7-1). Diese Wirkmuster wurden an Hand der in Baden-Württemberg in den letzten Jahren aufgetretenen Schadensfälle in Verbindung mit der Erstellung von Erdwärmesonden (z.B. Staufen, Wurmlingen, Böblingen, Rundersberg, Schorndorf, etc.) leidvoll deutlich (Grimm, Stober, Kohl, & Blum, 2014). Die Beschränkung von Erdwärmesondenbohrungen auf den oberen Grundwasserleiter, die die beschriebenen Probleme vermeiden könnte, würde die Bohrtiefe und damit die Nutzung von Erdwärmesonden sehr stark einschränken, insbesondere in Gebieten, in denen sich viele potentielle Nutzer der oberflächennahen Geothermie befinden, wie zum Beispiel in Ballungsgebieten.

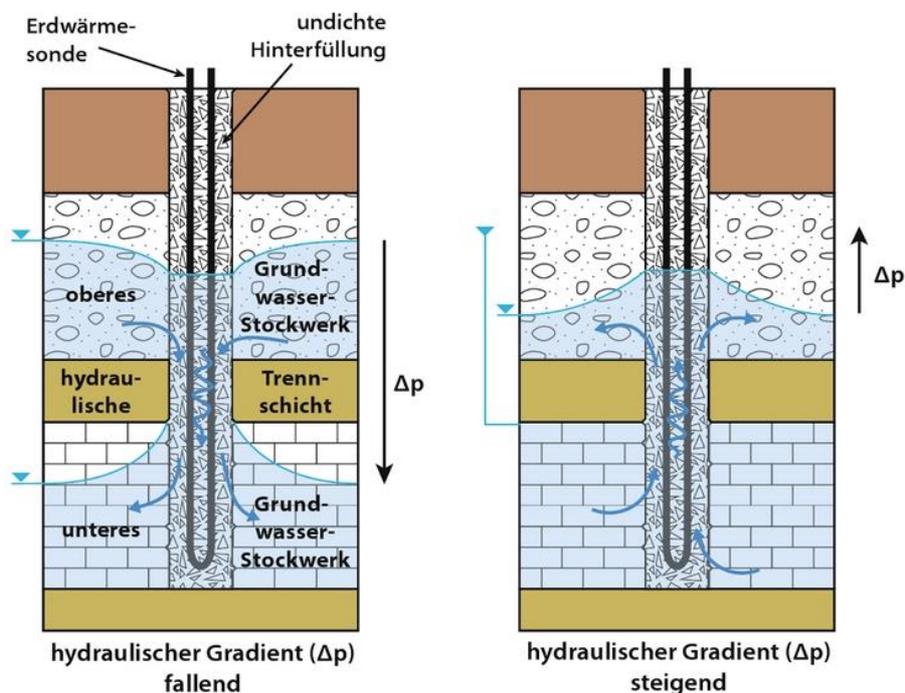


Abbildung 7-1: Schemaskizze von möglichen Grundwasserbewegungen bei stockwerksübergreifenden Bohrungen (Wolff, 2004)

7.2. Stand zum Vorgehen beim Verfüllen von stockwerksübergreifenden Bohrungen

In den Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg (LQS EWS) werden Richtlinien zum Verhalten beim Antreffen von gespannten Grundwasserverhältnissen während des Bohrens und bei der Verfüllung dieser Bohrungen gegeben.

Eine gute Übersicht zur Anwendung der LQS bietet der in der Fachzeitschrift bbr erschienene Artikel: „Herausforderungen im kritischen Stockwerksbau in Baden- Württemberg: Lösungen und Hintergründe“ (Burkhardt, 2014). Unter anderem in der LQS EWS enthalten ist die in Abbildung 7-2 dargestellte Entscheidungsmatrix zur Beurteilung des vorliegenden Stockwerksbaus. Diese bezieht sich auf das Vorhandensein von ins Bohrloch einströmendem Grundwasser und ermöglicht eine Beurteilung der anliegenden Potenziale in Form einer Bewertungszahl. Je nach Bedingung wird die vorliegende Situation als nicht kritisch oder kritisch eingestuft und entsprechend angepasste Arbeitsanweisungen gegeben.

Diejenigen, welche nach dieser Leitlinie handeln müssen, sind die ausführenden Bohrunternehmen. Daher wurden verschiedene Bohrunternehmen im Rahmen einer Umfrage eines Workshops und nach ihrer Erfahrung im Umgang mit dieser Leitlinie befragt, um ihr Wissen und ihre Erfahrungen in das Forschungsprojekt einzubinden.

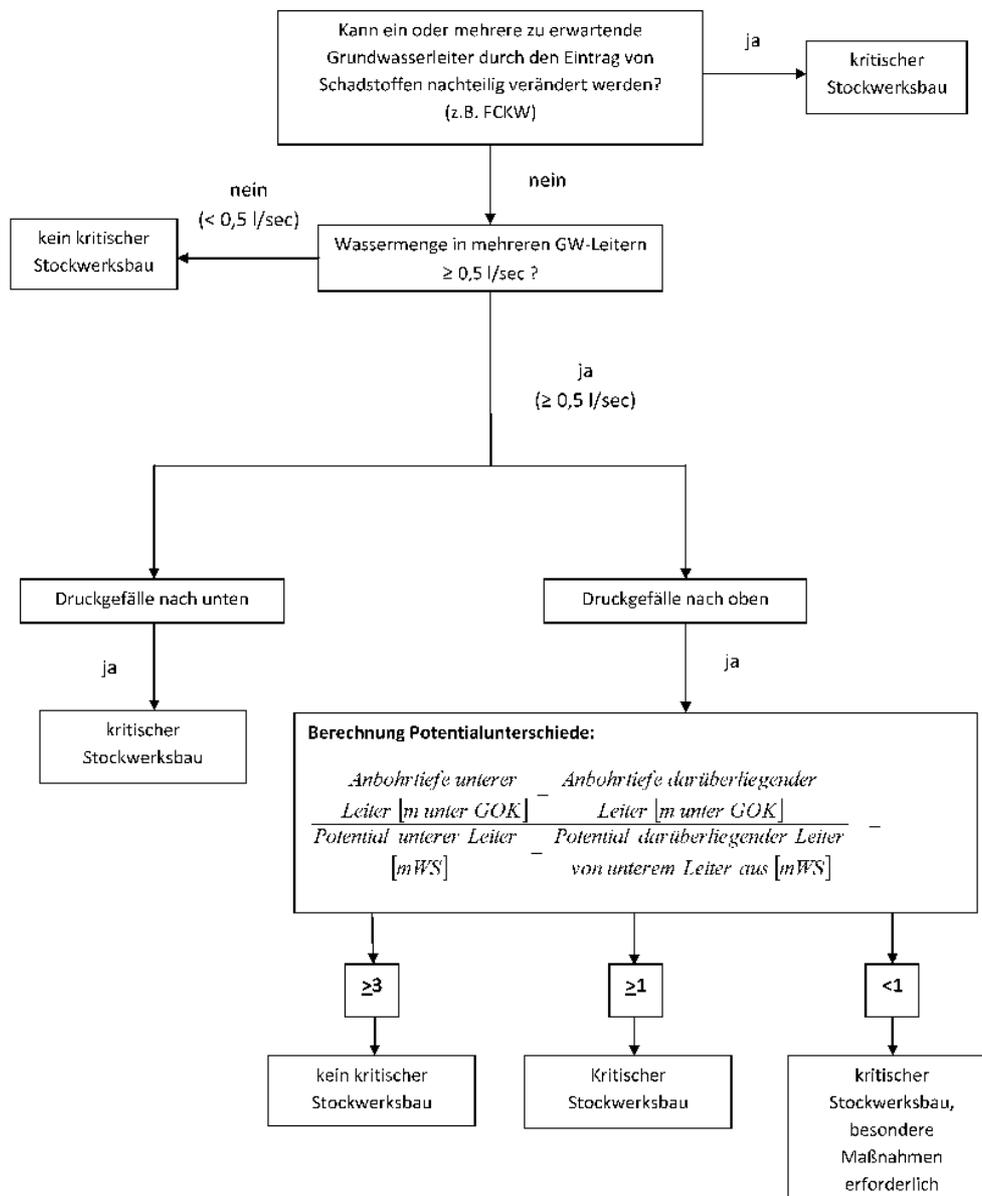


Abbildung 7-2: Matrix kritischer Stockwerksbau (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg, [06/19])

7.2.1. Umfrage bei Bohrunternehmern

Der praktische Ansatz zur Erkennung, Lokalisierung und Abdichtung von Grundwasserzuströmen und vertikalen Grundwasserbewegungen ist in der Literatur nicht gut dokumentiert. Die Methoden zur Erkennung und Abdichtung von Grundwasserströmungen hängen von den örtlichen Gegebenheiten und dem ausführenden Bohrunternehmen ab. Deshalb wurde eine Umfrage bei 21 Geothermie- und Quellbohrfirmen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz durchgeführt. Drei der befragten Bohrfirmen haben geantwortet. Die Fragen und zugehörigen Antworten

sind in Anhang 10.8 in anonymisierter Form einsehbar. Zusätzlich wurden einige der angeschriebenen Bohrunternehmen persönlich befragt. Dabei konnten Informationen zum Umgang der Praxis mit den folgenden Themen gewonnen werden:

- Erfassung und Lokalisierung von Grundwasserspiegel, Druckpotential und Strömungsgeschwindigkeit
- Methoden zur Abdichtung des vertikalen Grundwasserstroms
 - Einzelner, artesischer Grundwasserleiter
 - Zwei oder mehr verbundene Grundwasserleiter mit ab- oder aufsteigendem Potenzial

Fallstudien für vertikalen Grundwasserfluss

7.2.2. Bohrunternehmerworkshop

Im Nachgang zur Bohrunternehmerbefragung wurde ein Workshop veranstaltet. Das Protokoll der Veranstaltung ist in Anhang 10.9 aufgeführt. Als Ergebnis des Bohrunternehmerworkshops vom 17.11.2016 „Verfüllung von stockwerksübergreifenden EWS-Bohrungen“ in Stuttgart konnte festgehalten werden, dass erstens in Bezug auf die Bestimmung von GW-Volumenströmen folgende Problemstellungen bestehen:

- Die Randbedingungen der Volumenstrommessungen sind nicht definiert (z.B. hinsichtlich Wasserstand im Bohrloch).
- Die exakte Bestimmung des Volumenstroms des in das Bohrloch einströmenden Grundwassers ist mit den derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln technisch als auch finanziell kaum möglich
- Ein Ausblasversuch (nicht definiert) kann lediglich grobe Anhaltswerte liefern.

Zweitens bestehen Schwierigkeiten beim Bestimmen der im Untergrund vorherrschenden Druckpotentiale:

- Beim Anbohren eines zweiten GWLs kann eine exakte Bestimmung des Druckpotentials nur dann stattfinden, wenn der obere GWL mit Hilfe eines Packers oder der Hilfsverrohrung vom unteren GWL hydraulisch entkoppelt ist.

Zudem ist die Bewertungsgröße wenig aussagekräftig und sollte beispielsweise in Form einer erforderlichen Suspensionsdichte angegeben werden.

Als **Fazit des Bohrunternehmerworkshops** kann festgehalten werden, dass eine Konkretisierung von Angaben zum Vorgehen in den LQS EWS im Rahmen einer möglichen Fortschreibung der LQS wünschenswert sind (zum Beispiel unter LQS EWS Kapitel 3.4.1: Was ist eine größere Potentialdifferenz?). Infolge dessen wird ein standardisierter Vorgang, der die Praktikabilität in den Vordergrund stellt, gewünscht.

7.3. Entwicklung des Versuchsaufbaus zur Nachbildung eines aufsteigenden Grundwasserpotentials

7.3.1. Vorgehen und Versuchsrandbedingungen

7.3.1.1. Ermittlung von realistischen Versuchsrandbedingungen

Die Grundlage der Auswahl der Versuchsbedingungen (Druckpotentiale der verbundenen Grundwasserleiter, resultierende Strömungsgeschwindigkeiten im Bohrloch) bildet eine Literaturrecherche und die Ergebnisse der oben beschriebenen Umfrage unter in BW tätigen Bohrunternehmen. Bei der Literaturrecherche wurden insbesondere die bei den in Baden-Württemberg aufgetretenen Erdwärmesonden-Schadensfällen vorliegenden hydraulischen Bedingungen berücksichtigt. Weiterhin wurden die Angaben in den „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ des Landes Baden-Württemberg zum kritischen Stockwerksbau überprüft und in die Überlegungen zur Festlegung der Versuchsbedingungen einbezogen.

7.3.1.2. Literaturrecherche

Die hydrogeologischen Bedingungen in Baden-Württemberg sind in Kapitel 0 beschrieben. Auf Grundlage dieser Literaturrecherche werden nachstehend die hydraulischen Eckdaten in Tabelle 7-1 zusammengefasst. Im Anhang 10.10 befindet sich eine ausführlichere Übersicht der Schadensfälle.

Tabelle 7-1: Schadensfälle in Baden-Württemberg in Zusammenhang mit Erdwärmesondenbohrungen mit bekannten hydraulischen Eckdaten

Schadensfall	Art der GW-Bewegung	Schüttung [l/s]	Druckpotentialdifferenz [bar]
Tett nang	Arteser	5	1,5
Staufen	gespannt		14,5
Ravensburg	Arteser	10	0,5
Schorndorf, Leonberg, Renningen	Grundwasserabfluss		1 - 1,6
Vorbergzone im Schwarzwald	Arteser	1-2	0,5 - 0,6

Bereitstellung des Druckpotentials

Für die technische Umsetzung der unterschiedlichen Rahmenbedingungen müssen die hydrogeologischen Verhältnisse nachgebildet und kontrolliert werden. Dazu gehören:

- Simulation des Bohrlochs
- Erforderliche und mögliche Grundwasserflussraten
- Grundwasserversorgung des simulierten Bohrlochs und Realisierung konstanter Bedingungen während des Tests
- Simulation von Grundwasser-Zufluss/ -Abfluss

- Regelung und Messung des hydraulischen Drucks und des Volumenstroms.

Erste Überlegungen zur Realisierung einer vertikalen Grundwasserströmung wurden von Riegger (2015) angestellt. Nach Riegger (2015) kann der erforderliche hydraulische Druck durch eine Konfiguration mittels eines exponierten Wasserreservoirs erzeugt werden. Dies ermöglicht eine unabhängige Steuerung von Druck und Volumenstrom.

7.3.2. Skalierung der Druckverhältnisse des Versuchsaufbaus

Als Grundlage der Skalierung des Versuchsaufbaus dient die Vorgabe der vom Land Baden-Württemberg veröffentlichten Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS) (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2015), die in Bezug auf das Abdichten mehrerer Grundwasserstockwerke eine stockwerksbezogene Abdichtung vorschreibt. Für die versuchstechnische Nachbildung eines aufsteigenden Grundwasserleiters wird nur der untere Grundwasserleiter betrachtet und es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass das Grundwasser im Bohrloch von unten nach oben strömt und drucklos in einen oberen ungesättigten Aquifer eindringt. Diese Herangehensweise beschreibt ein Worst-Case Szenario, da mögliches Grundwasser im oberen Aquifer einen zusätzlichen hydraulischen Druck auf den unteren Grundwasserleiter aufbringen und den Verfüllvorgang somit begünstigen würde. Der Versuchsaufbau kommt somit einem artesischen Auslauf gleich. Die Skalierung zwischen reeller Bohrungen und dem Technikumsmaßstab erfolgte unter Beibehaltung der Größen- und Druckverhältnisse (siehe Abbildung 7-3), während die Grundwasservolumenströme ohne Umrechnung von der realen Bohrung auf den Versuchsaufbau übertragen werden können.

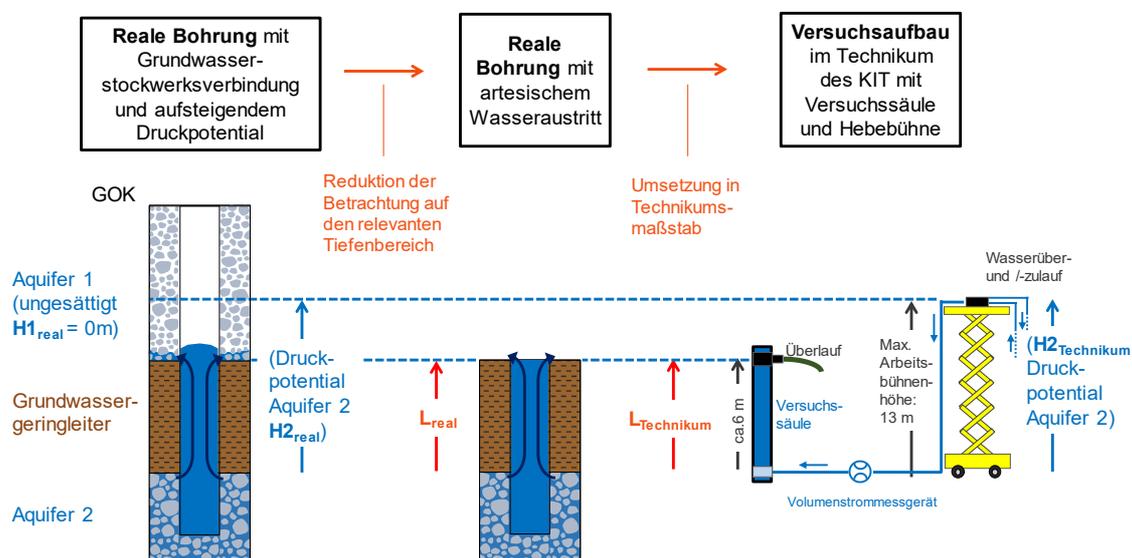


Abbildung 7-3: Skalierung realer Druckbedingungen in den Technikumsmaßstab

Der entwickelte Versuchsaufbau und das Vorgehen zur Festlegung der Versuchsrandbedingungen durch Skalierung der Druckverhältnisse realer Bohrungen wurden am 17.11.2016 in einem Workshop mit in Baden-Württemberg tätigen Bohrunternehmen vorgestellt und diskutiert. Hinsichtlich des Versuchsaufbaus, der gewählten Versuchsrandbedingungen (Grundwasser- und

Verfüllvolumenströme) und der Skalierung realer Druckverhältnisse in den Versuchsmaßstab gab es von Seiten der Bohrunternehmen keine Einwände.

7.3.3. Vorbetrachtungen

7.3.3.1. Anmischversuche

Im vorangegangenen Forschungsvorhaben EWS-tech (Riegger & Rolker, EWS- Tech, 2016) wurde festgestellt, dass die Anmischtechnik von zentraler Bedeutung für das Erreichen der gewünschten Eigenschaften der Verfüllsuspensionen ist. Daher fanden zunächst in Kooperation aller Projektpartner Anmischversuche zur Festlegung eines einheitlich gemeinsamen Vorgehens zur Anmischung der Verfüllsuspensionen statt. Ziel war es, die Anmischbedingungen mit verschiedenen Mixern so festzulegen, dass die mit verschiedenen Mixern hergestellten Suspensionen jeweils die größtmöglich ähnlichen Eigenschaften aufweisen. Für Untersuchungen im Labormaßstab wird zur Herstellung der Baustoffsuspensionen ein Labormischer verwendet, während bei Großversuchen (Technikumsversuche, Realmaßstabsversuche, Bohrlochsimulatorversuche, Versuche im automatischen Abdichtungskontrollprüfstand) ein handelsüblicher Kolloidalmischer verwendet wird. Zur Festlegung der Anmischbedingungen wurden dieselben Baustoffe jeweils mit verschiedenen Anmischmengen und Anmischzeiten des Kolloidalmischers und mit verschiedenen Umdrehungszahlen, Anmischzeiten und Dissolverpositionen des Labormischers hergestellt. Anschließend wurden für jede erzeugte Suspension die folgenden Parameter bestimmt:

- Dichte (Dichtewaage und Aerometer)
- Marshzeit / Restauslaufzeit
- Filterpressenversuch (Filterpressenversuchszeit und Filtratwassermenge)
- Capillary Suction Timer
- Kugelharfenversuch
- Absetzmaß
- Viskosimeter (für Proben aus dem Kolloidalmischer)

Die größte Ähnlichkeit der erreichten Eigenschaften der Suspension wurde bei den in Tabelle 7-2 dargestellten Konfigurationen der Anmischungbedingungen gefunden. Mit diesen Einstellungen wurden während der gesamten Projektlaufzeit im Projekt EWS- tech II alle verwendeten Baustoffe angemischt.

Tabelle 7-2: ermittelte Anmischparameter für größtmögliche Ähnlichkeit der Baustoffeigenschaften

Parameter	Labormischer	Kolloidalmischer
Dissolverposition	mittig, 1 cm über Boden	mittig (bauartbedingt)
Anmischvolumen	2,5 l	150 l
Befüllzeit des Mixers	Max 10 s	130 s
Dissolvergeschwindigkeit	2000 U/min	1500 U/min
Nachmischzeit	5 min	30 s

7.3.3.2. Einfluss der Temperatur auf das Absetzverhalten

Das Absetzmaß hat sich als zentraler Parameter für die Verfüllqualität herausgestellt: Je geringer dieses ist, desto besser ist die Verfüllqualität (Riegger et al., 2016).

Das Absetzverhalten von Verfüllsuspensionen ist stark temperaturabhängig (Riegger et al., 2016). In Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und der Temperatur des Anmischwassers kann es unter Umständen zu deutlichen Temperaturunterschieden zwischen der Verfüllsuspension und dem Untergrund kommen. Da nicht bekannt war, wie schnell sich die Temperatur der Verfüllsuspension im Bohrloch der Untergrundtemperatur anpasst, wurde mit Hilfe einer Simulationsstudie mit dem Finite-Element-Programm FEFLOW dies für einen vereinfachten Fall untersucht.

7.3.3.2.1. Modellaufbau

In Abbildung 7-5 ist links eine 3D-Ansicht des Modells dargestellt. Die vertikale Ausdehnung in Z-Richtung beträgt 100 m. Die mittlere Abbildung zeigt die Aufsicht der obersten Ebene des Modells. Die horizontale Ausdehnung des Modellzylinders beträgt 20 m. Die Erdwärmesondenbohrung mit einem Durchmesser von ca. 15 cm (rechte Abbildung) befindet sich im Modellzentrum und hat eine vertikale Ausdehnung von 80 m. Die Dimensionen wurden so gewählt, dass mögliche Einflüsse von Randeffekten minimiert sind und daher vernachlässigt werden können. Um eine möglichst detaillierte Temperaturentwicklung im Bereich des Bohrlochs abbilden zu können, wurde das Berechnungsnetz vom Modellrand hin zum Bohrloch kontinuierlich verfeinert. Die auf dem rechten Bild angedeuteten Erdwärmesondenrohre wurden in dem Modell nicht gesondert parametrisiert, sodass die physikalischen Eigenschaften im gesamten Bohrloch identisch sind. Für die Analyse der Temperaturentwicklung wurden drei Beobachtungspunkte innerhalb des Bohrlochs festgelegt. Ein Beobachtungspunkt im Bohrlochzentrum, ein Beobachtungspunkt direkt an der Bohrlochwand und ein Beobachtungspunkt genau dazwischen (siehe Abbildung 7-4 rechts). Das Modell besteht aus 100 Ebenen (mit einer Höhe von jeweils 1 m), wobei die Beobachtungspunkte nur auf jeder zweiten Ebene im Tiefenbereich der Erdwärmesondenbohrung implementiert wurden. Insgesamt enthält das Modell somit 123 Beobachtungspunkte.

Als Temperaturrandbedingung wurde für alle Knotenpunkte der obersten Ebene (ausgenommen die Knotenpunkte des Bohrlochs), der untersten Ebene sowie an der Seite des Berechnungsmodells eine konstante Temperatur von 10 °C vorgegeben.

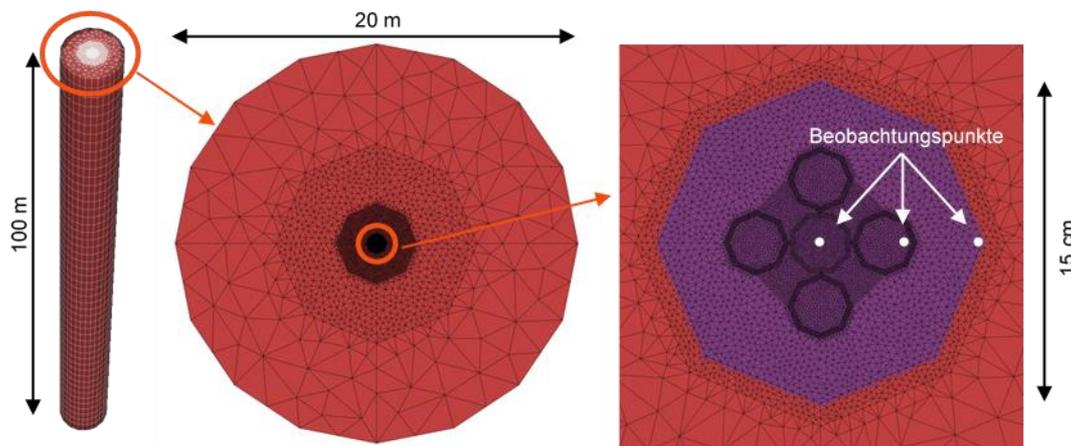


Abbildung 7-4: Darstellungen des Simulationsmodells. Links: 3D-Modell. Mitte: Aufsicht auf oberste Ebene. Rechts: Modellzentrum mit Erdwärmesondenbohrung

7.3.3.2.2. Untergrund- und Suspensionseigenschaften

Für die Diskretisierung der umgebenden Formation wurden aus der VDI 4640 Tabellenwerte entnommen. Für die Untersuchung wurde als Gesteinstyp ein Sandstein mit einer Wärmeleitfähigkeit von $2,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und einer volumenbezogenen spezifischen Wärmekapazität von $2,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ gewählt. Die Porosität des Sandsteins wurde mit $0,3$ angesetzt. In dem verwendeten Berechnungsprogramm FEFLOW wird die Wärmeleitfähigkeit sowie die Wärmekapazität als Summenparameter zwischen der Wärmeleitfähigkeit (bzw. Wärmekapazität) der fluiden Phase (Wasser) und der festen Phase (Gestein) in Abhängigkeit der Porosität berechnet. Mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,59 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und einer Wärmekapazität von $4,192 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ für $10 \text{ }^\circ\text{C}$ kaltes Wasser beträgt die effektive Wärmeleitfähigkeit somit $2,137 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und die effektive Wärmekapazität $2,797 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$. Als konstante Starttemperatur des Untergrunds wurden $10 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit der Suspension entspricht mit $2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ der eines üblichen Verfüllbaustoffs. Da keine Werte für die Wärmeleitfähigkeit der flüssigen Suspension vorliegen, wurde für die Untersuchung angenommen, dass die Wärmeleitfähigkeit der flüssigen Suspension der Wärmeleitfähigkeit des ausgehärteten Baustoffs entspricht. Gleiche Annahme gilt für die spezifische Wärmekapazität der Verfüllsuspension. Diese wurde nach Auskunft der Abteilung Produkttechnik der SCHWENK Spezialbaustoffe GmbH mit $1,164 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ angesetzt. Da sich die Untersuchungen auf die ersten Stunden nach dem Verfüllvorgang und somit auf den flüssigen Zustand der Suspension konzentrieren, wurde für die Porosität des Verfüllmaterials der Wert 0 angenommen. Insgesamt wurden vier Szenarien mit unterschiedlichen Anfangstemperaturen der Suspension gerechnet ($0 \text{ }^\circ\text{C}$, $5 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $30 \text{ }^\circ\text{C}$). Die Berechnung des $0 \text{ }^\circ\text{C}$ -Szenarios dient hier hauptsächlich als Abgleich mit dem $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -Szenario. Falls ein, um die $10 \text{ }^\circ\text{C}$ -Linie (globale Starttemperatur des Modells: $10 \text{ }^\circ\text{C}$) gespiegelter Verlauf festzustellen ist, könnte das $5 \text{ }^\circ\text{C}$ -Szenario durch Spiegelung auch gleichzeitig das $15 \text{ }^\circ\text{C}$ -Szenario abbilden.

Tabelle 7-3 zeigt eine Zusammenfassung der in das Berechnungsmodell eingeflossenen Daten.

Tabelle 7-3: Untergrund- und Suspensionsparameter

	Untergrund	Suspension
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	2,8 (effektiv: 2,137)	2,0
Spez. Vol. Wärmekapazität [MJ/(m ³ ·K)]	2,2 (effektiv: 2,797)	1,164
Porosität [-]	0,3	0
Temperatur [°C]	10	0, 5, 20, 30

7.3.3.2.3. Ergebnisse

Sämtliche Berechnungen wurden für einen Zeitraum von 15 Tagen simuliert. Wie Abbildung 7-5 exemplarisch für die Berechnung mit der Suspensionstemperatur von 5 °C zeigt, ist vor allem die Temperaturentwicklung der ersten Stunden nach Verfüllende entscheidend. Die Abbildung zeigt die mittlere Suspensionstemperatur im gesamten Bohrloch. Die Temperaturänderungen nach einem Tag sind nur noch marginal und darüber hinaus bildet das Modell den beginnenden Erstarungsprozess und die dabei freiwerdende Hydratationswärme nicht nach. Folglich werden bei der Ergebnisbetrachtung nur die ersten 10 Stunden detailliert betrachtet.

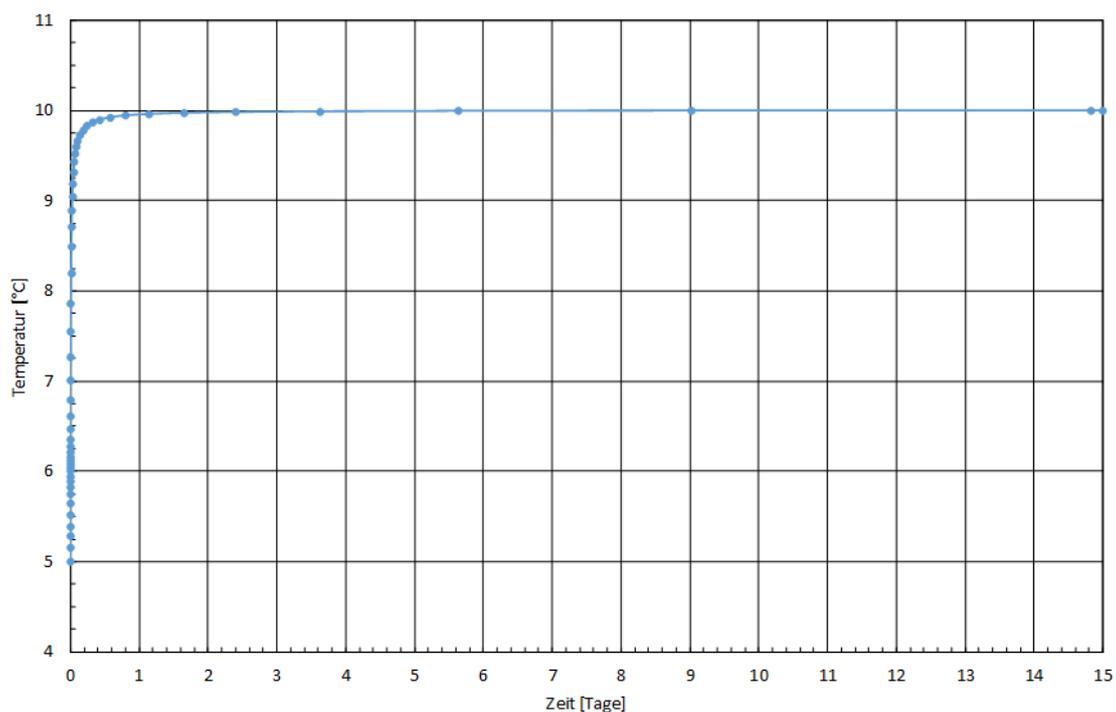


Abbildung 7-5: Entwicklung der mittleren Verfüllsuspensionstemperatur einer anfangs 5 °C kalten Suspension in einem 10 °C kalten Untergrund in den ersten 15 Tagen nach Verfüllende (FEFLOW-Simulationsergebnisse)

Suspensionstemperatur: 5 °C

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverläufe der ersten 10 Stunden für die Beobachtungspunkte im Bohrlochzentrum, für die Beobachtungspunkte zwischen Bohrlochzentrum und

Bohrlochwand, sowie die Beobachtungspunkte an der Bohrlochwand (Abbildung 7-6). Bis auf die Beobachtungspunkte der obersten zwei Ebenen sind hier alle weiteren 39 Beobachtungspunkte in der Abbildung grafisch dargestellt. Die Beobachtungspunkte der obersten zwei Ebenen (GOK und 2 m unter GOK) wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da der Einfluss der Temperaturrandbedingung auf der obersten Ebene den Temperaturverlauf stark beeinflusst. Auch in der Realität sind die obersten Bohrlochmeter stark von den Temperaturen an der Erdoberfläche abhängig und haben in Bezug auf die hydraulische Abdichtung einer Geothermiebohrung keinen erheblichen Einfluss. Es ist festzuhalten, dass sich der Temperaturverlauf unter den für die Simulationen geltenden Annahmen und Randbedingungen, unterhalb von 2 m, mit zunehmender Tiefe nicht ändert, weshalb für die Bewertung des zeitlichen und radialen Temperaturverlaufs eine stellvertretende Betrachtungsebene in 40 m Tiefe u. GOK gewählt wurde.

In Abbildung 7-6 ist der zeitliche Temperaturverlauf in der Tiefe von 40 m u. GOK für die drei Beobachtungspunkte (außen, mittig, zentral) dargestellt. Die durchschnittliche Suspensionstemperatur liegt nach ca. 30 Minuten bei 8,7 °C. Nach einer Stunde hat die Suspension eine Temperatur von ca. 9,25 °C. In der darauffolgenden Stunde nimmt die Temperatur dann nur noch um ca. 0,25 °C zu. Mit 9,9 °C liegt die mittlere Suspensionstemperatur nach 10 Stunden nur noch knapp unterhalb der Temperatur des Untergrunds. Abbildung 7-7 zeigt graphisch die Temperaturentwicklung für sechs unterschiedliche Zeiten innerhalb der ersten zwei Stunden in Form von Isolinien (Linien gleicher Temperatur).

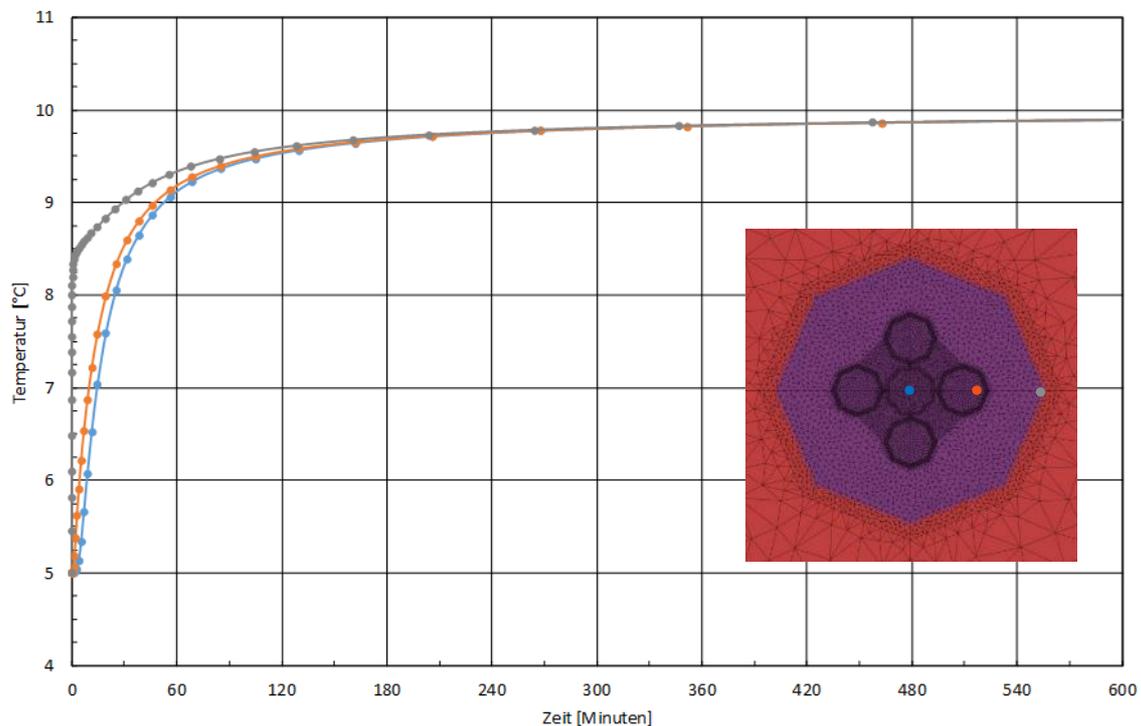


Abbildung 7-6: Zeitliche Temperaturentwicklung der ersten 10 Stunden nach Verfüllende in 40 m Tiefe an der Bohrlochwand (grau), im Bohrlochzentrum (blau) und zwischen Bohrlochwand und Bohrlochzentrum (orange) (FEFLOW-Simulationsergebnisse)

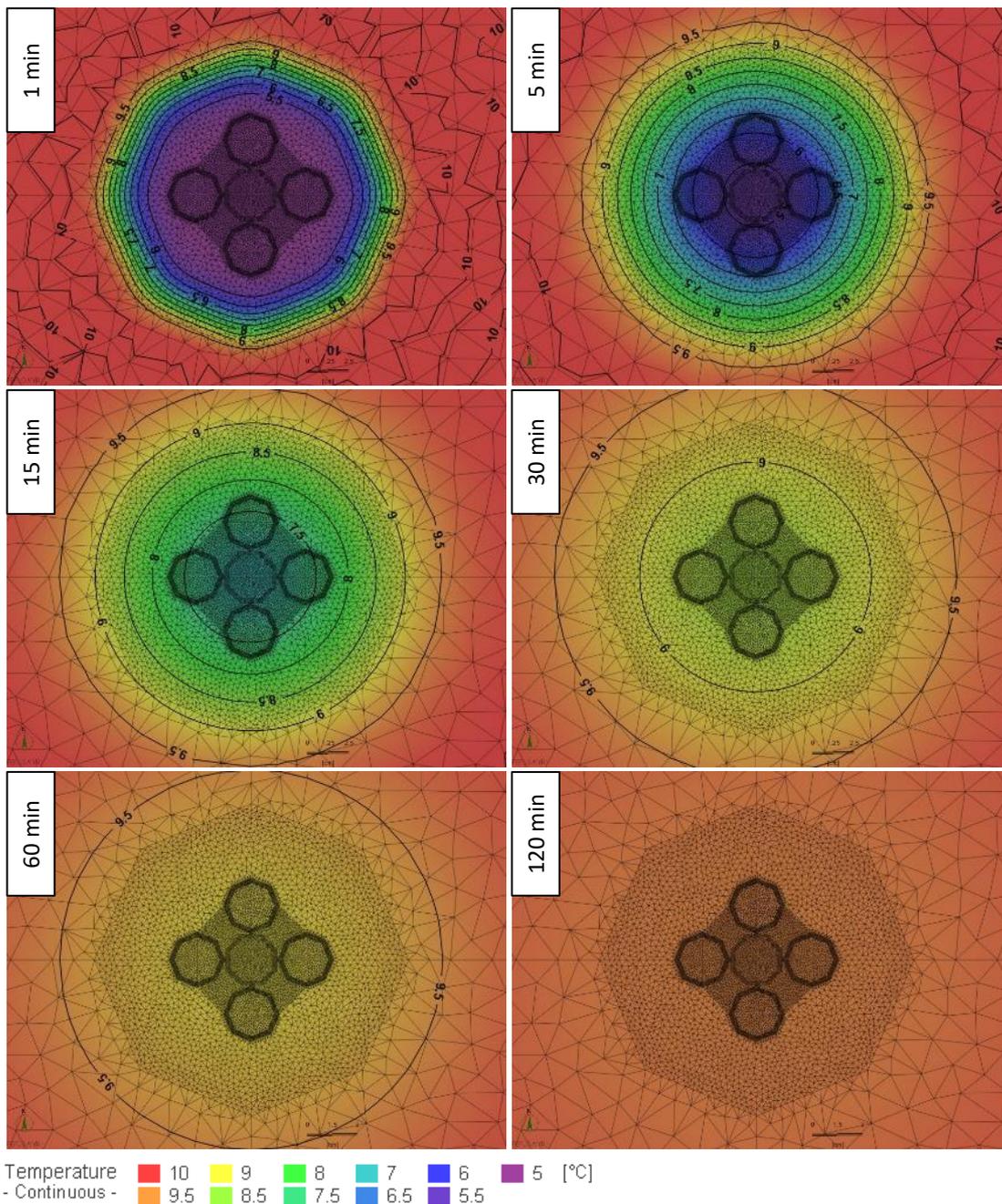


Abbildung 7-7: Temperaturisolinien in 40 m Tiefe für die ersten 2 Stunden nach Verfüllende (FEFLOW-Simulationsergebnisse)

Suspensionstemperatur: 20 °C

In Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 sind die zeitlichen Temperaturentwicklungen in 40 m Tiefe bzw. die mittlere Suspensionstemperatur im Bohrloch in den ersten 10 Stunden nach Verfüllende mit einer 20 °C warmen Suspension dargestellt.

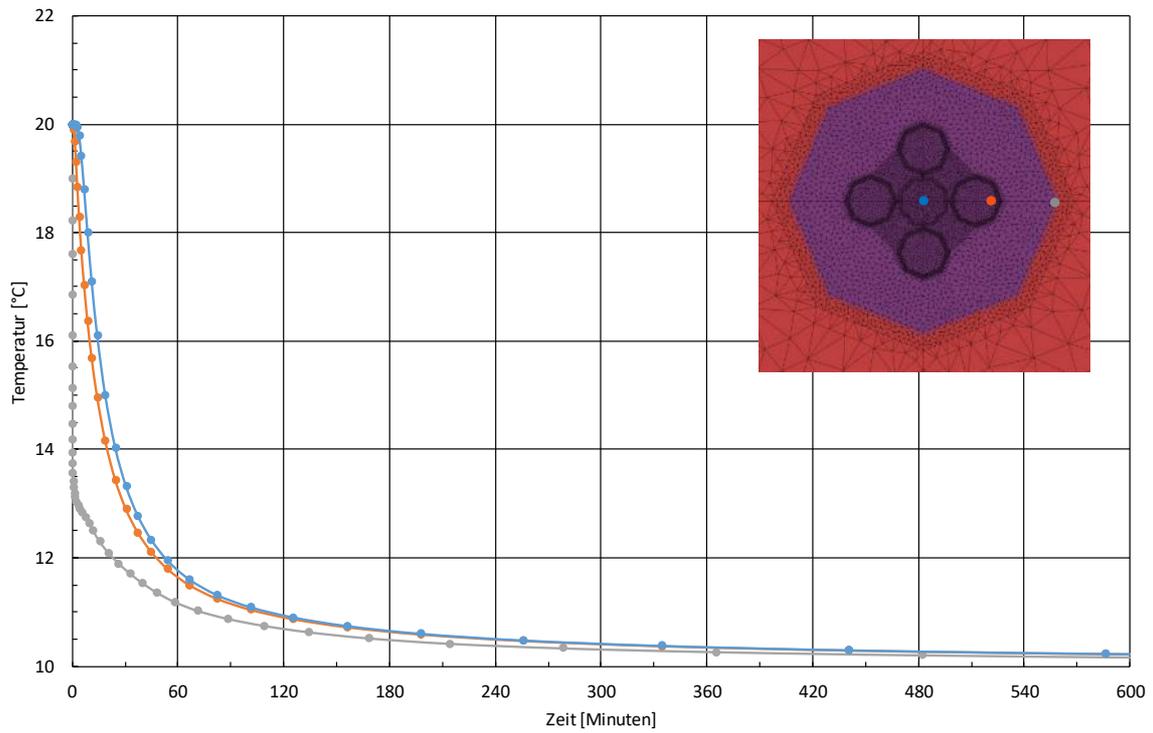


Abbildung 7-8: Zeitliche Temperaturentwicklung der ersten 10 Stunden nach Verfüllende in 40 m Tiefe an der Bohrlochwand (grau), im Bohrlochzentrum (blau) und zwischen Bohrlochwand und Bohrlochzentrum (orange) für eine ursprünglich 20 °C warme Verfüllsuspension (FEFLOW-Simulationsergebnisse)

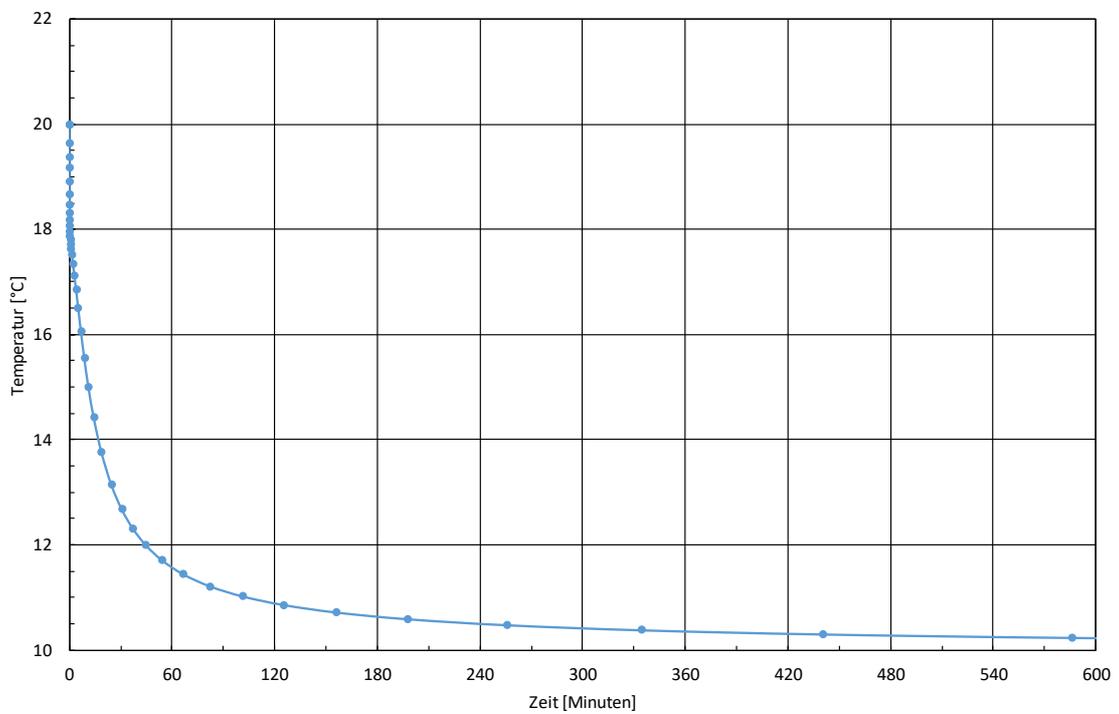


Abbildung 7-9: Mittlere Suspensionstemperatur im Bohrloch in den ersten 10 Stunden nach Verfüllende mit einer 20 °C warmen Verfüllsuspension (FEFLOW-Simulationsergebnisse)

Suspensionstemperatur: 30 °C

In Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 sind die zeitlichen Temperaturentwicklungen in 40 m Tiefe bzw. die mittlere Suspensionstemperatur im Bohrloch in den ersten 10 Stunden nach Verfüllende mit einer 30 °C warmen Suspension dargestellt.

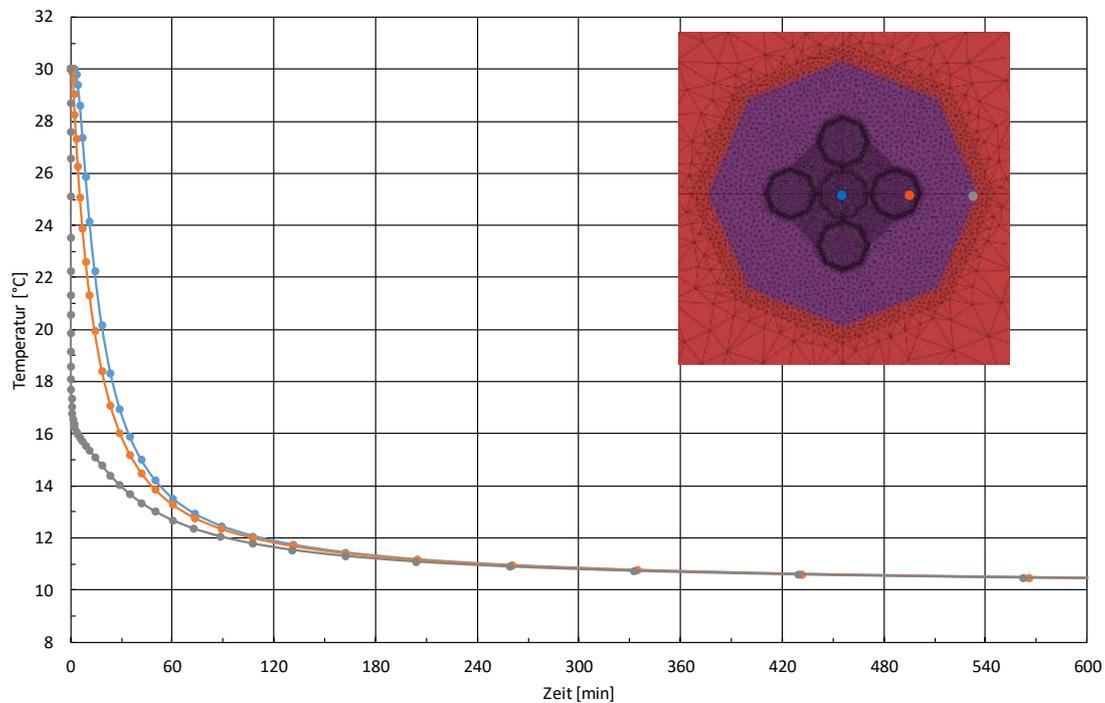


Abbildung 7-10: Zeitliche Temperaturentwicklung der ersten 10 Stunden nach Verfüllende in 40 m Tiefe an der Bohrlochwand (grau), im Bohrlochzentrum (blau) und zwischen Bohrlochwand und Bohrlochzentrum (orange) für eine ursprünglich 30 °C warme Verfüllsuspension (FEFLOW-Simulationsergebnisse)

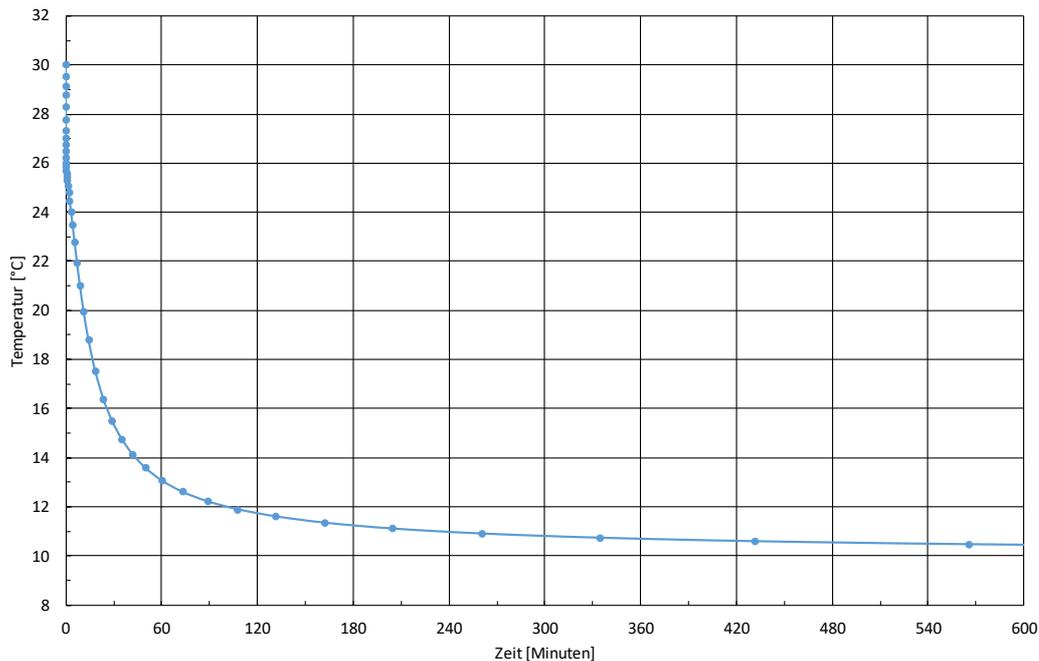


Abbildung 7-11: Mittlere Suspensionstemperatur im Bohrloch in den ersten 10 Stunden nach Verfüllende in 40 m Tiefe mit einer 30 °C warmen Verfüllsuspension (FEFLOW-Simulationsergebnisse)

Vergleich zwischen 0 °C und 20 °C

Um eine Aussage über den Temperaturverlauf einer 15 °C warmen Verfüllsuspension machen zu können, ohne entsprechende Berechnungen durchzuführen, wurde der Verlauf der 20 °C warmen Verfüllsuspension mit der 0 °C kalten Suspension verglichen. Hierfür wurde der Temperaturverlauf der 0 °C kalten Suspension an der 10 °C-Linie gespiegelt (siehe Abbildung 7-12) und mit dem Verlauf der 20 °C warmen Verfüllsuspension verglichen. Wie in Abbildung 7-12 zu erkennen, ist die Temperaturentwicklung identisch, sodass durch Spiegelung des Temperaturverlaufs der 5 °C kalten Suspension um die 10 °C-Linie eine Aussage über den Temperaturverlauf einer 15 °C warmen Verfüllsuspension möglich ist (siehe Abbildung 7-13).

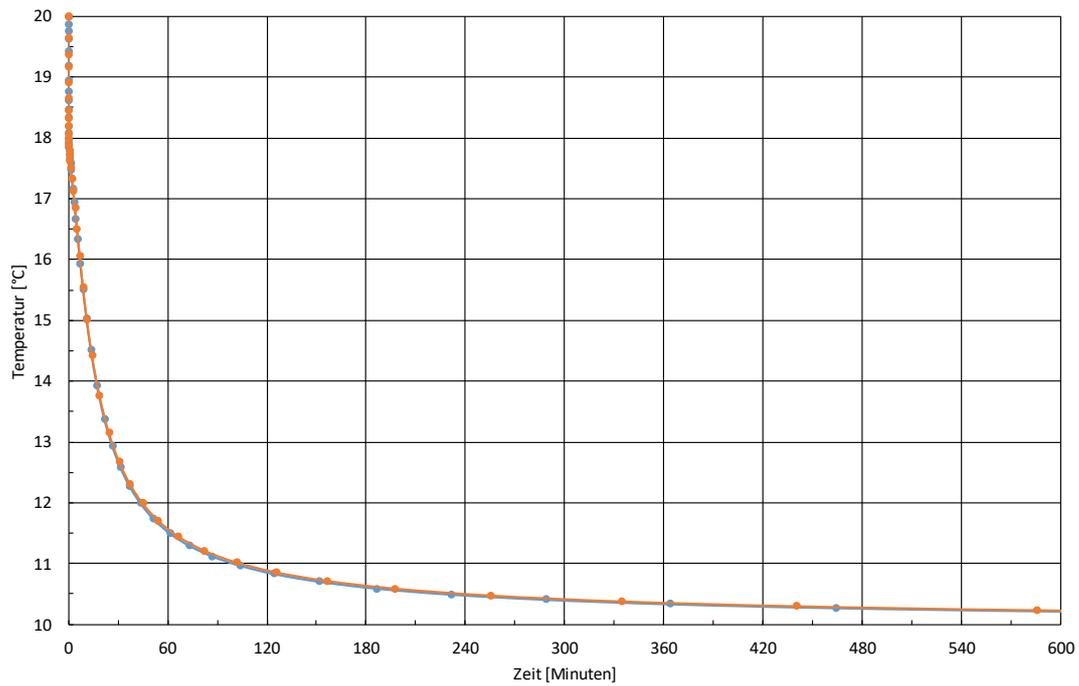


Abbildung 7-12: Vergleich der Temperaturverläufe der 20 °C warmen Verfüllsuspension (orange) mit dem gespiegelten Temperaturverlauf der 0 °C kalten Verfüllsuspension (blau)

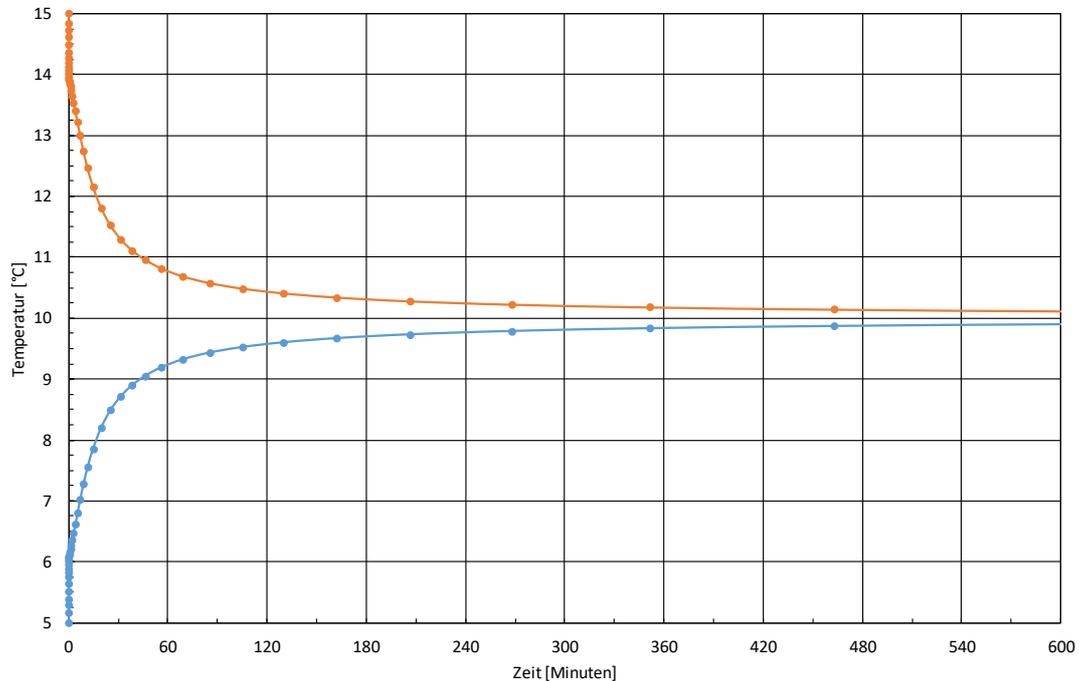


Abbildung 7-13: Zeitlicher Verlauf der gemittelten Temperatur einer 15 °C warmen Verfüllsuspension (orange) durch Spiegelung des Temperaturverlaufs der Suspension mit der Temperatur von anfangs 5 °C (blau)

7.3.3.2.4. Zusammenfassung

Die Simulationsstudie hatte zum Ziel, die Temperaturentwicklung von Verfüllsuspensionen mit unterschiedlichen Anfangstemperaturen zu bestimmen. Mit den in Kapitel 7.3.3.2.2 erläuterten Modellparametern konnte gezeigt werden, dass die größten Temperaturänderungen in den ersten Stunden nach dem Ende des Verfüllvorgangs zu verzeichnen sind. In Tabelle 7-4 sind für die vier simulierten Temperaturszenarien und das abgeleitete Szenario von 15 °C (kursiv) die mittlere Suspensionstemperatur sowie die Differenz der mittleren Suspensionstemperatur zur ungestörten Untergrundtemperatur von 10°C nach 30 min, 60 min, 120 min und 180 min nach Verfüllende dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Temperatur im Bohrloch sehr schnell an die Untergrundtemperatur anpasst und selbst bei außergewöhnlich hohen Suspensionstemperaturen (30 °C) die Temperaturdifferenz zur Untergrundtemperatur nach 3 Stunden nur noch 1,2 °C beträgt. Der Einfluss der initialen Suspensionstemperatur muss bei den Untersuchungen zum Absatzverhalten der Baustoffe somit nicht gesondert betrachtet werden.

Der zeitliche Verlauf der mittleren Suspensionstemperatur im gesamten Bohrloch ist für alle Temperaturszenarien graphisch für die ersten drei Stunden nach Verfüllende in Abbildung 7-14 dargestellt.

Tabelle 7-4: Übersicht der Suspensionstemperaturen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei einer ungestörten Untergrundtemperatur von 10°C

T _{Sus} [°C]	T nach 30 min [°C]		T nach 60 min [°C]		T nach 120 min [°C]		T nach 180 min [°C]	
	Ø-Temp*	ΔT**	Ø-Temp*	ΔT**	Ø-Temp*	ΔT**	Ø-Temp*	ΔT**
0	7,3	2,7	8,5	1,5	9,1	0,9	9,4	0,6
5	8,7	1,3	9,2	0,8	9,6	0,4	9,7	0,3
15	11,3	1,3	10,8	0,8	10,4	0,4	10,3	0,3
20	12,7	2,7	11,6	1,6	10,9	0,9	10,6	0,6
30	15,4	5,4	13,1	3,1	11,7	1,7	11,2	1,2

* Durchschnittstemperatur der Verfüllsuspension im gesamten Bohrloch

**Temperaturdifferenz zwischen Verfüllsuspension und ungestörtem Untergrund

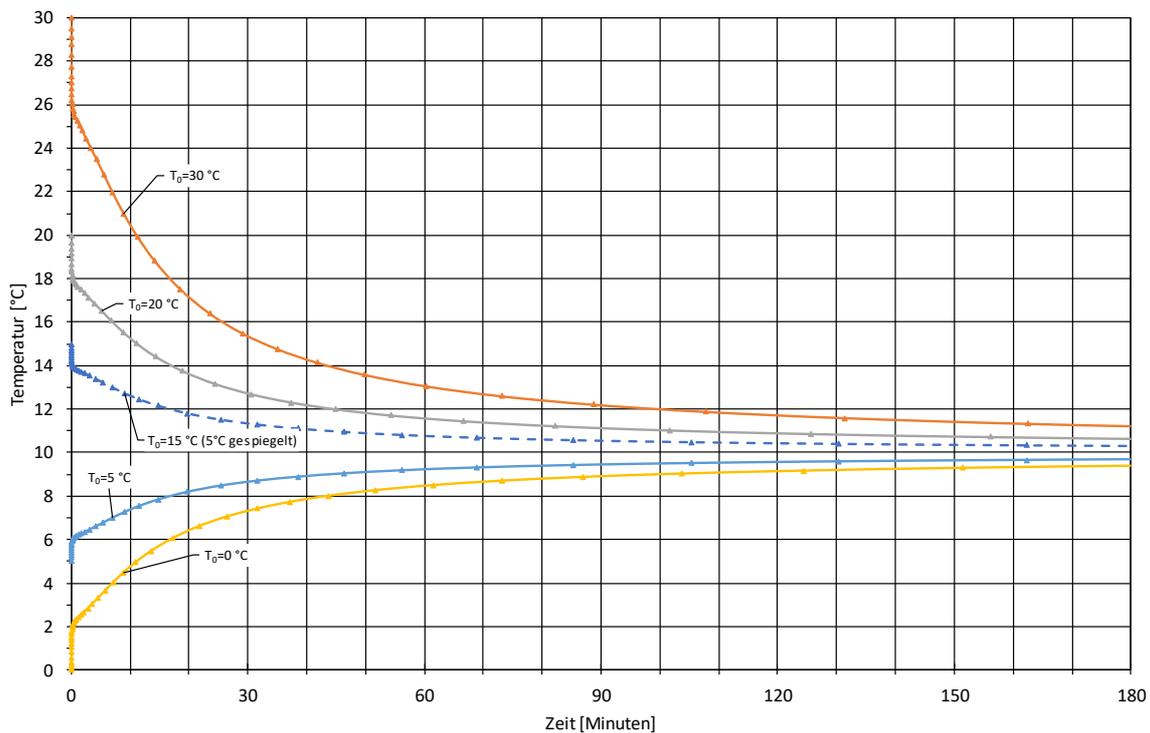


Abbildung 7-14: Zeitlicher Verlauf der mittleren Suspensionstemperatur nach Verfüllende im gesamten Bohrloch für die vier berechneten Temperaturszenarien (Starttemperatur T_0 der Suspension: 0 °C, 5 °C, 20 °C und 30 °C) sowie der, durch Spiegelung des 5 °C-Verlaufs, erzeugte 15 °C-Verlauf (FEFLOW-Simulationsergebnisse).

7.4. Berechnungsmodell zur Festlegung der Versuchsrandbedingungen

Es wurde ein Berechnungstool mit der Intention erstellt, beliebige Konfigurationen der Technikumsversuche mit Grundwasserströmung (Kapitel 7.5) bezüglich Größen-, Druck- und Volumenstromverhältnisse voraus zu berechnen und auf reale EWS-Bohrungen zu skalieren.

Das Ziel ist es, belastbare Aussagen zur Möglichkeit der Abdichtung eines aufsteigenden Grundwasserleiters zu treffen, ohne dass zu dessen Bewertung zuvor ein Versuch durchgeführt werden muss. Mit ausgewählten Versuchen im Technikum sollte die Genauigkeit des Berechnungstools überprüft und nach Möglichkeit nachgewiesen werden. Zukünftig könnten so verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Randbedingungen betrachtet werden.

7.4.1. Theoretische Vorüberlegungen

Die Entwicklung des Berechnungsmodells erfolgte nach der Theorie der Strömungsberechnung mittels des Ansatzes nach Bernoulli. Dazu wird in der folgenden Abbildung 7-15 zunächst ein Schema der lokalen Randbedingungen gegeben und in Tabelle 7-5 werden alle Parameter aufgeführt, welche für die Entwicklung der Gleichung (Gleichung (2)) zur Berechnung des ins Bohrloch einströmenden Grundwasservolumenstroms (Gleichung (6)) nötig sind.

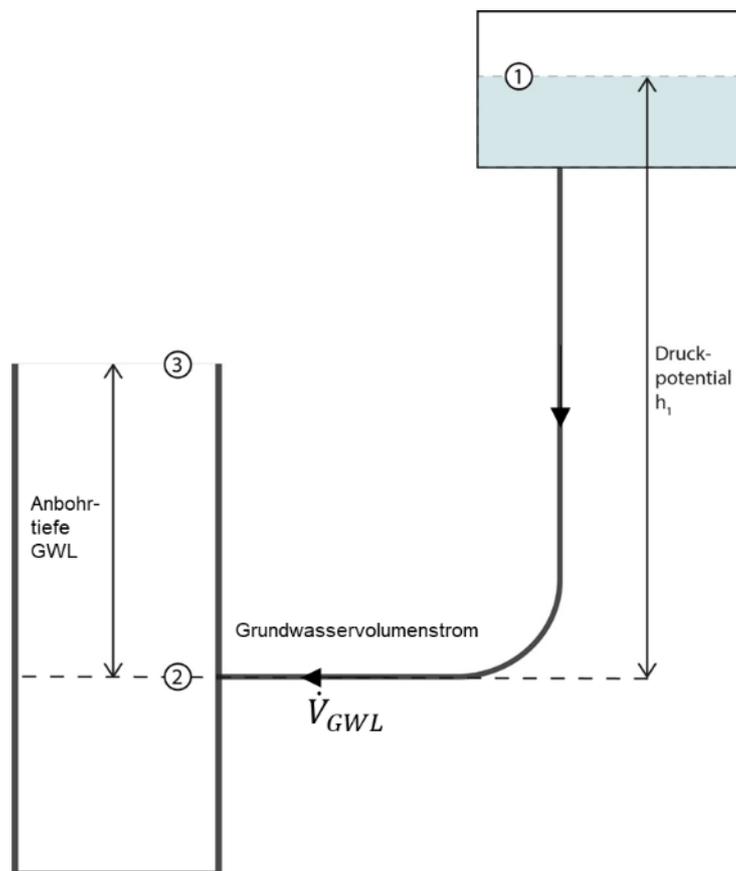


Abbildung 7-15: Schema Versuchsaufbau zur Entwicklung des Berechnungsmodells nach Bernoulli, mit der statischen Druckpotentialhöhe h_1 und der Anbohrtiefe des Grundwasserleiters (GWL). Die Bezeichnungen h_1 bezieht sich dabei auf die Angaben für die Benutzeroberfläche des Berechnungsmodells.

Tabelle 7-5: Alle Parameter, welche Eingang in die Berechnung zur Abdichtung eines aufwärts gerichteten Grundwasserpotentials mit dem Ansatz nach Bernoulli finden

p_i	... statischer Druck	[Pa]
ρ_W	... Dichte Wasser	[kg/m ³]
ρ_{misch}	... Dichte der Mischung aus Wasser und Suspension	[kg/m ³]
h_1	... Höhe Druckpotential	[m]
h_2	... Höhe reine Wassersäule im Bohrloch	[m]
h_3	... Höhe gemischte Verfüllsäule im Bohrloch	[m]
v_i	... Strömungsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]
ζ_i	... Fittingparameter Strömungsverlust	[1/(m*s)]
g	... Erdbeschleunigung	[m/s ²]
\dot{V}_{GWL}	... ins Bohrloch einströmendes Wasser	[m ³ /s]
A_i	... Strömungsquerschnitt	[m ²]

$$p_1 + \rho_W \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho_W}{2} \cdot v_1^2 = p_2 + \rho_{misch} \cdot g \cdot h_3 + \rho_W \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho_W}{2} \cdot v_2^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\rho_W}{2} \cdot \zeta_i \cdot v_i^2 \quad (2)$$

Mit $p_i = p_1 = p_2$; $\frac{\rho_W}{2} \cdot v_1^2 = 0$; $\frac{\rho_W}{2} \cdot v_2^2 = 0$; $\rho_w \cdot g \cdot h_2 = 0$ folgt:

$$\rho_w \cdot g \cdot h_1 = \rho_{\text{misch}} \cdot g \cdot h_3 + \sum_{i=1}^n \frac{\rho_w}{2} \cdot \zeta_i \cdot v_i^2 \quad (54)$$

A: aus (54) folgt für die initiale Grundwasserströmung mit $\rho_{\text{Misch}} = \rho_w$:

$$\rho_w \cdot g \cdot h_1 = \rho_w \cdot g \cdot h_3 + \rho_w \cdot \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot \frac{v_i^2}{2}$$

$$\text{Mit } v_i = \frac{\dot{V}_{\text{GWL}}}{A_i}$$

$$g \cdot h_1 = g \cdot h_3 + \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{\text{GWL}}}{A_i} \right)^2$$

$$g \cdot h_1 = g \cdot h_3 + \dot{V}_{\text{GWL}}^2 \cdot \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_i} \right)^2$$

Mit $\sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 = \zeta_i^*$ (Fittingparameter) folgt:

$$g \cdot h_1 = g \cdot h_3 + \dot{V}_{\text{GWL}}^2 \cdot \zeta_i^*$$

$$\zeta_i^* = \frac{g \cdot h_1 - g \cdot h_3}{\dot{V}_{\text{GWL}}^2} \quad (55)$$

Für die sich einstellende Mischdichte am Eintrittselement des Grundwasservolumenstroms während der Verfüllung gilt:

$$\rho_{\text{misch}} = \frac{\dot{V}_{\text{GWL}} \cdot \rho_w + \dot{V}_{\text{Verpress}} \cdot \rho_{\text{Suspension}}}{\dot{V}_{\text{GWL}} + \dot{V}_{\text{Verpress}}} \quad (56)$$

B: aus (54) ergibt sich folgender Verlauf der Grundwasserströmung bei Verfüllung:

$$\rho_w \cdot g \cdot h_1 = \rho_{\text{misch}} \cdot g \cdot h_3 + \rho_w \cdot \dot{V}_{\text{GWL}}^2 \cdot \zeta_i^*$$

$$\dot{V}_{\text{GWL}} = \sqrt{\frac{\rho_w \cdot g \cdot h_1 - \rho_{\text{misch}} \cdot g \cdot h_3}{\rho_w \cdot \zeta_i^*}} \quad (6)$$

7.4.2. Benutzeroberfläche des Berechnungstools

Das Berechnungstool wurde im Programm Microsoft Excel 2016 implementiert und für eine erleichterte Bedienung mit einer einfachen Eingabemaske ausgestattet, siehe Abbildung 7-16. In der Eingabemaske werden die Versuchsrandbedingungen festgelegt. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Form von Grafiken (siehe z.B. Abbildung 7-20) und Matrixtabellen in weiteren Tabellenblättern dargestellt.

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6	KC	KD	KE	KF	KG	
2	V_Verpress	l/min	40	65									
3	Rho_Suspension	kg/l	1.96	1.96									
4	Dauer	min	8	5									
5	Start	min		8	13	13	13	13					
6	Ende	min	8	13	13	13	13	13					
7			643.4	318.4	325	0	0	0					
8	Fitting mit Wasser (vor Versuchsbeginn/Verfüllung)												
9	Bohrlochtiefe	m	6.2										
10	Anbohrtiefe GWL (h3)	m	5.7										
11	Druckpotential GWL (h1)	m	10.1										
12	Dichte Wasser	kg/m³	999.70										
13	V_punkt_GWL_ini	l/min	40.00										
14	zeta* (Fittingparameter)	1/m4	7.49										
15													
16	Startwerte bei Versuchsbeginn												
17	V_punkt_GWL	l/min	40.00										
18	mittlere Dichte im Bohrloch	kg/m³	999.70										
19	Anzahl Startelemente GWL-GOK		66										
20	Anzahl Startelemente unten-GWL		6										
21	Zeitschrittweite	s	2.00										
22	Bohrlochdurchmesser	m	0.1396										
23	Bohrlochvolumen GWL-GOK	l	87.28	1.3224757									
24	Bohrlochvolumen unten-GWL	l	7.66	1.27607305									
25	Zeitpunkt	min	-10.00	0.00	0.03	0.07	0.10	0.13	9.50	9.53	9.57	9.60	9.63
26	V_punkt_GWL	l/min	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	V_Verpress	l/min			39.80	39.80	39.80	39.80	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
28	Rho_Suspension_unten	kg/l			1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
29	Rho_Suspension_GWL	kg/l		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
30	rho_misch_Eintritt	kg/l	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
31	rho_misch_Bohrloch	kg/m³	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	1960.00	1960.00	1960.00	1960.00	1960.00
32													
33	Gesamtdauer erforderlich	min	5.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	rho erforderlich	kg/l	1776.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	Zeitpunkt Verfüllende	min	13.00										
36													
37													
38	Hinweise:												
39	Für nicht benötigte Phasen gilt: V_Verpress = 0 setzen oder Zellen leerlassen, der Werte der Dichte ist unbedeutend.												
40	Bei der Fehlermeldung "Elementanzahl ist zu gering" -> Zeitschrittweite reduzieren. Ggf. hilft auch Verringerung der Anzahl an Startelementen (Dieses sollte nicht höher als 300 sein).												

Abbildung 7-16: Eingabemaske für das Berechnungstool

7.4.3. Allgemeiner Ablauf des Berechnungszykluses

Der Ablauf der Vorgänge im Bohrloch während des Verfüllvorgangs kann in folgende Abschnitte unterteilt werden (siehe Abbildung 7-17, Abbildung 7-18 und Abbildung 7-19):

1. Nur Grundwasser strömt ins Bohrloch (\dot{V}_{GWL}). Es findet noch keine Verfüllung statt (Abbildung 7-17 links)
2. Start der Verfüllung. Suspension steigt vom Grund des Bohrlochs aus auf und verdrängt darüberstehendes Wasser nach oben. Es bildet sich eine Durchmischungszone aus (Abbildung 7-17 rechts).
3. Die Suspension erreicht die Anbohrtiefe (Abbildung 7-18 links). Das ins Bohrloch einströmende Grundwasser vermischt sich ab jetzt mit der aufsteigenden Suspension und setzt deren effektive Dichte herab.

4. Es bildet sich eine Mischzone aus eingepumpter Suspension und einströmendem Grundwasser aus (Abbildung 7-18 rechts). Diese verändert sich je nach den Anteilen der ins Bohrloch strömenden Fluide. Die erhöhte Dichte dieser über der Anbohrtiefe stehenden Mischzone übt einen Einfluss auf das einströmende Grundwasser aus. Auf Grund des steigenden hydrostatischen Drucks im Bohrloch auf Höhe des GWL wird dessen Einströmen sukzessive zurückgedrängt, wodurch die Dichte der Mischzone immer weiter ansteigt und sich der der eingepumpten Suspension annähert.
5. Die Druckhöhe im Bohrloch erreicht die des anstehenden Potentials des Grundwasserleiters (Abbildung 7-19 links). Auf Grund der sich nun ausgleichenden Kräfte kann kein Grundwasser mehr ins Bohrloch einströmen. Der GWL ist abgedichtet. Am Bohrllochkopf tritt noch Suspension mit einer geringeren Dichte als die der angemischten Suspension aus, da sich an dieser Stelle noch die Mischzone befindet.
6. Es kann kein Grundwasser mehr ins Bohrloch einströmen und es wird weiterhin Suspension ins Bohrloch verpresst (Abbildung 7-19 rechts). Diese steigt auf und verdrängt die Durchmischungszone nach oben hin aus dem Bohrloch. Die Verfüllung wird beendet, wenn die am Bohrllochkopf austretende Dichte der der angemischten Suspension entspricht.

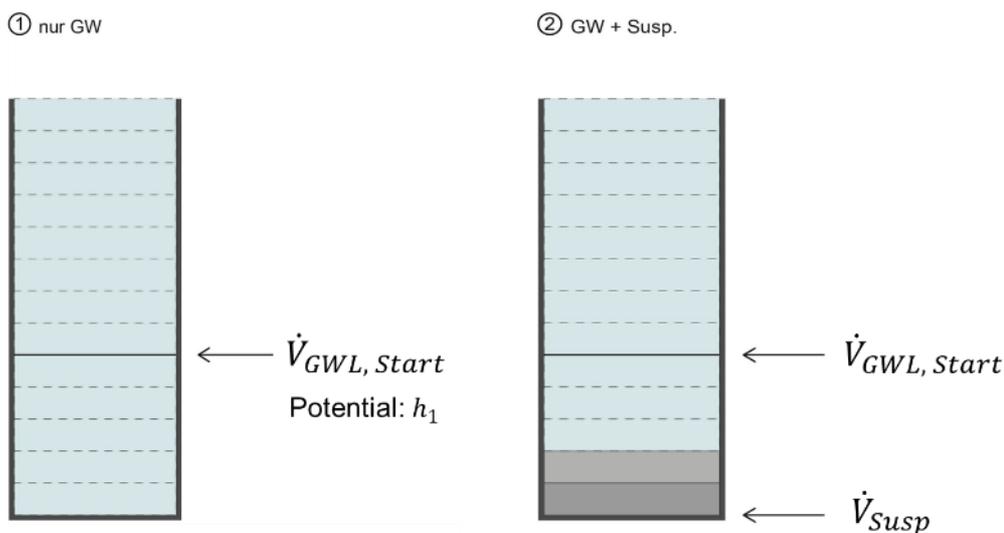


Abbildung 7-17: Ablauf des Verfüllvorgangs, links: Ausgangssituation: mit Wasser (blau) gefülltes Bohrloch, initial ins Bohrloch einströmendes Wasser mit dem Druckpotential h_1 , rechts: Beginn des Verfüllvorgangs mit Suspension (grau) vom Bohrlloch tiefsten aus

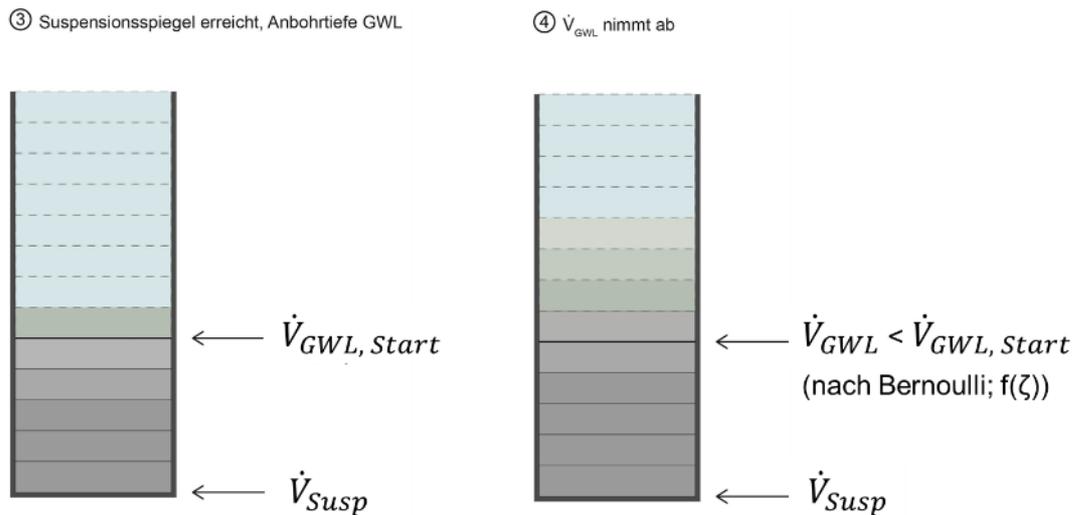


Abbildung 7-18: Ablauf des Verfüllvorgangs, links: Suspension erreicht Anbohrtiefe, Ausbildung von Zonen mit unterschiedlichen Mischdichten in grün-grauer Farbabstufung, rechts: der ins Bohrloch einströmende Grundwasservolumenstrom nimmt dabei sukzessive ab

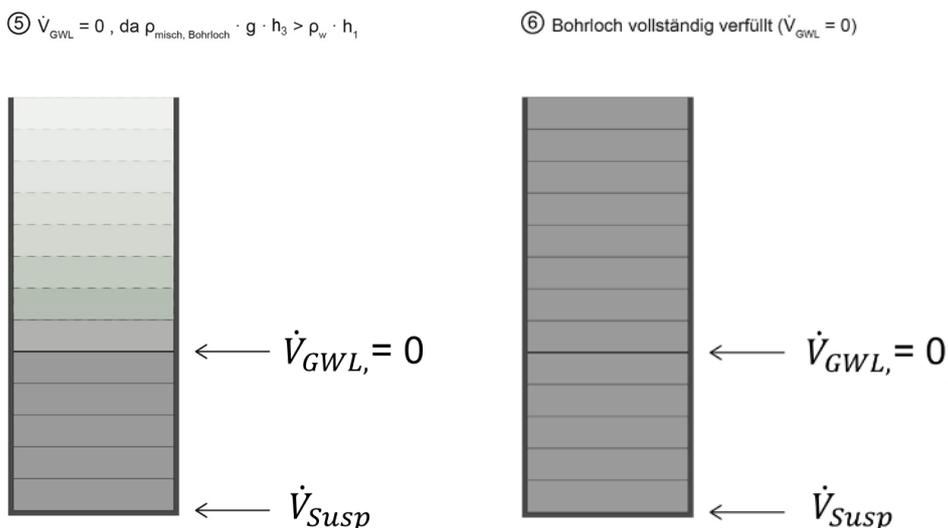


Abbildung 7-19: Ablauf des Verfüllvorgangs, links: Ende der Einströmung von Grundwasser ins Bohrloch da der im Bohrloch herrschende Druck größer als das Potential des Grundwassers ist, noch keine konstante Dichte im Bohrloch, daher wird weiter verfüllt, rechts: oben austretende Dichte entspricht der Dichte des angemischten und eingepumpten Baustoffs: Ende des Verfüllvorgangs h_3

In Abbildung 7-20 sind die Ergebnisdiagramme zu den beschriebenen Verfüllphasen für eine Beispielberechnung dargestellt.

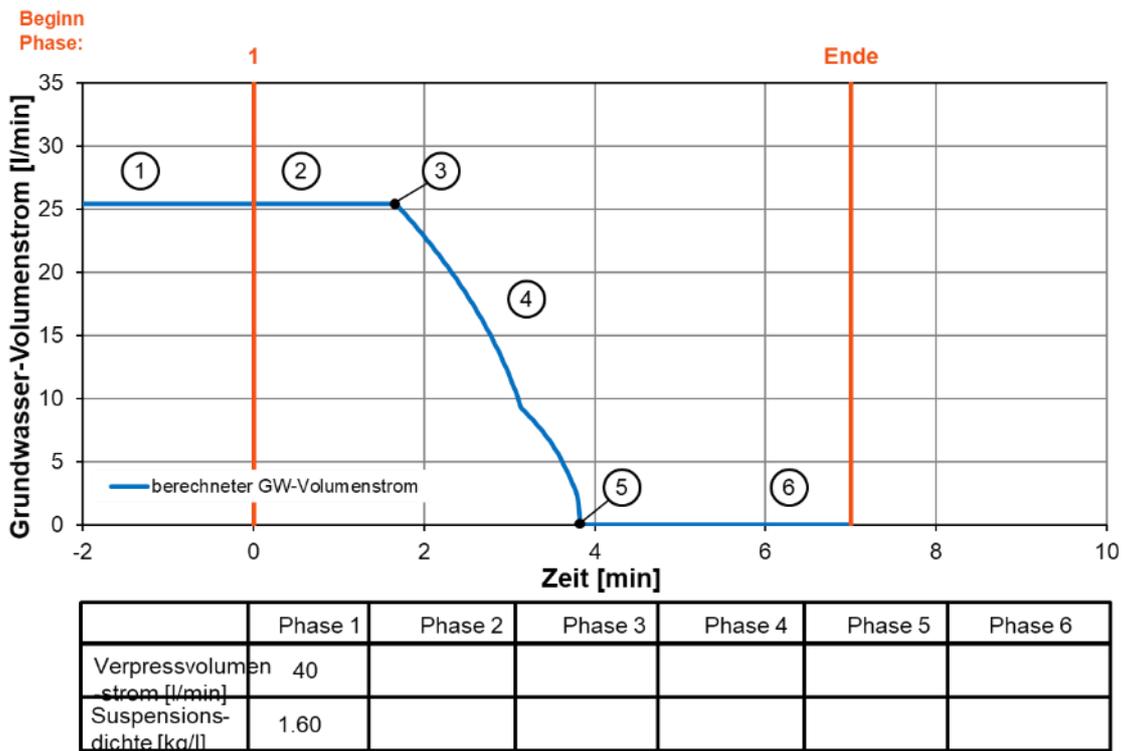


Abbildung 7-20: Ergebnisdigramme des Berechnungsprogramms mit Kennzeichnung der beschriebenen Verfüllphasen

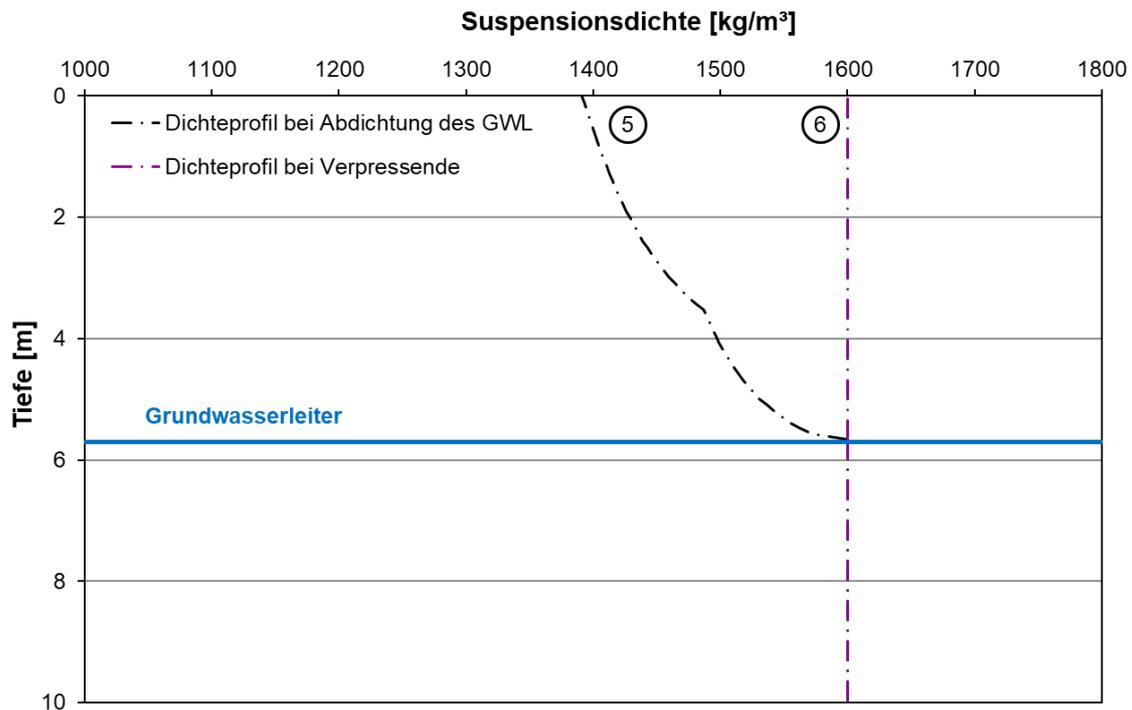


Abbildung 4-7-21: Berechnete Dichteprofile in der Verfüllsäule zum Zeitpunkt der Abdichtung des Grundwasserleiters (GWL) (Phase ⑤) und zum Verpressende (Phase ⑥)

7.4.4. Ablauf der Berechnungen

Nach Festlegung der Eingabeparameter (Versuchsdauer, Zeitschrittweite, Anbohrtiefe (h_3), Druckpotential (h_1), etc.) (h_3 und h_1 siehe Abbildung 7-15) wird das Bohrloch im Modell in einzelne vertikal geschichtete Elemente unterteilt. Die Elemente sind zylinderförmige Volumeneinheiten. Sowohl die Anzahl als auch die Volumina der Elemente sind über die Zeit nicht konstant. Das Volumen eines Elements ergibt sich aus der Summe der einfließenden Massenströme pro Zeitschritt. Das Gesamtvolumen zwischen GOK und der Bohrlochsohle bleibt konstant.

Die Elemente zwischen dem GWL und der GOK werden im Matrixpaket 1 adressiert, die Elemente unterhalb der GWL im Matrixpaket 2, siehe Abbildung 7-22. Die beiden Matrixpakete enthalten jeweils eine Dichte- und eine Volumenmatrix, in denen die berechneten Werte für die Dichte (in kg/l) und die Volumina (in l) der jeweiligen Elemente für jeden Zeitschritt des Berechnungsgangs stehen.

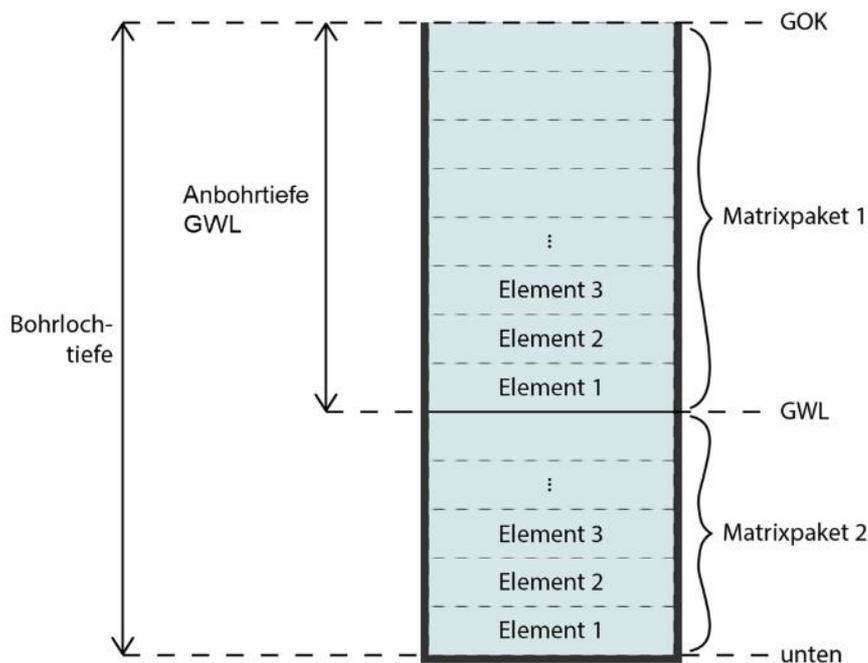


Abbildung 7-22: Aufteilung des Bohrlochs in Elemente mit GWL: Höhe Eintritt Grundwasserleiter und GOK: Geländeoberkante)

Anschließend werden für jeden Zeitschritt die folgenden Berechnungen durchgeführt:

- Mit den Eingabewerten ρ_W , Druckpotential GWL (h_1), Anbohrtiefe GWL (h_3) und den Berechnungswerten $\rho_{Misch_Bohrloch}$ und ζ_i^* (Formel (3)) wird gemäß Formel (4) \dot{V}_{GW} berechnet.

$\rho_{Misch_Bohrloch}$ entspricht der mittleren Dichte im Bohrloch und wird mit Hilfe des Matrixpakets 1 als volumengewichteter Mittelwert gebildet. Am Ende der Berechnungen werden die Dichteprofile zum Zeitpunkt der Abdichtung und am Ende des Verfüllvorgangs aus den Dichtematrizen entnommen und im Ergebnisdiagramm dargestellt.

Eine Abdichtung des Grundwasserleiters erfolgt, wenn die Grundwassereinströmung unterbunden ist ($\dot{V}_{GW} = 0$). Beendet wird die Verfüllung nach LQS EWS ordnungsgemäß, wenn die am Bohrlochkopf austretende Dichte der Dichte der eingebrachten Verfüllung entspricht, das heißt wenn das Dichteprofil über die Höhe des Bohrlochs konstant ist.

7.5. Versuchsanlage

7.5.1. Technikum

Im Folgenden ist der entwickelte Versuchsaufbau dargestellt, mit dem das Zuströmen eines Grundwasserleiters versuchstechnisch nachgebildet werden kann (Abbildung 7-23).

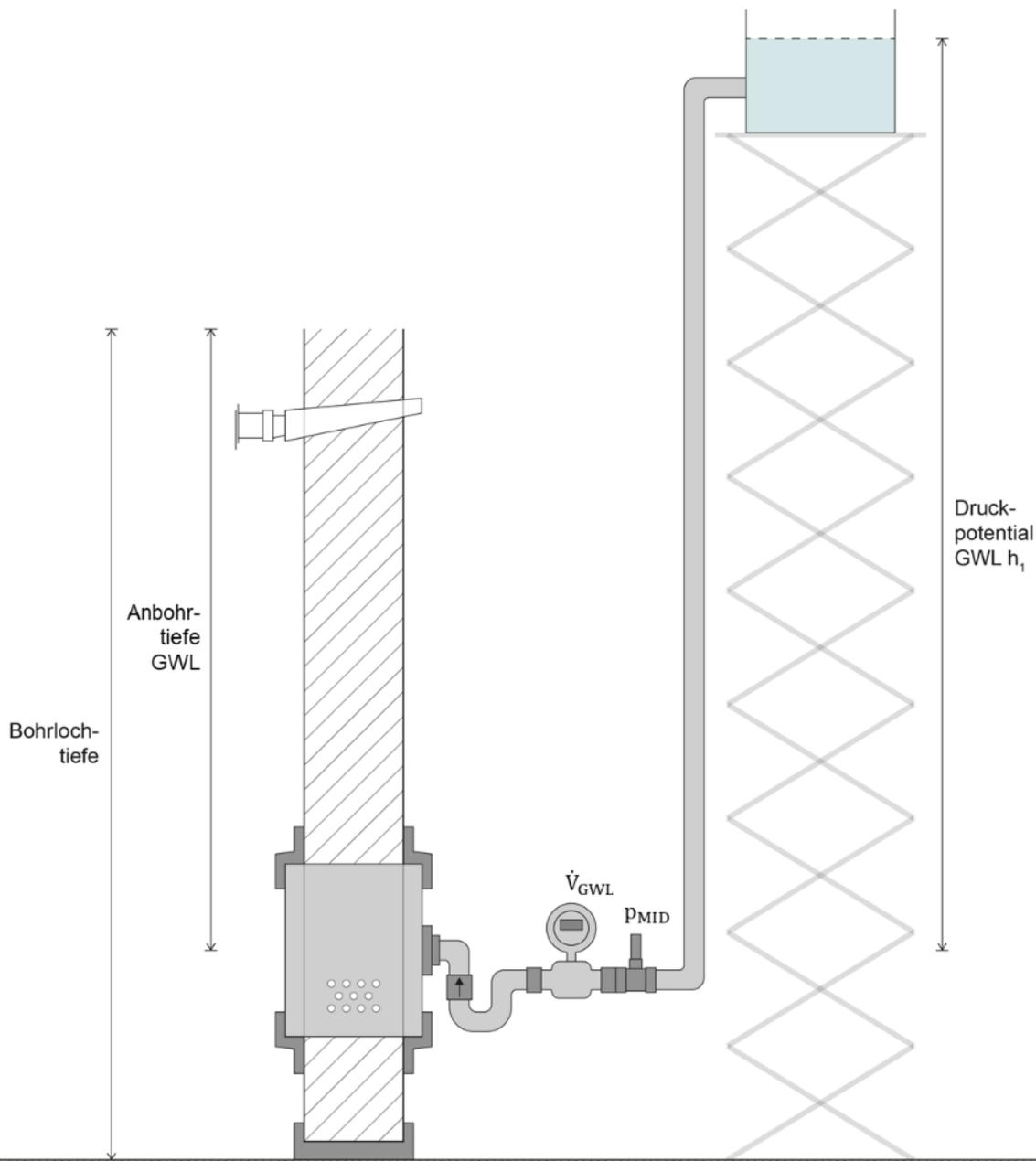


Abbildung 7-23: Schema des entwickelten Aufbaus des Technikumsversuches, nicht maßstäblich (diagonal gestreifter Bereich: Versuchssäule (PVC-Rohr, Durchmesser 150 mm) mit Überlaufkragen, \dot{V}_{GWL} : Messung Grundwasservolumenstrom mittels magnetisch-induktivem Durchflussmesser, p_{MID} : Messung des Druckpotentials

Der Versuchsaufbau ermöglicht das voneinander entkoppelte Einstellen der Druck- und Volumenstromrandbedingungen des simulierten Grundwasserleiters. Bei der Versuchsdurchführung wird hierfür ein Wasserbehälter, der auf einer in der Höhe verstellbaren Scherearbeitsbühne befestigt ist, auf eine definierte Höhe gefahren, womit das Anliegen eines Grundwasserpotentials nachgebildet wird. Von dort strömt das Wasser durch einen Schlauch und durch ein einstellbares Drosselventil zur Versuchssäule. An dieser ist eine Manschette befestigt, wodurch der Eintritt des

aus dem Hochbehälter herabströmenden Wassers in die Versuchssäule als ein anliegendes aufsteigendes Grundwasserpotential nachgebildet wird. Das Anliegen eines konstanten Potentials trotz eines sich verändernden Volumenstroms kann in den Messwertaufzeichnungen der Versuche auf den folgenden Seiten nachvollzogen werden.

Der Versuchsaufbau wurde so konzipiert, dass die Anlage auch für die Realmaßstabsversuche (siehe Arbeitspaket B3) eingesetzt werden kann.

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

Ergänzend zum Vorgehen der Datenaufnahme des Verfüllvorgangs im EWS-tech-Projekt (Riegger & Rolker, EWS- Tech, 2016) wurde die Messtechnik um ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID) zur Messung des simulierten Grundwasservolumenstroms und um mehrere Drucksensoren erweitert, die neben dem Druckpotential des simulierten Grundwasserleiters auch den Anstieg der Verfüllsuspension hochaufgelöst messen und Auskunft über die Suspensionsdichte im Bohrloch geben.



Abbildung 7-24: Technikumsversuch- 1: Scherensarbeitsbühne zur Aufbringung des Potentials, 2: Messkonfiguration von MID, Drucksensoren und Coriolis-Messgerät, 3: Wasservorratsbehälter

7.5.2. Realmaßstabsversuch

Die Anlage zur Aufprägung der Grundwasserströmungen im Technikum wurde so konzipiert, dass das selbe Prinzip unverändert auch für die Realmaßstabsversuche genutzt werden kann. Dieser Versuch wurde mit einem 27 m langen Aufbau durchgeführt, wozu die Rohre zur Nachbildung des Bohrlochs in eine vorhandene 30 m lange, und mit einem Hüllrohr DN400 ausgebaute Bohrung abgelassen werden mussten. Zur Durchführung des Versuchs wurden lediglich die Anschlüsse des Grundwasserzulaufs in das Bohrloch angepasst (Abbildung 7-25). Hierbei waren die in der Versuchsbohrung vorliegenden beengten Platzverhältnisse zu beherrschen. Über Filterrohre kann das anliegende Grundwasserpotential ins Bohrloch einströmen, über die Filterrohre wurde ein weiteres Hüllrohr (DN200) geschoben und mit massiven Verbindern befestigt. Daran wurden die Anbohrschellen zur Befestigung der Schläuche zur Zuleitung des ins Bohrloch einströmenden Grundwassers angebracht.

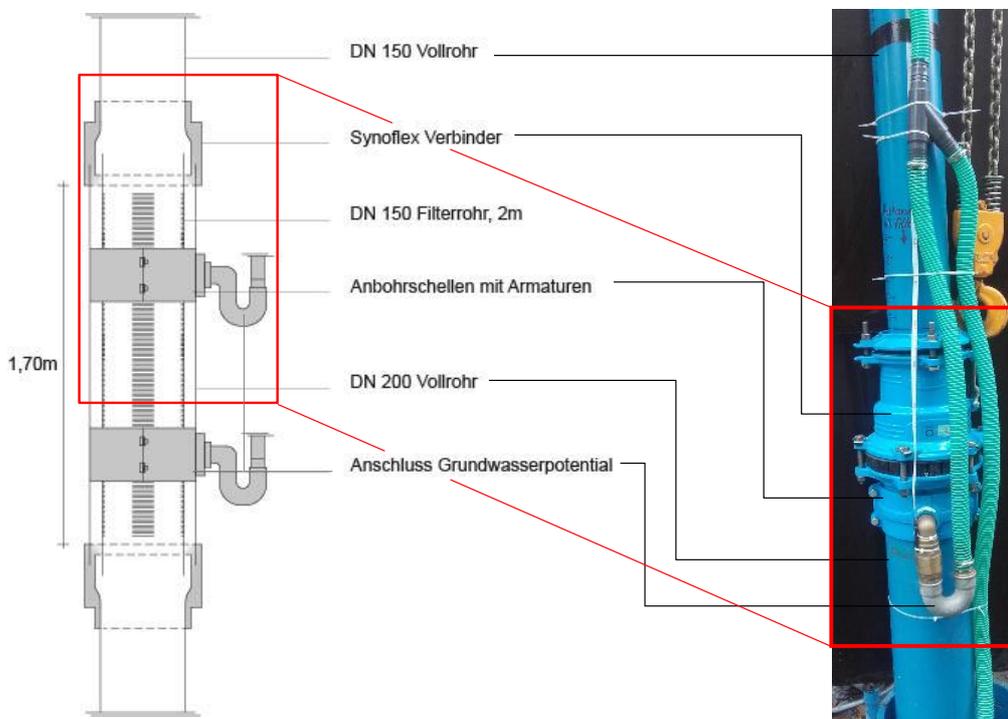


Abbildung 7-25: Grundwasseranschluss Realmaßstabsversuch, links: Schemaskizze, rechts: Detailaufnahme des oberen Teils des Anschlusses

7.6. Messtechnik der Versuchsanlage

Das Messsystem zur Aufzeichnung der wesentlichen Zustandsgrößen bei den Versuchen wurde variabel und mobil konzipiert, sodass die Messungen sowohl bei den Technikums- und Realmaßstabsversuchen im Versuchslabor, als auch bei Projektpartnern bzw. an anderen Standorten durchgeführt werden können. Dazu können die relevanten Parameter auf einem Datenlogger oder mit einem CemTrakker aufgezeichnet werden.

- Der Datenlogger kann die Messwerte sekundengenau aufzeichnen und wurde so ausgewählt, da dieser die Erfassung von bis zu 16 Stromsignalen (0/4-20 mA) ermöglicht. Dank der integrierten Umrechnung der Stromsignale in die eigentlichen Messwerte und deren Anzeige auf einem Digitaldisplay bietet der Datenlogger eine einfache Momentanwertanzeige. Das entwickelte Messdatenerfassungssystem kann daher ohne einen zusätzlichen Mess-PC verwendet werden. Lediglich nach Fertigstellung der Messungen müssen die Messdaten mit Hilfe eines Mess-PCs von der Speicherkarte des Datenloggers oder dem internen Speicher des CemTrakkers ausgelesen werden.
- Die Erfassung von zusätzlichen Stromsignalen mit dem CemTrakker-Messkoffer ist eine Sonderfunktion, die bei den serienmäßig erhältlichen Messkoffern nicht verfügbar ist. Hier bedurfte es allerdings eines intensiven Austauschs mit dem Hersteller des Messgeräts, um eine erste Funktionalität der Stromeingänge zu ermöglichen. Leider kam es im weiteren Projektlauf zu weiteren fehlerhaften Aufzeichnungen. Dabei wird statt des tatsächlichen Messwerts ein 0- Wert gespeichert. Dieser fehlende Messwert muss nachträglich interpoliert werden.
- Am Coriolis-Messgerät wurde eine Zusatzfunktion zur Erfassung der Viskosität einprogrammiert. Da das Coriolis-Messgerät nur 3 Messwerte über Stromausgänge ausgeben kann, wurde einer der Stromausgänge als HART-Ausgang verwendet. Über diesen HART-Ausgang können mehrere Messwerte gleichzeitig über einen Kanal ausgegeben werden. In einem sogenannten HART Loop Converter wird das HART Signal wieder in mehrere einzelne Datensignale (4...20 mA) aufgeteilt. Diese können anschließend vom Datenlogger und/oder dem CemTrakker erfasst werden.

Sofern Verfüllmessungen unter gleichzeitiger Verwendung des Datenloggers und CemTrakkers durchgeführt werden, ist eine Synchronisation der Uhrzeiten dieser beiden Geräte unerlässlich. Um Fehler aus einer möglicherweise nicht durchgeführten zeitlichen Synchronisation ausschließen zu können, wurde die Möglichkeit vorgesehen, den Verfüllvolumenstrom mit beiden Erfassungssystemen gleichzeitig aufzuzeichnen. An Hand dieses charakteristischen Messwerts können die Messdaten auch bei unterbliebener zeitlicher Synchronisation von Datenlogger und CemTrakker nachträglich zeitlich synchronisiert werden.

Folgende Messwerte können aufgezeichnet werden:

Tabelle 7-6: Messgeräte und aufgezeichnete Messgrößen während der Versuche

Messgerät	Hersteller und Modell	Messgröße	Messbereich und Genauigkeit	
CemTrakker	Sensys 2.0	magnetische Suszeptibilität	hersteller-spezifisch	
Coriolis-Messgerät	Endress+Hauser Promass 83141	Volumenstrom und Dichte der Suspension	0 bis 15000 kg/h	0,10 %
		Temperatur	-50 bis 150 °C	
		Viskosität	0 bis 20000 cP	
MID	Krohne waterflux 3300C	Volumenstrom Wasser	0 bis 100 l/min	0,20 %
Drucksensoren	Boie	<i>abgeleitete Größen</i>		
am Coriolis-Messgerät	LPK.131	Verfülldruck	0 bis 16 bar	0,10 %
am MID	LPK.131	Grundwasserdruck (Potential)	0 bis 6 bar	0,10 %
Grundwasservorrat	LPK.131	Füllstandhöhe	0 bis 40 mbar	0,20 %
in Verfüllsäule, 5 m Tiefe	LPK.V.060	Druck bei Grundwassereintritt	0 bis 6 bar	0,10 %
in Verfüllsäule, 1 m Tiefe	LPK.V.010	Dichte in Verfüllsäule im letzten Meter	0 bis 1 bar	0,20 %

Der Aufbau der gesamten Messtechnik und die Verschaltung der einzelnen Geräte und Sensoren ist in Abbildung 7-26 und Abbildung 7-27 dargestellt.

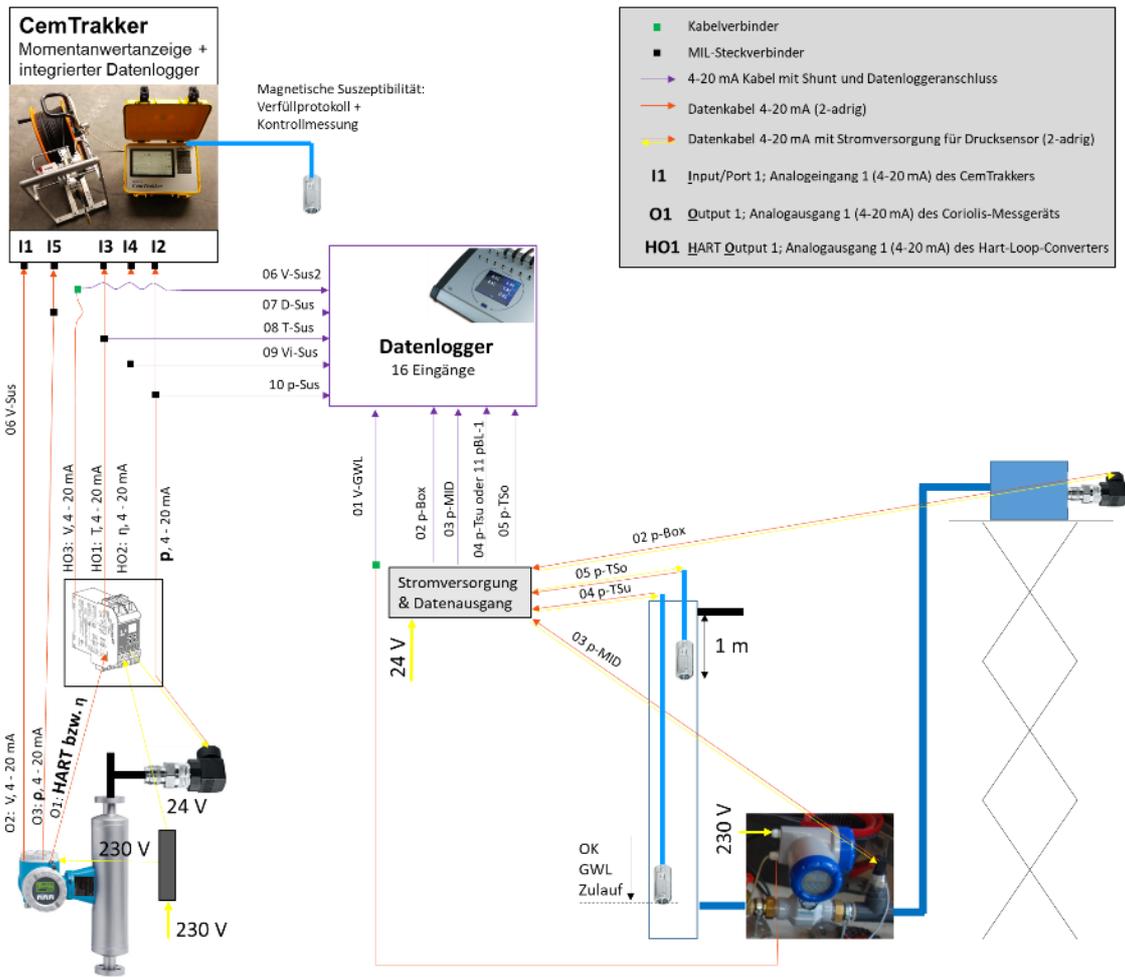


Abbildung 7-26: Messtechnikschema zur Dokumentation eines Verfüllvorgangs mit Grundwasserströmung im Techniks- oder Realmaßstab (Dokumentation vorwiegend mit Datenlogger)

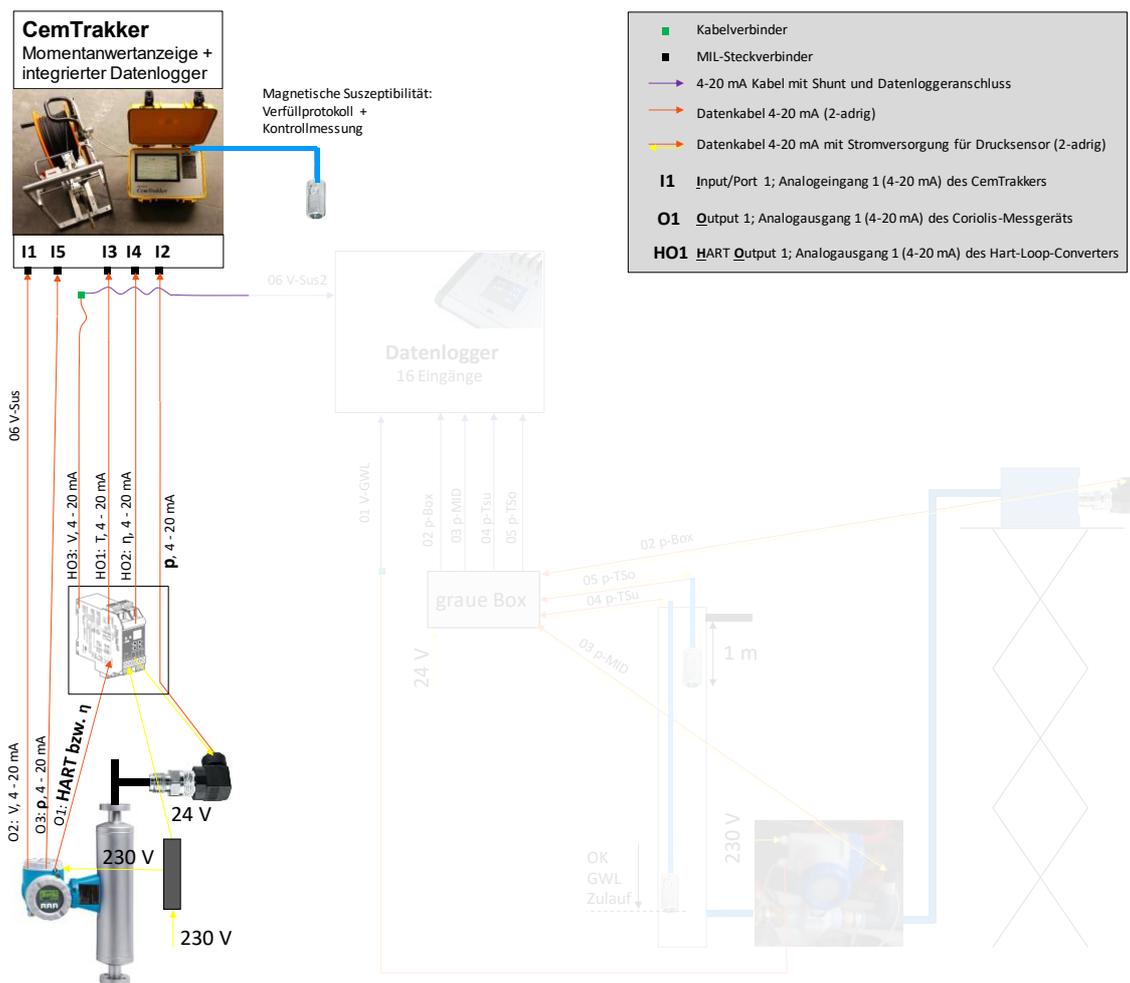


Abbildung 7-27: reduziertes mobiles Messtechnikschema zur Dokumentation eines Verfüllvorgangs zum Beispiel auf einer Baustelle

7.7. Versuchsprogramm

Im Rahmen des Projektes wurden drei Kategorien von Versuchen durchgeführt: Anmischversuche, Referenzversuche und Grundwasserversuche.

- Anmischversuche für Referenzbaustoffe

Durch die Anmischversuche soll die Auslegung der von der MPA entwickelten Modellbaustoffe mit gezielt eingestellten Eigenschaften aus einer theoretisch erarbeiteten Komposition von Bestandteilen validiert werden. Die betrachteten Parameter belaufen sich auf die Fließgrenze, die Thixotropie und die Entmischungsneigung.

- Referenzversuche mit Referenzbaustoffen

Mit den finalisierten Modellbaustoffen der MPA wurden im Technikumsversuch Säulen ohne einen anliegenden Grundwasserstrom verfüllt. Diese Versuche sollen zum einen zeigen, dass die gewünschten Eigenschaften des Baustoffs auch im Technikumsmaßstab erreicht werden, zum anderen erlauben sie eine vergleichende Beurteilung des Einflusses eines anliegenden Grundwasserpotentials auf die Qualität der Verfüllung der anschließenden Grundwasserversuche.

- Grundwasserversuche nach Entscheidungsmatrix LQS EWS

Die Grundwasserversuche bilden den Kern des Arbeitspaketes. Zunächst wurden Szenarien aus den LQS EWS nachgebildet, um so deren Korrektheit zu validieren. Es sollte zudem untersucht werden, ob Lücken in diesem Regelwerk bestehen. In Tabelle 7-7 werden die Parameter aufgeführt, mit denen die Versuche durchgeführt wurden.

Tabelle 7-7: Übersichtstabelle der Technikumsversuche und des Realmaßstabsversuchs mit Versuchsparametern; in grün: „unkritisch“ nach LQS EWS

Versuch	Faktor nach LQS	Grundwasser Volumestrom	Potential unterer Leiter	Anbohrtiefe unterer Leiter	Potentialunterschied bei GW-Zutritt
	[-]	[l/sek]	[m]	[m]	[m]
VV2	2,3	0,59	5,1	3,55	1,55
VV3	1,4	0,4	6,1	3,55	2,55
VV4	1,4	1,12	6,1	3,55	2,55
VV6	unkritisch	0,25	4,6	4,6	(-1.2)
VV7	unkritisch	0,4	7,02	4,62	2,4
21	1,3	0,67	10,1	5,7	4,4
22	1,2	0,67	10,55	5,7	4,85
23	unkritisch	0,42	8,62	5,7	2,92
24	3	1,03	7,6	5,7	1,9
Realmaßstab	2,45	0,5	34,5	24,5	10
gezogene Verrohrung	3	1	7,6	5,7	(1,9)

7.8. Versuchsauswertung

7.8.1. Nomenklatur der Versuche

Die Nomenklatur der Versuche „Versuch 0XX“ bezieht sich auf die Gesamtheit aller Versuche. Diese wurden zu Beginn des Projektes festgelegt und während der gesamten Projektlaufzeit unverändert beibehalten. Zur Vermeidung einer Verwechslung wurde entschieden, diese Benennung auch für die Darstellung in diesem Bericht beizubehalten. Da nur ausgewählte Baustoffe unter bestimmten Szenarien durch Solites beprobt wurden, beginnt die Nummerierung der Versuche nicht bei „001“, sondern bei „016“.

7.8.2. Auswertung für Referenzbaustoffe

Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit der durchgeführten Versuche untereinander zu erreichen, wurde ein Versuchs- und Auswerteverfahren erarbeitet, sodass alle Versuche und die anschließenden Auswertungen nach demselben Ablauf durchgeführt werden können. Das gesamte Projektkonsortium war an diesem vorab definierten Verfahren beteiligt:

13.-17.08.2018	016_M2	Anmischung Trockenbaustoff M2 (ca. 231 kg)	AGW (Luisa, Hiwis)
13.-17.08.2018	017_M1	Anmischung Trockenbaustoff M1 (ca. 231 kg)	AGW (Luisa, Hiwis)
20.08.2018	016_M2	Technikumsversuch 5 : M2 ohne Sondenrohre	Solites, MPA (Rheologie)
21.08.2018	017_M1	Technikumsversuch 6 : M1 mit Sondenrohren und Cemtrakker-Messung	Solites, MPA (Rheologie), Olaf (Cemtrakker)
22.-24.08.2018	018_M2	Anmischung Trockenbaustoff M2 (ca. 231 kg)	AGW (Luisa, Hiwis)
22.-24.08.2018	019_M3	Anmischung Trockenbaustoff M3 (ca. 231 kg)	AGW (Luisa, Hiwis)
27.08.2018	016_M2	Visuelle Auswertung + Transport an Westhochschule	Solites
27.08.2018	018_M2	Technikumsversuch 7 : M2 mit Sondenrohren und Cemtrakker-Messung	Solites (inkl. Cemtrakker), MPA (Rheologie)
28.08.2018	016_M2	Sus-Messung Ringsensor + Transport an FZU/MPA	EIFER
28.08.2018	017_M1	Visuelle Auswertung + Transport an Westhochschule	Solites
28.08.2018	019_M3	Technikumsversuch 8 : M3 mit Sondenrohren und Cemtrakker-Messung	Solites (inkl. Cemtrakker), MPA (Rheologie)
29.08.2018	016_M2	Sägen der 90 cm Säulen in 45 cm Stücke und Transport der oberen Hälften zur MPA	Hagen oder NN (nach Einweisung durch Solites)
29.08.2018	017_M1	Sus-Messung Ringsensor + Transport an FZU/MPA	EIFER
29.-31.08.2018	020_M4	Anmischung Trockenbaustoff M4 (ca. 231 kg)	AGW (Luisa, Hiwis)
30.08.2018	016_M2	Nadelpenetrometermessung an unteren 45 cm Stücken	AGW
30.08.2018	016_M2	Tauchwägung an oberen 45 cm Stücken	MPA
30.08.2018	016_M2	Wassergehaltsmessung (testweise)	MPA
30.08.2018	017_M1	Sägen der 90 cm Säulen in 45 cm Stücke und Transport der oberen Hälften zur MPA	Hagen oder NN (nach Einweisung durch Solites)
31.08.2018	017_M1	Nadelpenetrometermessung an unteren 45 cm Stücken	AGW
31.08.2018	017_M1	Tauchwägung an oberen 45 cm Stücken	MPA
03.09.2018	018_M2	Visuelle Auswertung + Transport an Westhochschule	Solites
03.09.2018	020_M4	Technikumsversuch 9 : M4 mit Sondenrohren und Cemtrakker-Messung	Solites (inkl. Cemtrakker), MPA (Rheologie)
04.09.2018	018_M2	Sus-Messung Ringsensor + Transport an FZU/MPA	EIFER
04.09.2018	019_M3	Visuelle Auswertung + Transport an Westhochschule	Solites
05.09.2018	018_M2	Sägen der 90 cm Säulen in 45 cm Stücke und Transport der oberen Hälften zur MPA	Hagen oder NN (nach Einweisung durch Solites)
05.09.2018	019_M3	Sus-Messung Ringsensor + Transport an FZU/MPA	EIFER
06.09.2018	018_M2	Nadelpenetrometermessung an unteren 45 cm Stücken	AGW
06.09.2018	018_M2	Tauchwägung an oberen 45 cm Stücken	MPA
06.09.2018	019_M3	Sägen der 90 cm Säulen in 45 cm Stücke und Transport der oberen Hälften zur MPA	Hagen oder NN (nach Einweisung durch Solites)
07.09.2018	019_M3	Nadelpenetrometermessung an unteren 45 cm Stücken	AGW
07.09.2018	019_M3	Tauchwägung an oberen 45 cm Stücken	MPA
10.09.2018	020_M4	Visuelle Auswertung + Transport an Westhochschule	Solites
11.09.2018	020_M4	Sus-Messung Ringsensor + Transport an FZU/MPA	EIFER
12.09.2018	020_M4	Sägen der 90 cm Säulen in 45 cm Stücke und Transport der oberen Hälften zur MPA	Hagen oder NN (nach Einweisung durch Solites)
13.09.2018	020_M4	Nadelpenetrometermessung an unteren 45 cm Stücken	AGW
13.09.2018	020_M4	Tauchwägung an oberen 45 cm Stücken	MPA

- Anmischung der Referenz-Trockenbaustoffe ca. 1 Woche vor Versuchsbeginn (anschließend Lagerung im trockenen Keller bei ca. 20 °C)
- Versuchsdurchführung im Technikum (Bohrlochverfüllung zur Abdichtung des Grundwasserflusses) einschließlich rheologischer Suspensionsuntersuchungen (Dichte, Marsh-Zeit, Restauslaufzeit, Absetzmaß zeitabhängig, Capillary Suction Timer (CST), Suspensionstemperatur, Filterpressenversuch, Rheometer, einaxiale Druckfestigkeit an ausgehärteten Suspensionsproben)
- 7 Tage nach Versuchsdurchführung: visuelle Analyse der rückgebauten EWS in 90 cm Abschnitten
- 8 Tage nach Versuchsdurchführung: Suszeptibilitätsmessung mit Ringsensor
- 9 Tage nach Versuchsdurchführung: Sägen der 90 cm Stücke in 2 Stücke à 45 cm
- 10 Tage nach Versuchsdurchführung: Nadelpenetrometermessungen und weitere Messungen am oberen Ende der jeweils unteren 45 cm Stücke
- 10 Tage nach Versuchsdurchführung: Quecksilberdruckporosimetrie und Tauchwägung von Probestücken vom unteren Ende der jeweils oberen 45 cm Stücke

Die vorstehend aufgelisteten Analysen haben das Ziel, die Versuche neben der visuellen Analyse auch detailliert quantifiziert bewerten zu können um dabei mögliche tiefen- oder materialabhängige Unterschiede ermitteln zu können.

7.8.3. Auswertung für Technikums- und Realmaßstabsversuche

- Vor dem Versuch wird das nachzubildende Szenario mit dem Berechnungstool (Kapitel 7.4) berechnet.
- Während des Versuchs werden die unter 7.6 beschriebenen Messwerte erfasst. Der Grundwasservolumenstrom wird zur Kontrolle direkt mit dem theoretisch berechneten Verlauf abgeglichen.
- Nach erfolgreicher Abdichtung des Grundwasserpentials und Beendigung des Versuchs härtet der Baustoff eine Woche in der Verfüllsäule aus.
- Anschließend wird diese zerlegt und die Verfüllqualität systematisch begutachtet.

Weitere während der Projektlaufzeit parallel durchgeführte Forschungsprojekte zur Betrachtung der Interaktion von Verfüllsuspension und Untergrund konnten aufzeigen, dass es zwischen diesen beiden Komponenten eine starke Beeinflussung insbesondere beim Vorhandensein von durchlässigem Untergrund gibt (Lutz & Reduth, 2020). Bei den im Projekt EWS-tech II durchgeführten Versuchen wurden zur Nachbildung eines Bohrloches und eines daran anliegenden und einströmendes Grundwasserstromes PE- Rohre verwendet. Für den Bereich des Grundwasserzutritts entspricht dies nicht, auch nicht modellhaft, den Bedingungen im realen Untergrund, in dem die Bohrlochwandung wasserdurchlässig ist und Fluidbewegungen aus dem Bohrloch heraus möglich sind. Dieser Umstand muss bei der Bewertung der Verfüllqualitäten der im Projekt EWS-tech II durchgeführten Versuche berücksichtigt werden. Insbesondere die Bedeutung der gewonnenen Erkenntnisse bzgl. der Verfüllqualität in diesem Bohrlochabschnitt muss für reale Bedingungen vorsichtig interpretiert werden.

7.9. Ergebnisse der Versuche mit den Referenzbaustoffen hinsichtlich der Verfüllqualität

Die Referenzbaustoffe wurden mit den folgenden gewünschten Eigenschaften hergestellt:

- M1 - hohe Fließgrenze
- M2 - hohe Thixotropie
- M3 - niedrige Fließgrenze und niedrige Entmischungsresistenz
- M4 - niedrige Fließgrenze, hohe Entmischungsresistenz, geringe Thixotropie

Die durchgeführten Referenzversuche mit den Referenzbaustoffen M1 bis M4 konnten zeigen, dass die unterschiedlichen Eigenschaften (Fließgrenze, Entmischungsresistenz, Thixotropie) der vier Baustoffe reproduzierbar sind und den gewünschten Baustoffeigenschaften entsprechen. Exemplarisch hierfür sind in Abbildung 7-28 die mit dem Ringsensor ermittelten magnetischen Suszeptibilitäten der Versuche 019 und 020 dargestellt. An Hand der deutlichen tiefenabhängigen Änderung der volumetrischen magnetischen Suszeptibilität des mit dem Referenzbaustoff M3 verfüllten Bohrlochs ist zu erkennen, dass der Referenzbaustoff M3 die Solleigenschaft der geringen Entmischungsresistenz in Form eines Absinkens der in der Suspension enthaltenen Magnetitpartikel erfüllt.

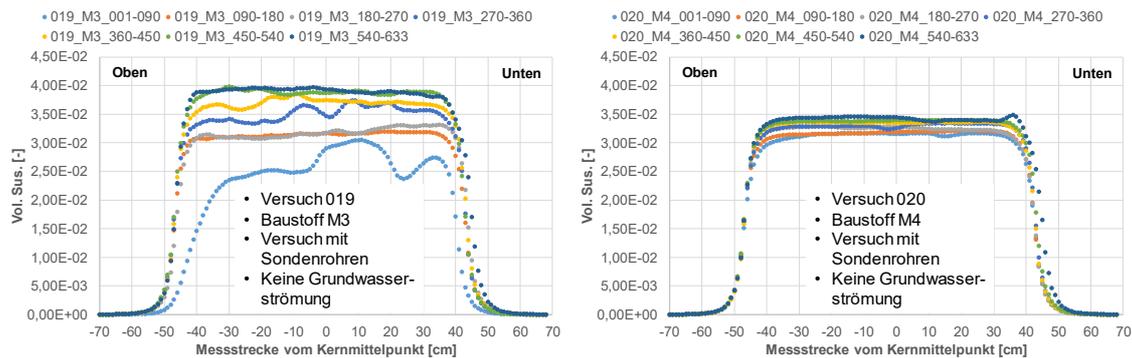


Abbildung 7-28: Mit dem Ringsensor ermittelte magnetische Suszeptibilität der 90 cm langen Probestücke der Versuche 019 mit Baustoff M3 und 020 mit Baustoff M4. Die letzten beiden Zahlen in den Datenreihenbezeichnungen geben die Tiefe in cm innerhalb des Bohrlochs wieder (z.B. 001_090 für das Probestück aus 1 cm bis 90 cm Tiefe)

Auch die visuellen Begutachtungen der Referenzversuche ohne Sondenrohre spiegeln die gewünschten, durch die Zugabe von Fließmittel und Stabilisator (s. AP A3) erreichten Baustoffeigenschaften wieder. So konnten beim Baustoff M3 bei dem Referenzversuch ohne Sondenrohre deutliche Entmischungsbereiche festgestellt werden, wohingegen M4 eine sehr gute, optisch homogene Verfüllqualität aufzeigte (s. Abbildung 7-29). Die Referenzbaustoffe M1 und M2 zeigten bei den Referenzversuchen ohne Sondenrohr ebenso sehr gute Verfüllqualitäten auf, wobei die Qualität von Baustoff M2 am besten, im Sinne einer homogen ausgebildeten Verfüllsäule war.



Versuch 007, Baustoff M3, keine Sondenrohre (SR)



Versuch 005, Baustoff M4, keine SR

Abbildung 7-29: Exemplarische Bilder zur visuellen Darstellung der Verfüllqualität der Referenzversuche ohne Sondenrohre der Referenzbaustoffe M3 und M4

Die Verfüllqualität der Referenzversuche mit Sondenrohren unterscheidet sich z.T. von den Referenzversuchen ohne Sondenrohre. So entstand bei der Verfüllung mit Sondenrohr mit dem Referenzbaustoff M1 eine ca. 1 cm hohe, den halben BL-Durchmesser durchziehende Fehlstelle, die auch mit dem Suszeptibilitäts-Ringsensor detektiert werden konnte (Abbildung 7-30). Der Referenzbaustoff M3 wies in dem Versuch mit Sondenrohren eine noch schlechtere Verfüllqualität auf (eine größere Fehlstelle, Entmischungen, erkennbares Absetzmaß). Die Referenzbaustoffe M2 und M4 zeigten in den Referenzversuchen mit Sondenrohren jeweils eine sehr gute visuelle Verfüllqualität. In Anhang 10.11 und 10.12 befindet sich eine ausführliche Dokumentation aller Versuche.

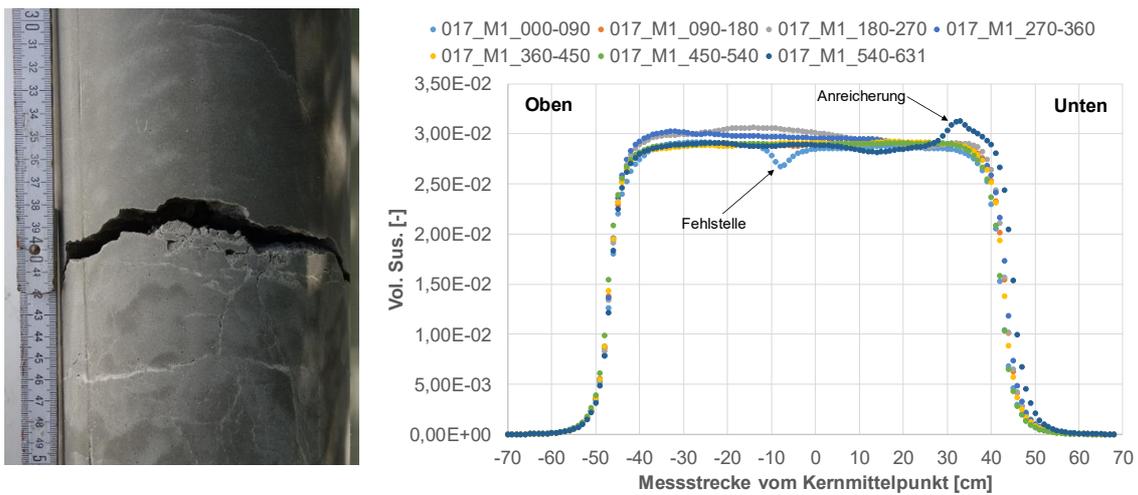


Abbildung 7-30: Auszug aus der Auswertung des Referenzversuchs mit Sondenrohren Versuchs 017 mit dem Referenzbaustoff M1. Die letzten beiden Zahlen in den Datenreihenbezeichnungen geben die Tiefe in cm innerhalb des Bohrlochs wieder (z.B. 001_090 für das Probestück aus 1 cm bis 90 cm Tiefe)

7.10. Versuche zur Abdichtung aufsteigender Grundwasserpotentiale während der Verfüllung

Die folgende Abfolge der Darstellung der Grundwasserversuche erfolgt nicht chronologisch, sondern thematisch nach der Zuordnung zu der Entscheidungsmatrix (Abbildung 7-31).

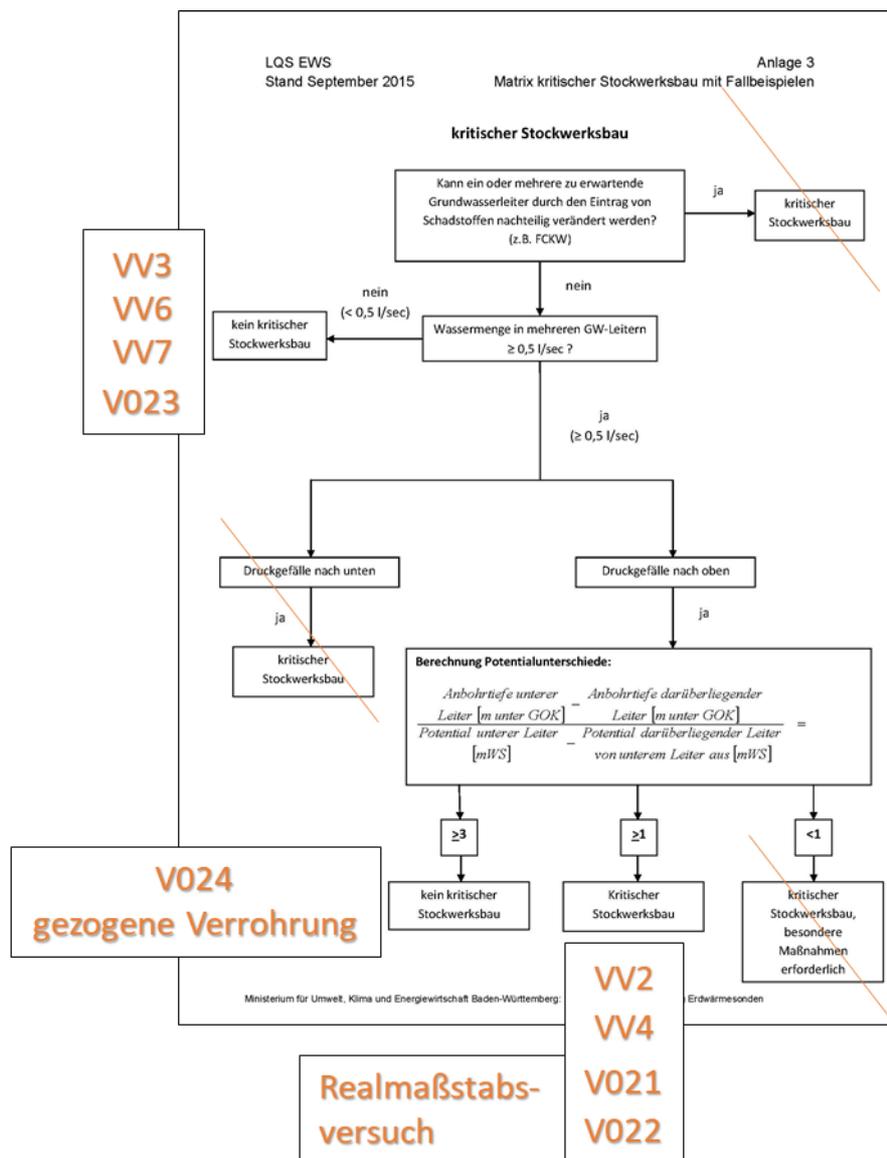


Abbildung 7-31: Einordnung der durchgeführten Vorversuche (VVX) und der Versuche (V0XX) in die Matrix kritischer Stockwerksbau aus LQS EWS. Gestrichen sind die nicht durch Versuche abgedeckten Szenarien

Das Ziel der Vorversuche war der Test und die Anpassung der Komponenten, das Einrichten und Konfigurieren der Messtechnik, sowie die Abstimmung des gesamten Versuchsaufbaus. Parallel dazu wurde eine Nachrechnung der Vorversuche durch das Berechnungstool durchgeführt, um dieses auf Konsistenz und Stabilität zu prüfen und zu optimieren.

Für den Vorversuch 1 ist eine Nachrechnung nicht möglich/sinnvoll, da der Versuchsaufbau hierfür nicht geeignet ist. An Stelle eines Grundwasser-Vorratsbehälters mit definierter Überlaufhöhe war bei diesem Versuch die Hauswasserleitung mit einem zwischengeschalteten Druckminderer direkt an das Bohrloch angeschlossen.

Bei Vorversuch 5 wurde ein absteigender Grundwasserleiter untersucht und der Baustoff wurde nach der Verfüllung im Bohrloch belassen und konnte dort erhärten. Eine Nachrechnung des

Vorversuch 5 mit dem Berechnungstool ist nicht möglich, da dieses Modell lediglich für aufwärts gerichtete Grundwasserströmungen im Bohrloch geeignet ist. Zudem trat bei diesem Versuch das Problem auf, dass die transparenten PC-Rohre bei der Aushärtung der Verfüllung barsten. Daher wurden bei allen Folgeversuchen transparente PVC-Rohre an Stelle der transparenten PC-Rohre als Bohrlöcher verwendet. Folglich sind aus der Serie der Vorversuche 1 bis 5 lediglich die Versuche 2 bis 4 für einen Vergleich der Messdaten des Grundwasservolumenstroms mit den Ergebnissen des theoretischen Berechnungstools geeignet. Die Vorversuche 2 bis 4 wurden in demselben Rohr zur Nachbildung eines Bohrlochs durchgeführt (Versuchsaufbau s. Abschnitt 7.5). Bei den Vorversuchen 2 bis 4 wurde die Suspension direkt nach dem Versuch wieder aus dem Bohrloch ausgespült. Diese vier Versuche mit aufsteigendem Grundwasserleiter sind im Detail in (Ring, 2016) dargestellt.

Während der Vorversuche 1 bis 5 befand sich die Messtechnik noch im Aufbau, sodass mit einer vorläufigen Messtechnik gearbeitet werden musste. Dies betrifft vor allem die Erfassung des eintretenden Grundwasservolumenstroms, für die ab Vorversuch 6 ein geeignetes, zeitlich hoch aufgelöst (Sekundenwerte) und präzise messendes MID (magnetisch induktives Durchflussmessgerät) an Stelle des vorhandenen Ultraschallmessgeräts eingesetzt wurde, mit dem lediglich 10 s - Mittelwerte gemessen werden konnten. Zudem kam ab Vorversuch 6 ein neuer Datenlogger zur zentralen Erfassung aller Messwerte an Stelle der zwei bis dato verwendeten Datenlogger zum Einsatz, die jeweils die Verwendung mehrerer Steckkarten erforderten. Damit wird eine kontinuierliche und simultane Erfassung aller Messwerte ermöglicht. Auch die Vorversuche 6 und 7 können ebenso wie die Vorversuche 2 bis 4 und die folgenden Technikumsversuche 22 bis 25 zur Überprüfung des Berechnungstools aus Abschnitt 7.4 herangezogen werden.

7.10.1. Vorversuch 3

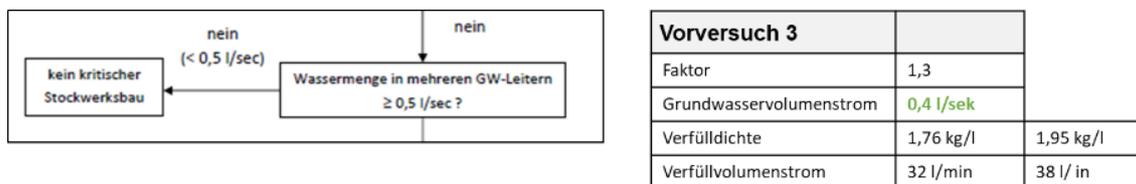
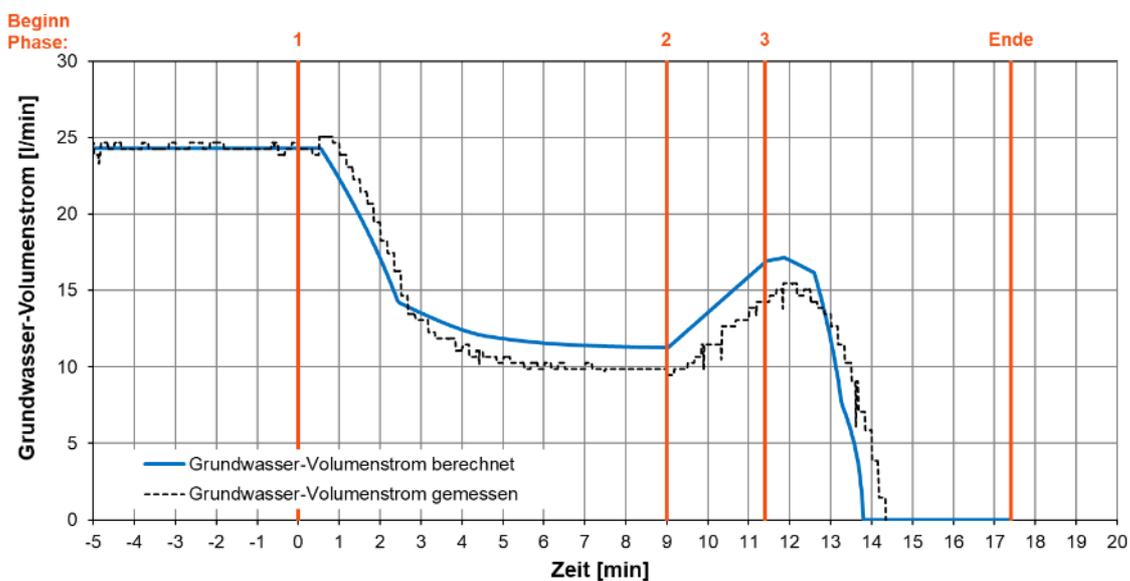


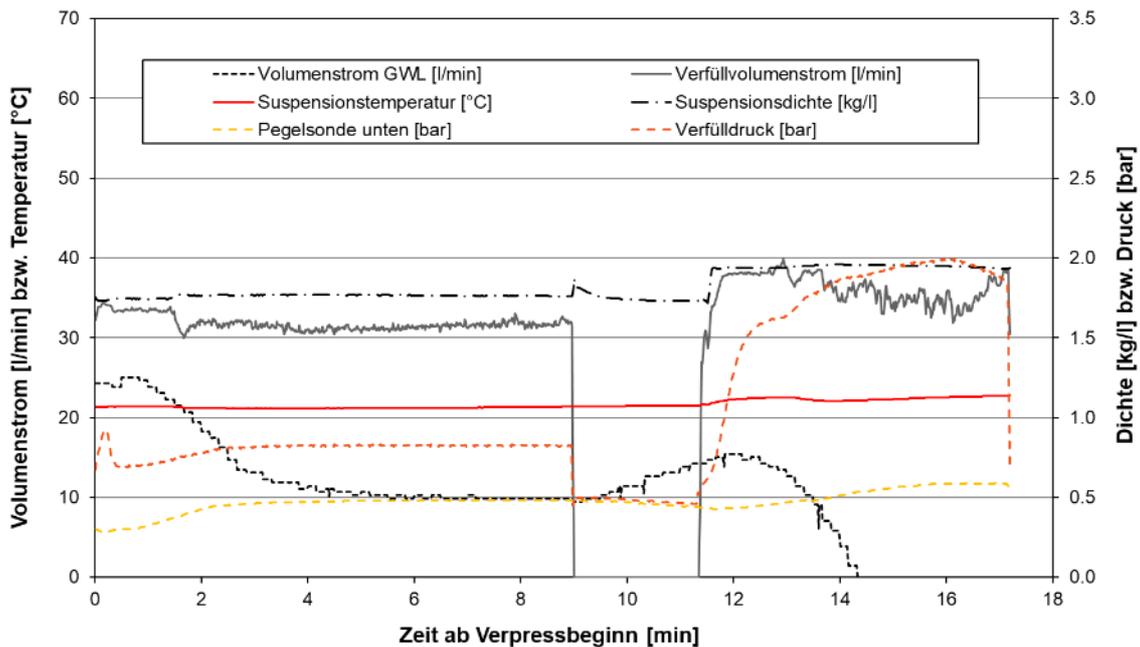
Abbildung 7-32 und Abbildung 7-33 zeigen den Vorversuch 3, einen Verfüllvorgang der in 3 Phasen mit 2 Verfüllzeiträumen und unterschiedlichen Suspensionsdichten untergliedert ist und aufgrund des geringen GW-Volumenstrom ($< 0,5$ l/sec) nach LQS-Bewertungsmatrix als unkritisch eingestuft wird. In Phase 1 kann das Bohrloch mit dem gegebenen Verfüllvolumenstrom von 32 l/sec und einer Suspensionsdichte von 1,76 kg/l nicht abgedichtet werden. Phase 2 stellt eine Unterbrechung der Verfüllung dar, in der es zu einem Wiederanstieg des eintretenden Grundwasservolumenstroms kommt, als logische Konsequenz der Abnahme der im Bohrloch befindlichen, durchschnittlichen. Erst durch das Verpressen mit einer höheren Suspensionsdichte kann das Bohrloch in Phase 3 abgedichtet werden. In Abbildung 7-32 wird der Vergleich von gemessenem und berechnetem Grundwasservolumenstrom gezogen. Es zeigen sich nahezu kongruente Kurvenverläufe die sich hauptsächlich durch einen zeitlichen Versatz von etwa 20 Sekunden unterscheiden.

Sämtliche, während der Messung aufgezeichneten Daten ab Phase 1 sind in Abbildung 7-33 dargestellt. Auf Höhe des GW-Einlasses ist im Bohrloch ein Drucksensor (Pegelsonde unten) eingebaut. Sobald die Suspension im Bohrloch über die Höhe des Grundwasseeinlasses ansteigt, steigt der hydrostatische Druck der darüber liegenden Verfüllsäule an (gelb gestrichelt). Auch der Verfülldruck (orange gestrichelt) der Injektionspumpe steigt mit zunehmender Suspensionskonzentration im Bohrloch. Während der Verfüllpause in Phase 2 gleichen sich die gemessenen Drücke von Pegelsonde und Verfülldruck an, da sie auf gleicher Höhe liegen. Der Baustoff höherer Dichte in Phase 3 weist eine geringere Fließfähigkeit auf, sodass der Verfülldruck deutlich ansteigt.



	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
Verpressvolumenstrom [l/min]	32,0		38			
Suspensionsdichte [kg/l]	1,76		1,95			

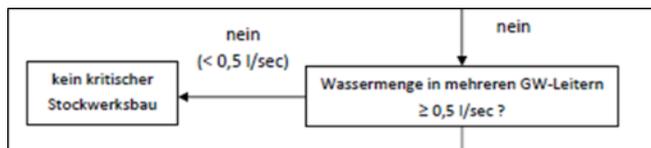
Abbildung 7-32: Vergleich des mit dem Berechnungstool aus Abschnitt 7.4 berechneten Grundwasservolumenstroms und des gemessenen Grundwasservolumenstroms aus Vorversuch 3



Verpressdauer: 14.9 min Mittlere Verfüllvolumenstrom: 33.3 l/min
 Mittlere Suspensionsdichte: 1.83 kg/l Mittlere Suspensionsdichte: 21.7 °C Eingebrahtes Suspensionsvolumen: 495 l

Abbildung 7-33: Messdaten des Vorversuchs 3. GWL: Grundwasserleiter

7.10.2. Vorversuch 6



Vorversuch 6	
Faktor	unkritisch
Grundwasservolumenstrom	0,25 l/sec
Verfülldichte	1,99 kg/l
Verfüllvolumenstrom	48,6 l/min

Versuch 6 stellt einen zweiten unkritischen Fall da, bei dem von Beginn an mit einer hohen Suspensionsdichte von 1,99 kg/l verfüllt wurde. Zusammen mit dem Verfüllvolumenstrom von 48,6 l/min wird das Bohrloch des Technikumversuchs innerhalb von ca. 45 Sekunden abgedichtet. Bei dem Versuch war die Leitung zw. Coriolis-Messgerät und Bohrloch zu Beginn vermutlich luftgefüllt. Durch das Einpumpen der Luft ins Bohrloch nach dem Einschalten der Verpresspumpe steigt der GW-Volumenstrom zunächst an (Abbildung 7-35, gestrichelt). Dies geschieht als Folge der verminderten durchschnittlichen Dichte im Bohrloch und der damit einhergehenden Reduktion des hydrostatischen Drucks auf Höhe des GW-Zuflusses (Abbildung 7-35, gelb gestrichelt). Bei den darauffolgenden Versuchen wurde diese Verbindungsleitung vor dem Versuch deshalb mit Wasser gefüllt. Die Grundaussagen dieses Versuches sind dadurch jedoch nicht beeinflusst. So konnte das Berechnungstool den Verlauf der Bohrlochabdichtung präzise nachbilden nachdem die Luft aus dem Bohrloch entwichen war.

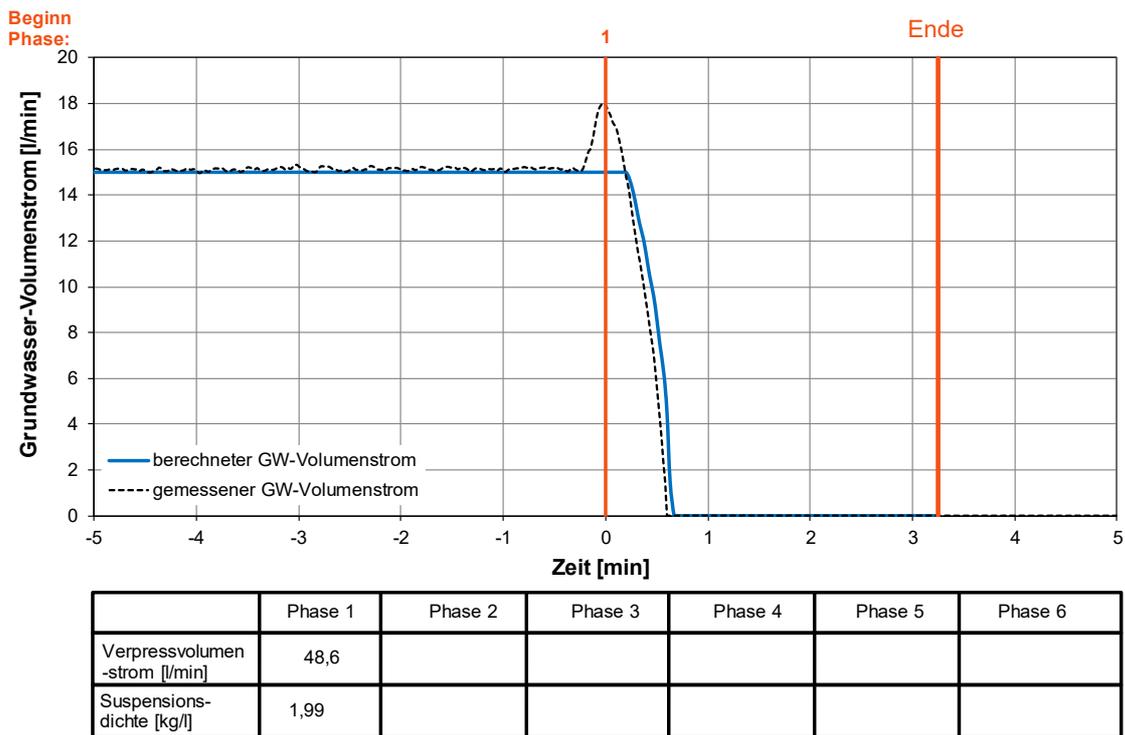


Abbildung 7-34: Vergleich des mit dem Berechnungstool aus Abschnitt 7.4 berechneten Grundwasservolumenstroms und des gemessenen Grundwasservolumenstroms für Vorversuch 6. GW: Grundwasser

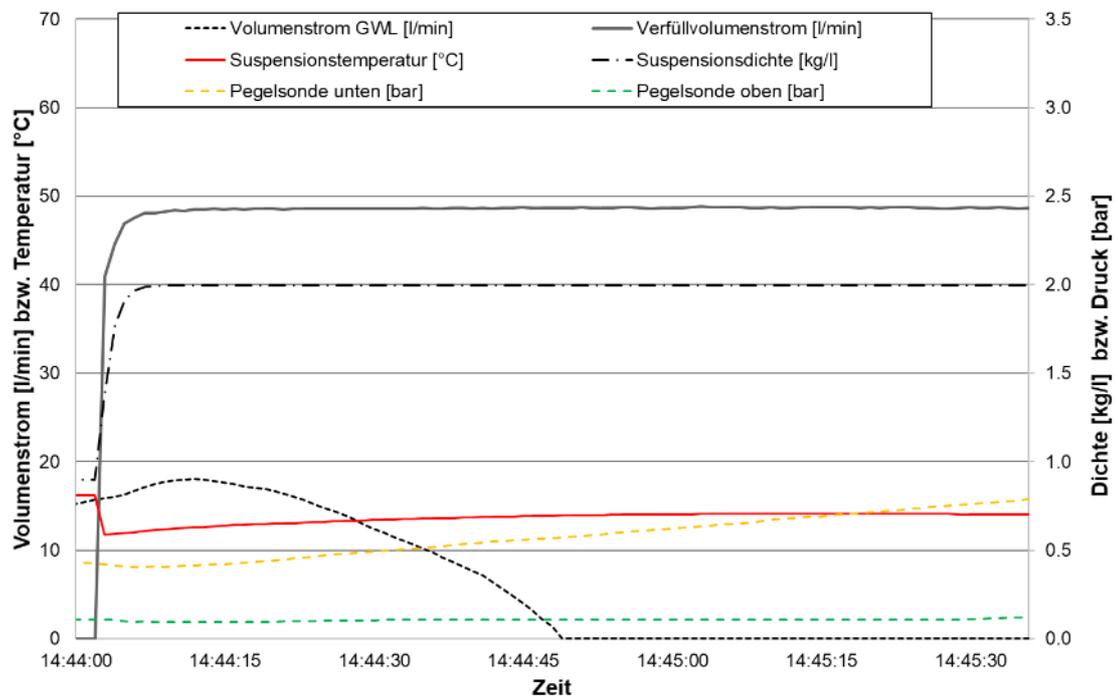
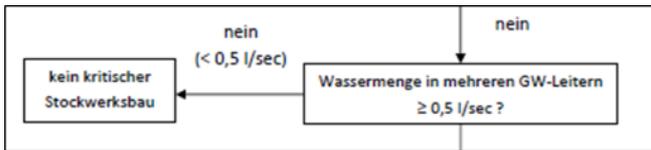


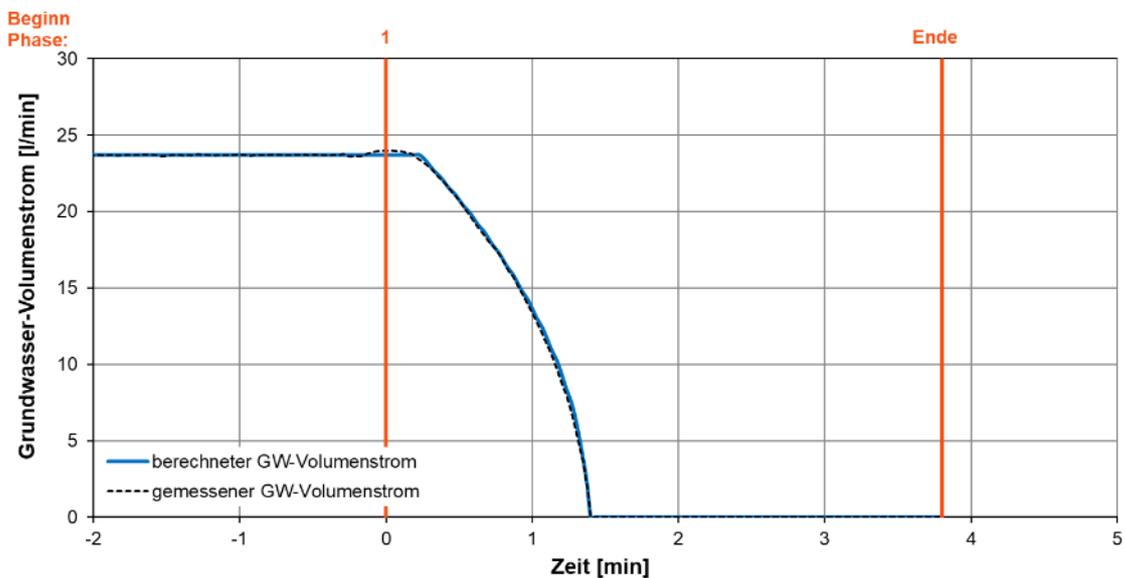
Abbildung 7-35: Messdaten des Vorversuchs 6. GWL: Grundwasserleiter

7.10.3. Vorversuch 7



Vorversuch 7	
Faktor	unkritisch
Grundwasservolumenstrom	0,4 l/sec
Verfülldichte	1,82 kg/l
Verfüllvolumenstrom	45,1 l/min

Vorversuch 7 bildet eine Versuchskonfiguration, bei der sowohl der, als auch der Grundwasservolumenstrom als unkritisch nach Faktor nach LQEWS-Matrix einzustufen ist. Der gemessene Grundwasservolumenstrom steigt zu Verfüllbeginn leicht an, da das Schlauchsystem zwischen Bohrloch und Verpresspumpe nicht zur Gänze entlüftet werden konnte (Abbildung 7-36, Abbildung 7-37). Der Effekt ist deutlich geringer ausgeprägt als in Vorversuch 6 (Vergleich Abbildung 7-35). Das Berechnungstool zeichnet den Abdichtungsverlauf nahezu exakt nach.



	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
Verpressvolumenstrom [l/min]	45.1					
Suspensionsdichte [kg/l]	1.82					

Abbildung 7-36: Vergleich des mit dem Berechnungstool aus Abschnitt 7.4 berechneten Grundwasservolumenstroms und des gemessenen Grundwasservolumenstroms für Vorversuch 7

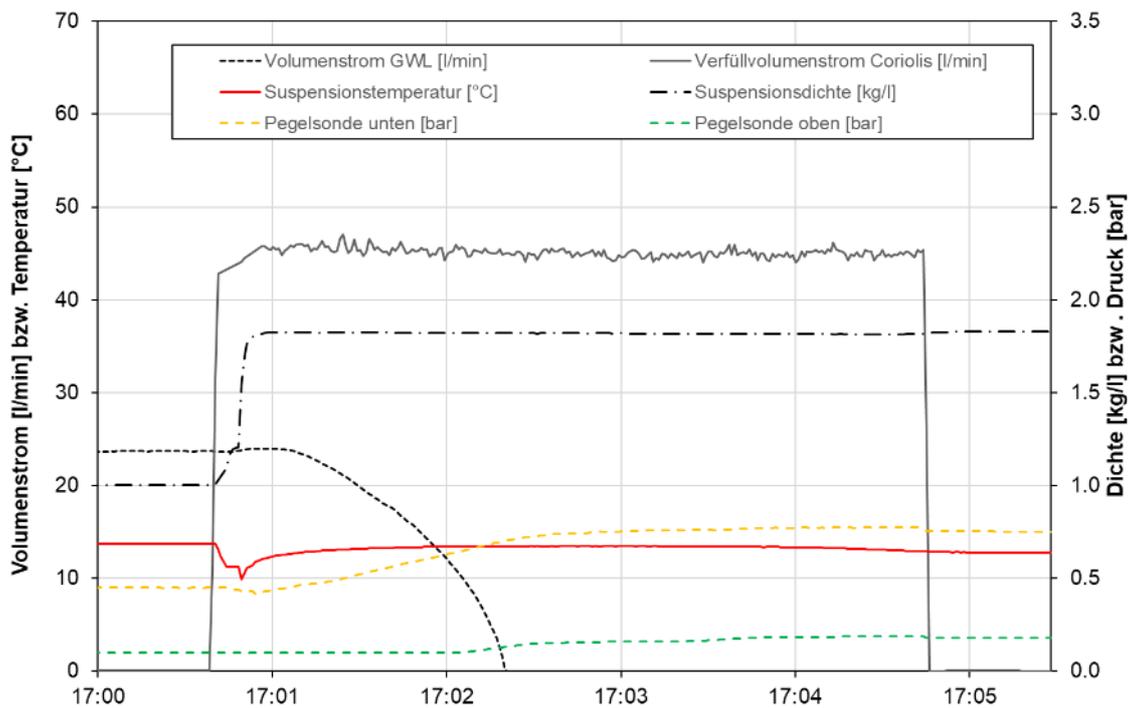
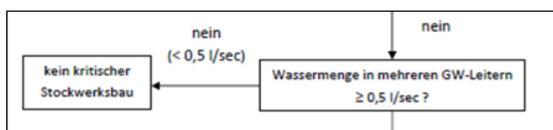


Abbildung 7-37: Messdaten des Vorversuchs 7. GWL: Grundwasserleiter

7.10.4. Versuch 023



Versuch 023			
Faktor	unkritisch		
Grundwasservolumenstrom	0,42 l/sec		
Verfülldichte	1,54 kg/l	1,54 kg/l	1,94 kg/l
Verfüllvolumenstrom	40 l/min	65 l/min	65 l/min

Die Intention bei diesem Versuch war es, das sogenannte „Totpumpen“ versuchstechnisch nachzubilden. In Phase 1 und 2 sollte das Abdichten auf Grund einer zu geringen Dichte nicht möglich werden. Erst durch den Einsatz einer Verfüllung mit hoher Dichte in Phase 3 sollte dies gelingen. Während des Versuchs kam es jedoch zu einem Aufstauen von Suspension über das Niveau des Ablaufs. Dadurch stieg der Druck auf Anbohrhöhe höher als im Berechnungsmodell angedacht und es wurde unbeabsichtigt abgedichtet. Dieses Verhalten wurde durch eine nachträgliche manuelle Anpassung im Berechnungsmodell berücksichtigt. Dadurch wird einerseits deutlich, dass das Berechnungsmodell auch für leicht geänderte Randbedingungen zuverlässige Ergebnisse liefert. Auf der anderen Seite wird auch die Sensibilität des Systems in Bezug auf das Gelingen einer Abdichtung aufgezeigt.

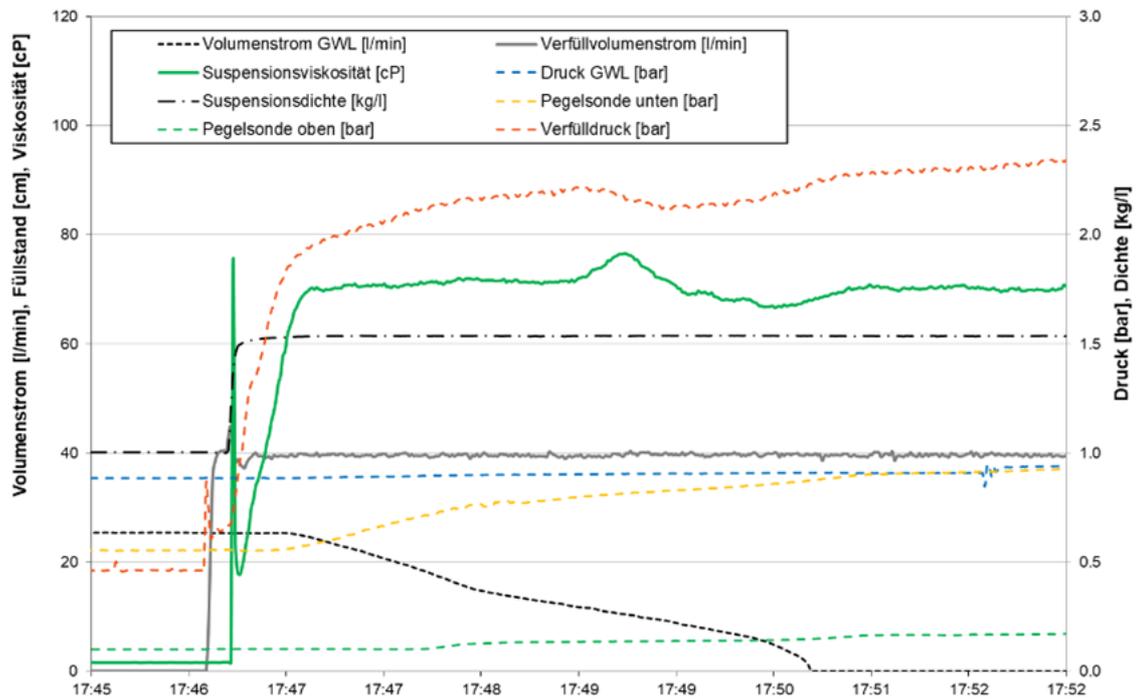


Abbildung 7-38: Messdaten Versuch 023

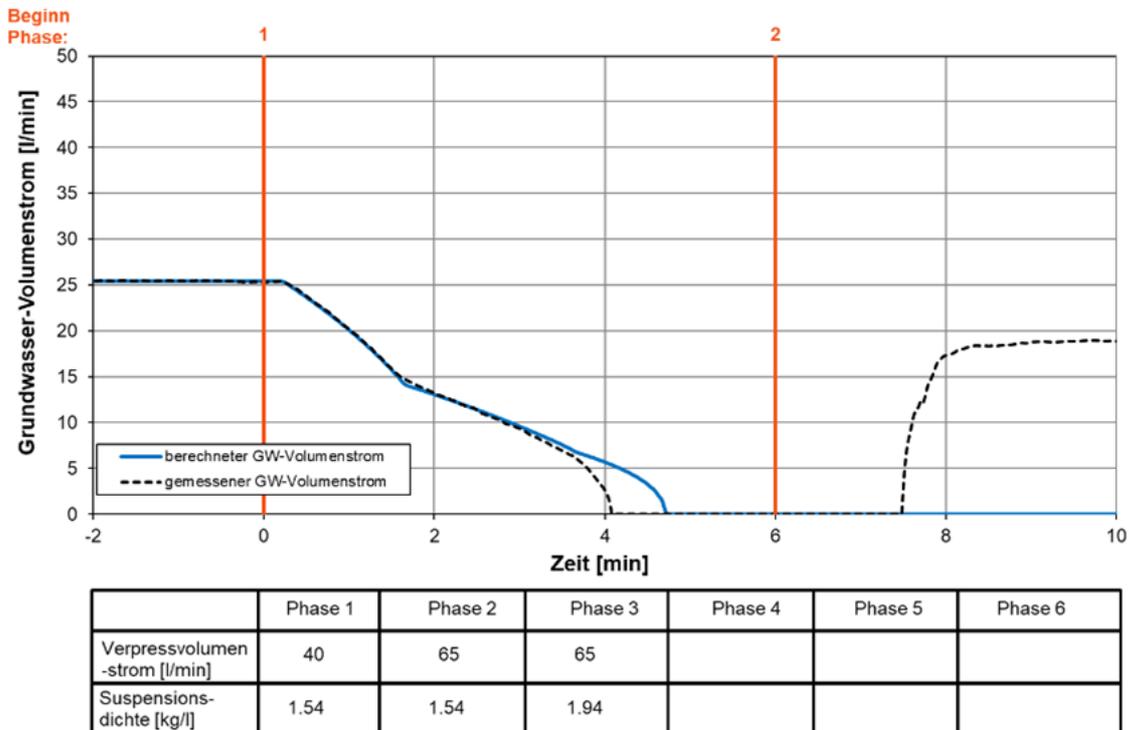
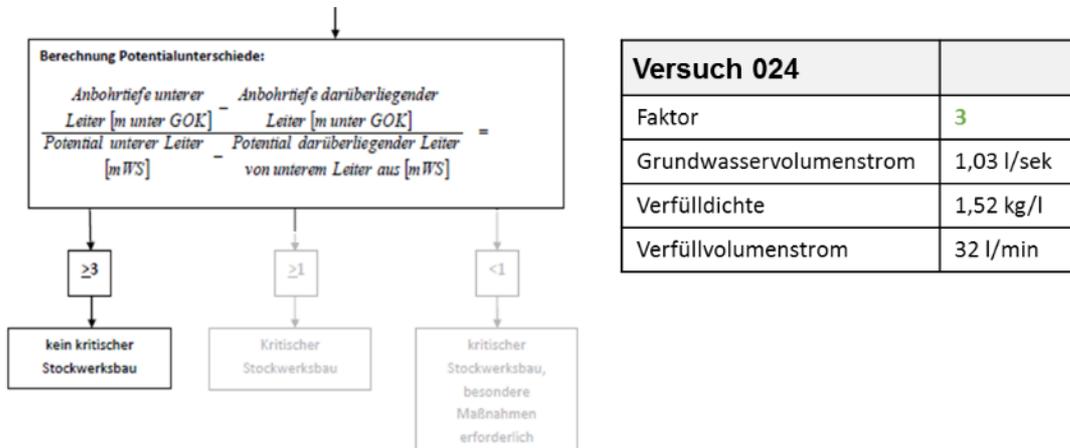


Abbildung 7-39: Vergleich des in Abhängigkeit des Verfüllvolumenstroms und der Suspensionsdichte mit dem angepassten Berechnungsmodell vorhergesagten Verlaufs des Grundwasservolumenstroms mit dem während des Versuchs 023 tatsächlich gemessenen Grundwasservolumenstrom

7.10.5. Versuch 024



Versuch 024 stellt mit dem Faktor 3 der Entscheidungsmatrix einen unkritischen Fall dar und liegt gleichzeitig am Übergang zum kritischen Stockwerksbau. Der ursprünglich geplante Verfüllvolumenstrom betrug 25 l/min. Dies ist der angegebene Minimalwert der Injektionsmaschine. Tatsächlich fiel der Verfüll-Volumenstrom jedoch schlagartig ab, sobald die Maschine auf unter 33 l/min geregelt wurde (Abbildung 7-40, grau). Da der Versuch bereits gestartet war, wurde dieser mit der veränderten Bedingung mit einem Verfüllvolumenstrom von 33 l/min durchgeführt und die Berechnung nachträglich auf die tatsächlich vorliegenden Randbedingungen angepasst.

Auf Grund des plötzlich abfallenden Verfülldrucks und der damit einhergehenden Reduktion des Verfüllvolumenstroms, lässt sich die Eigenschaft der Strukturviskosität des Baustoffs in Abbildung 7-40 erkennen. Sobald in Folge des abfallenden Verfüllvolumenstroms die Strömungsgeschwindigkeit sinkt, sinkt die Scherrate in der Suspension und die Viskosität steigt (Abbildung 7-40, grau vs. grün). Außerdem nimmt der Strömungsdruck ab.

Zwischen ca. 12:41 Uhr und 12:45 Uhr schwanken Viskosität und Verfülldruck trotz eines konstanten Verfüllvolumenstroms. Dies konnte in den vorangegangenen Versuchen bisher nicht beobachtet werden. Dieses Verhalten ist vermutlich auf eine Beeinflussung des Messsignals durch den Magnetit des eingesetzten Baustoffs zurückzuführen oder auf eine inhomogene Anmischung. Dies konnte bei einer Sichtkontrolle vor Versuchsstart nicht festgestellt werden.

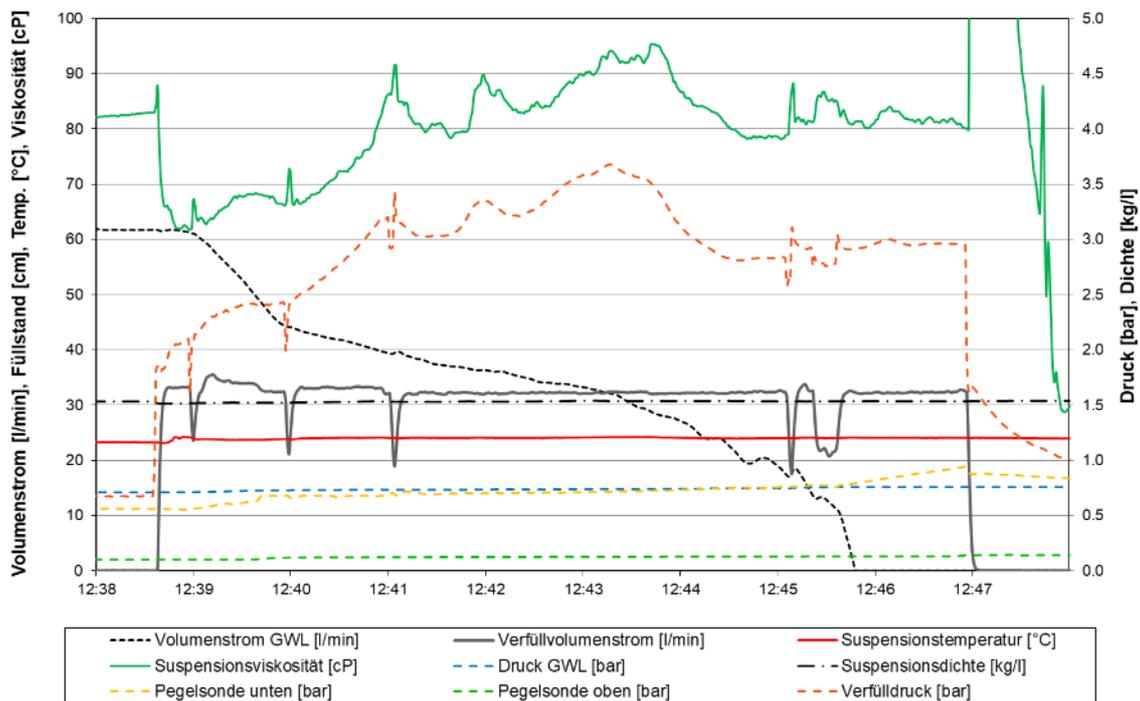


Abbildung 7-40: Messdaten Versuch 024. GWL: Grundwasserleiter

Auf Grund schwankender Versuchsrandbedingungen ist die Übereinstimmung zwischen der berechneten und der gemessenen Kurve des Grundwasservolumenstromes nicht so hoch wie in den vorangegangenen Versuchen. Dennoch ist eine Abdichtung des Grundwasservolumenstroms zu erreichen (Abbildung 7-41). Der Zeitversatz zum Zeitpunkt der Abdichtung zwischen Berechnung und tatsächlichem Verlauf beträgt in diesem Versuch ca. 1 Minute. Zum Zeitpunkt der Abdichtung herrscht ein Dichteprofil wie in Abbildung 7-42 zu sehen (orange). Es muss danach weitere 3,5 Minuten weiter verfüllt werden, bis die obertägig austretende Suspension die Dichte der eingepumpten Suspension erreicht. Bei einer Übertragung des Szenarios auf eine reale Verfüllung würde kein kritischer Zustand auftreten und der GWL ordnungsgemäß abgedichtet. Die Bohrung würde nach der bereits erfolgten Abdichtung wie in der LQS EWS gefordert noch so lange weiterverfüllt werden, bis die obertägig austretende Suspension die Dichte der eingepumpten Suspension (1,52 kg/l) erreicht hat. Damit ist die Abdichtung gewährleistet. Das berechnete Dichteprofil im Bohrloch zum Zeitpunkt der Abdichtung und zum Ende der Verfüllung ist in Abbildung 7-42 dargestellt.

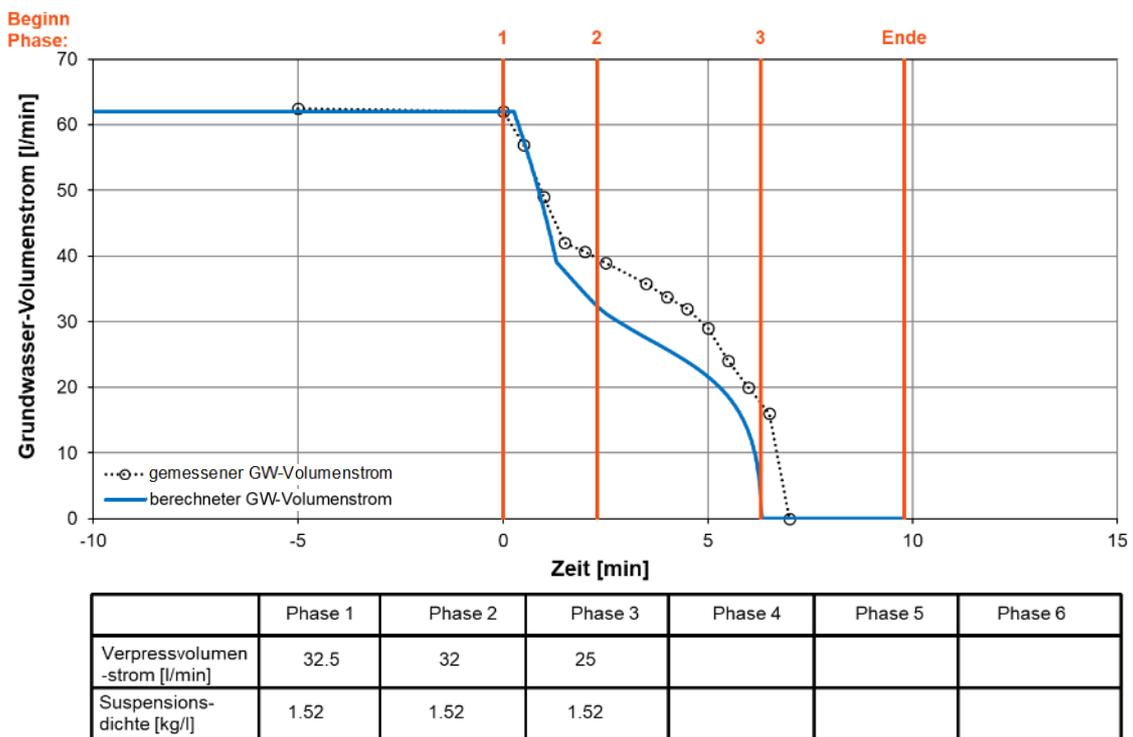


Abbildung 7-41: Vergleich des in Abhängigkeit des Verfüllvolumenstroms und der Suspensionsdichte mit dem Berechnungstool vorhergesagten Verlaufs des Grundwasservolumenstroms mit dem während des Versuchs 024 tatsächlich gemessenen Grundwasservolumen

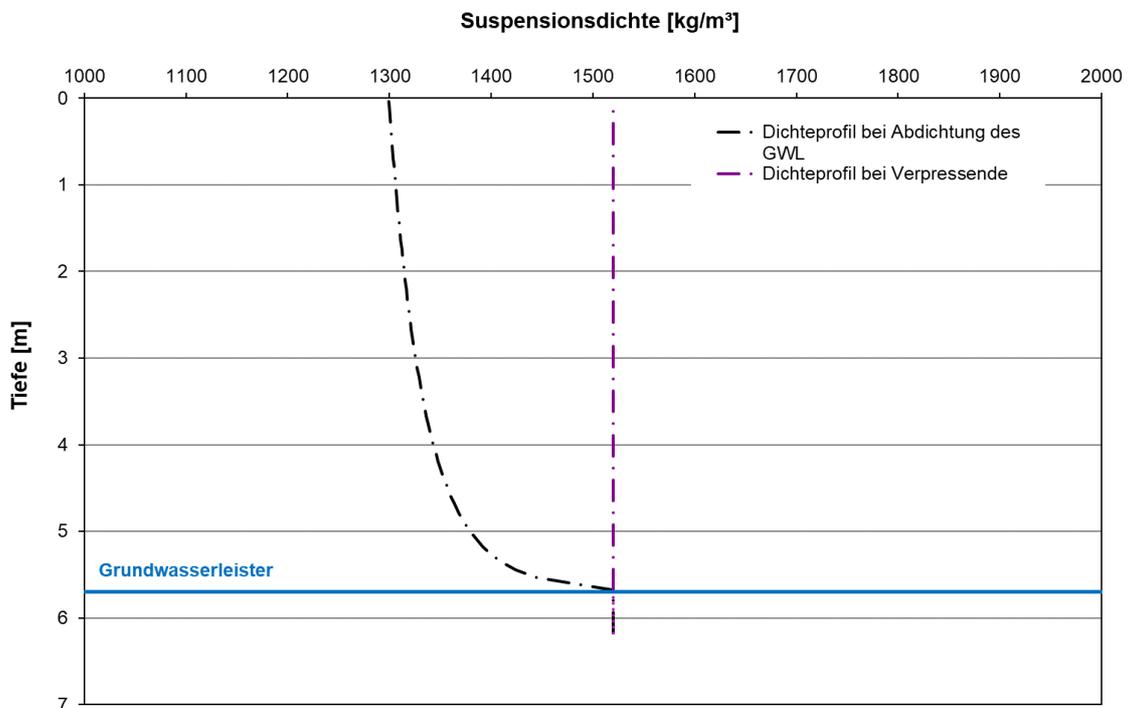
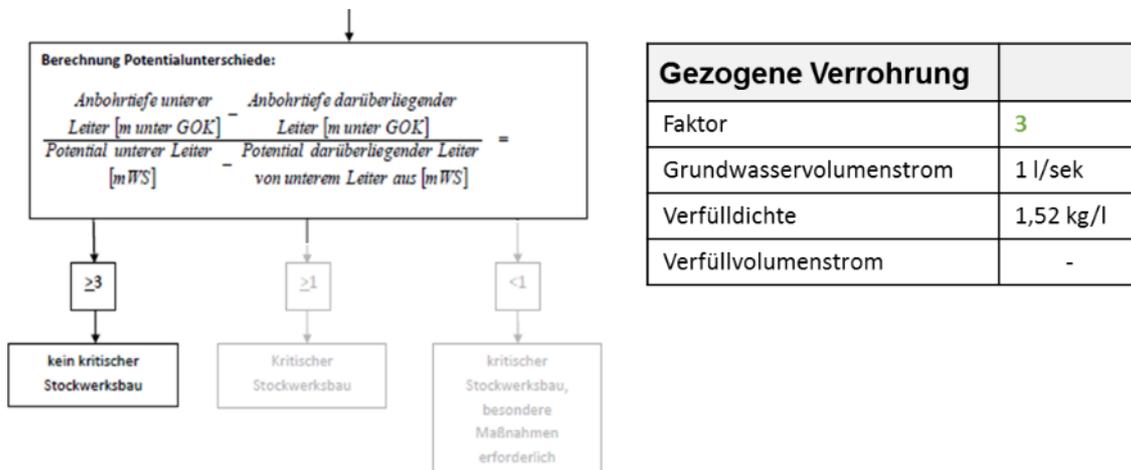


Abbildung 7-42: Berechnete Dichteprofile in der Verfüllsäule zum Zeitpunkt der Abdichtung des Grundwasserleiters und zum Verpressende des Versuchs 024

7.10.6. Versuch 025 (gezogene Verrohrung)



„In Baden-Württemberg werden 90% aller Erdwärmesondenbohrungen im Imlochhammerverfahren hergestellt. In Lockergesteinen bzw. geklüftetem Gestein wird i.d.R. zur Stabilisierung der Bohrlochwandung mit einer Schutzverrohrung gebohrt. Die Schutzverrohrung wird in bindigen Boden oder Fels eingebunden. Die Verrohrung wird nach der Verpressung aus dem Bohrloch gezogen.“ (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg, [06/19])

Die Schutzverrohrung soll dabei einen Suspensionsverlust verhindern, außerdem unterbindet sie im Falle eines angebohrten Aquifers auch den Grundwasserzutritt ins Bohrloch. In Anlage 5 der LQS EWS wird eine verbindliche Arbeitsanweisung „zur Verfüllung von Erdwärmesondenbohrungen beim Auftritt von Suspensionsverlusten“ gegeben. Darin heißt es, dass „mindestens die doppelte Strecke der geplanten Ausbaulänge der Hilfsverrohrung zu füllen“ ist (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg, [06/19]), Anlage 5 [09/15]).

Zur Nachbildung des Szenarios des Ziehens einer Bohrverrohrung bei anstehendem aufsteigendem Grundwasserpotential wurde der Versuch 025 durchgeführt. Bei allen vorherigen Versuchen wurde die Verfüllung bei bereits ins Bohrloch einströmendem Grundwasserstrom begonnen. In diesem Szenario 025 jedoch wurde das Bohrloch zuerst vollständig verfüllt, erst dann wurde der Grundwasserzustrom geöffnet. Dies stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Hilfsverrohrung über die Unterkante des Aquifers herausgezogen wird.

Anhand von Abbildung 7-43 ist zu erkennen, dass diese Vorgehensweise im Rahmen des Technikumsversuch zu rechtfertigen ist. Es kann kein Grundwasserzustrom ins Bohrloch gemessen werden, nachdem das Bohrloch bereits vollständig gefüllt worden ist.

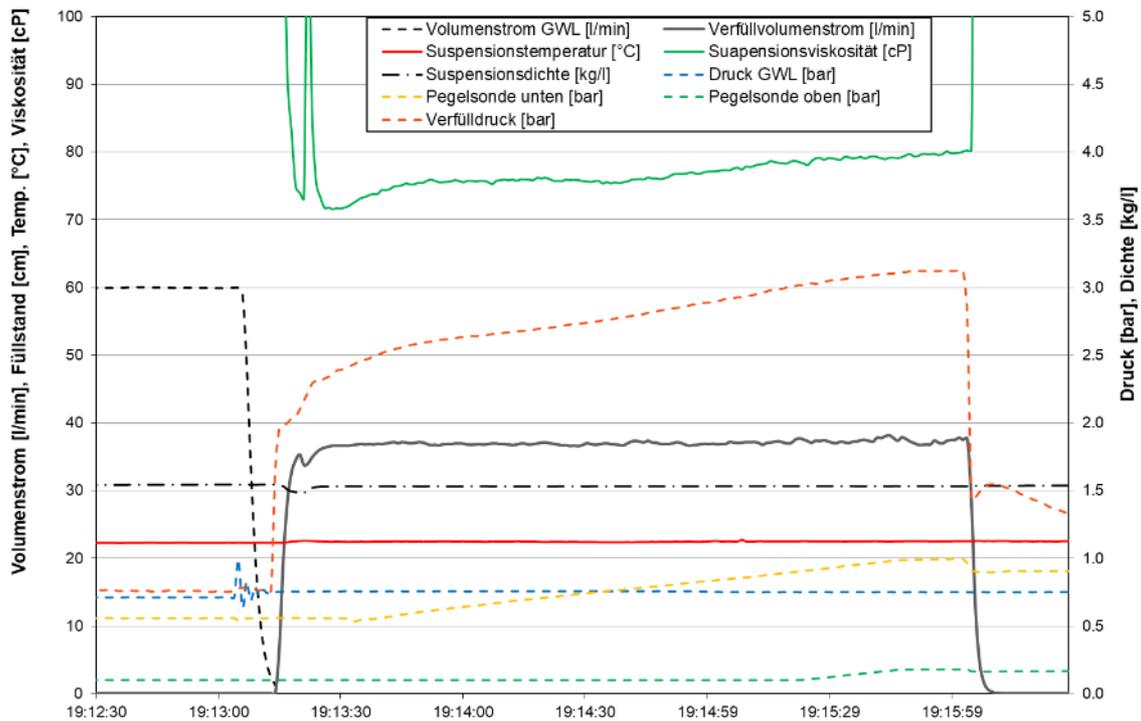
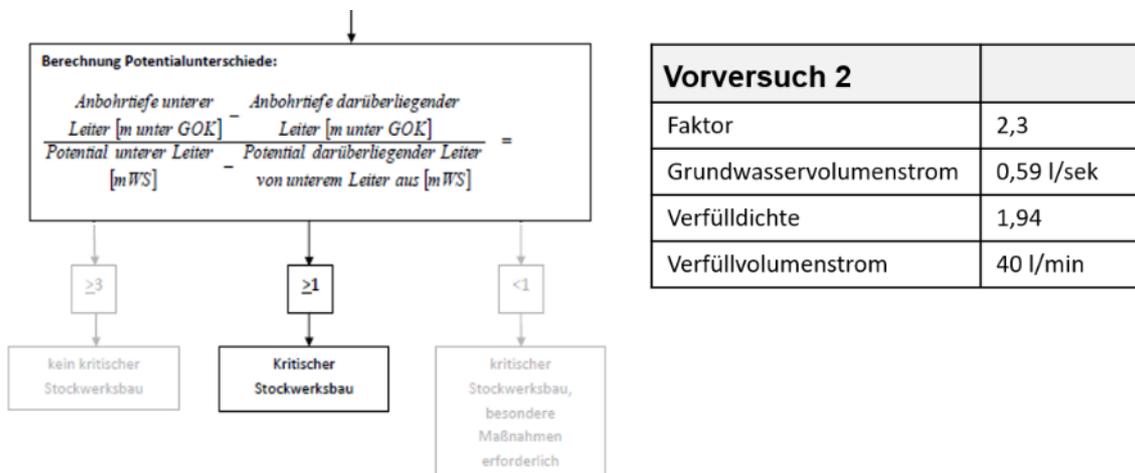


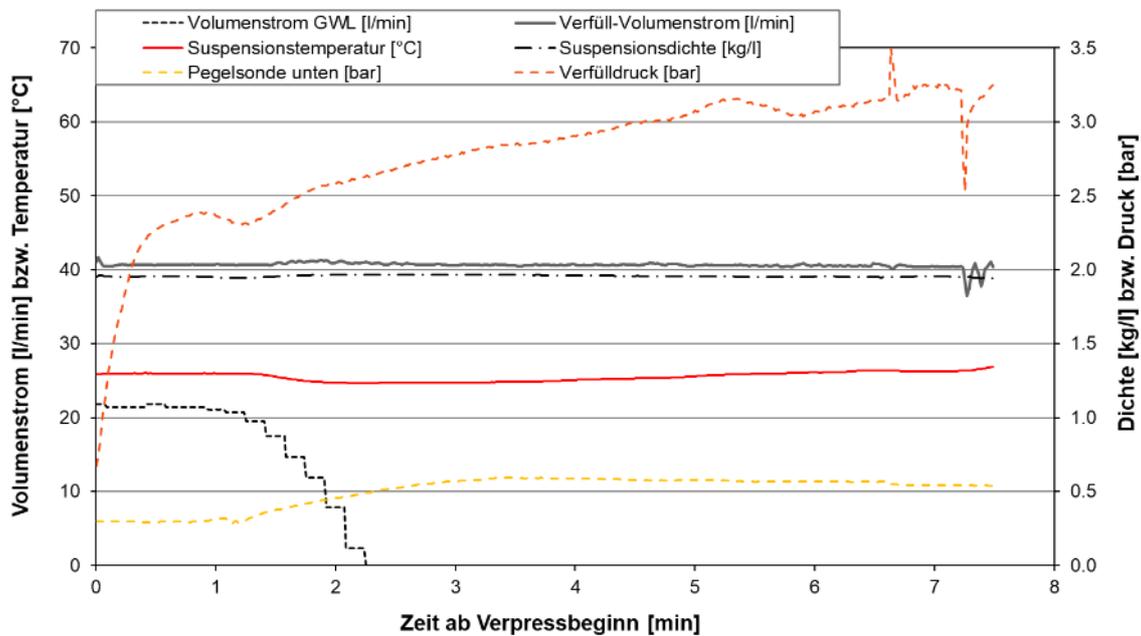
Abbildung 7-43: Messdaten Versuch 025

7.10.7. Vorversuch 2



Vorversuch 2 stellt einen kritischen Stockwerksbau bei einem moderaten Grundwasservolumenstrom von 0,59 l/min nach. Abbildung 7-44 zeigt den Versuchsverlauf in dem zu erkennen ist, dass das Bohrloch bei einem konstanten Verfüll-Volumenstrom (graue Linie) von 40 l/min und einer Suspensionsdichte von 1,94 kg/l (schwarze Linie gestrichelt) nach ca. 2 min abgedichtet werden konnte. Der Anstieg der mittleren Dichte im Bohrloch spiegelt sich im hydrostatischen Druckanstieg der unteren Pegelsonde (gelb gestrichelt) auf Höhe des Grundwasserzutritts wieder.

Der Vergleich des gemessenen, ins Bohrloch strömenden Grundwasser-Volumenstroms mit dem durch das Berechnungstoll simulierten zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 7-45). Es besteht lediglich ein zeitlicher Versatz von ca. 20 Sekunden



Verpressdauer: 7.5 min

Mittlere

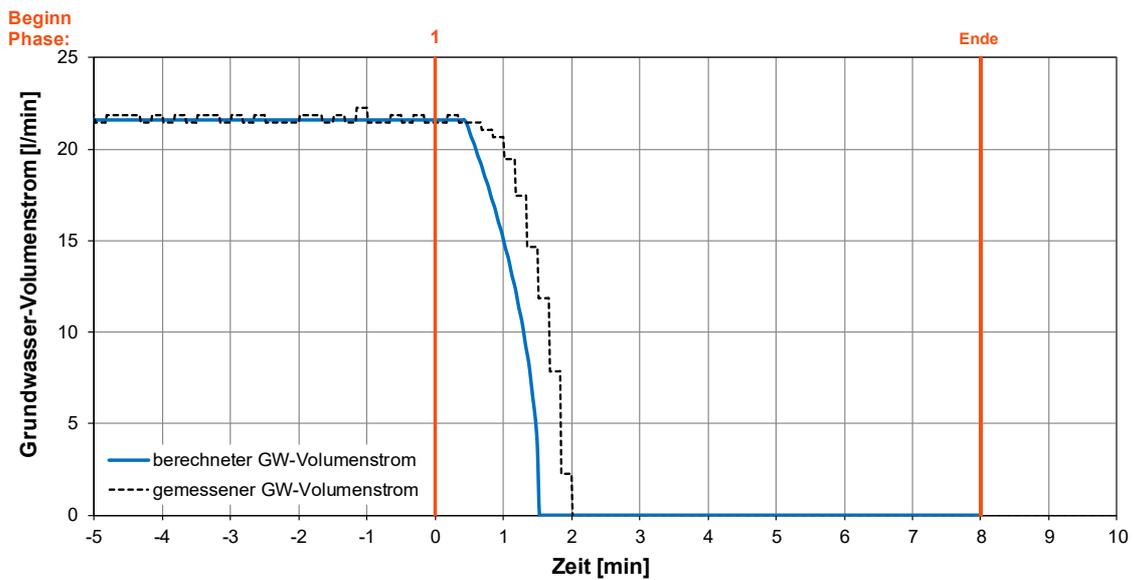
Mittlerer Verpressvolumenstrom: 40.6 l/min

Mittlere Suspensionsdichte: 1.96 kg/l

Mittlere Suspensionstemperatur: 25.5 °C

Eingebrachtes Suspensionsvolumen: 305 l

Abbildung 7-44: Messdaten Vorversuch 2



	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
Verpressvolumenstrom [l/min]	40,6					
Suspensionsdichte [kg/l]	1,96					

Abbildung 7-45: Vergleich des mit dem Berechnungstool aus Abschnitt 7.4 berechneten Grundwasservolumenstroms und des gemessenen Grundwasservolumenstroms für Vorversuch 2

7.10.8. Vorversuch 4

↓

Berechnung Potentialunterschiede:

$$\frac{\text{Anbohrtiefe unterer Leiter [m unter GOK]} - \text{Anbohrtiefe darüberliegender Leiter [m unter GOK]}}{\text{Potential unterer Leiter [mWS]} - \text{Potential darüberliegender Leiter von unterem Leiter aus [mWS]}} =$$

≥3

kein kritischer Stockwerksbau

≥1

Kritischer Stockwerksbau

<1

kritischer Stockwerksbau, besondere Maßnahmen erforderlich

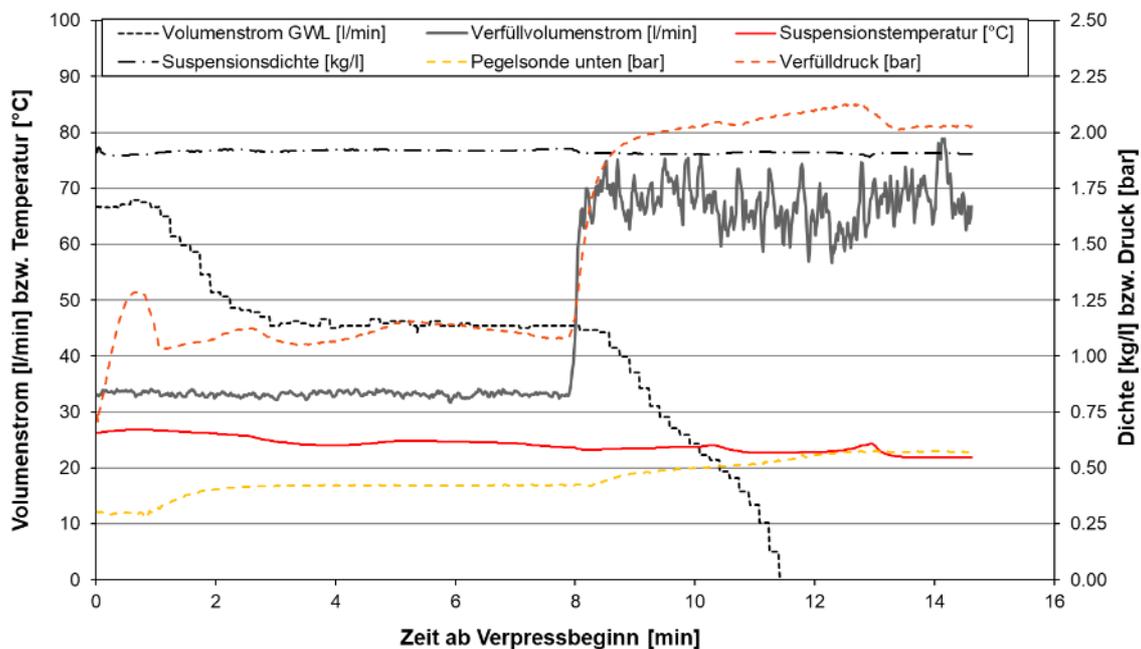
Vorversuch 4	
Faktor	1,4
Grundwasservolumenstrom	1,12 l/sek
Verfülldichte	1,92 kg/l
Verfüllvolumenstrom	33 & 65 l/min

Vorversuch 4 stellt eine Bohrung bei kritischem Stockwerksbau und hohem Grundwasservolumenstrom von 1,12 l/min nach, die in zwei Phasen mit unterschiedlichen Verfüllvolumenströmen verfüllt wurde. Abbildung 7-46 zeigt den Versuchsverlauf in dem zu erkennen ist, dass das Bohrloch bei einem konstanten Verfüll-Volumenstrom (graue Linie) von 33 l/min und einer Suspensionsdichte von 1,94 kg/l (schwarze Linie gestrichelt) nicht abgedichtet werden konnte. Nach einem

Verfüllzeitraum von 8 min wurde der Verfüll-Volumenstrom auf 65 l/min erhöht, wodurch das Bohrloch nach weiteren 3,5 min abgedichtet wurde.

Der Anstieg der mittleren Dichte im Bohrloch oberhalb von 3 m Tiefe der beiden Phasen spiegelt sich im hydrostatischen Druckanstieg der unteren Pegelsonde (gelb gestrichelt) in 3 m Tiefe uGOK ab Minute 1 und Minute 8 wieder.

Der Vergleich des gemessenen, ins Bohrloch strömenden Grundwasser-Volumenstroms mit dem durch das Berechnungstoll simulierten zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 7-45). Es besteht lediglich ein zeitlicher Versatz von ca. 30 sec über den Verfüll-Zeitraum von 11 min.



Verpressdauer: 14.62 min

Mittlere Suspensionsdichte: 1.91 kg/l

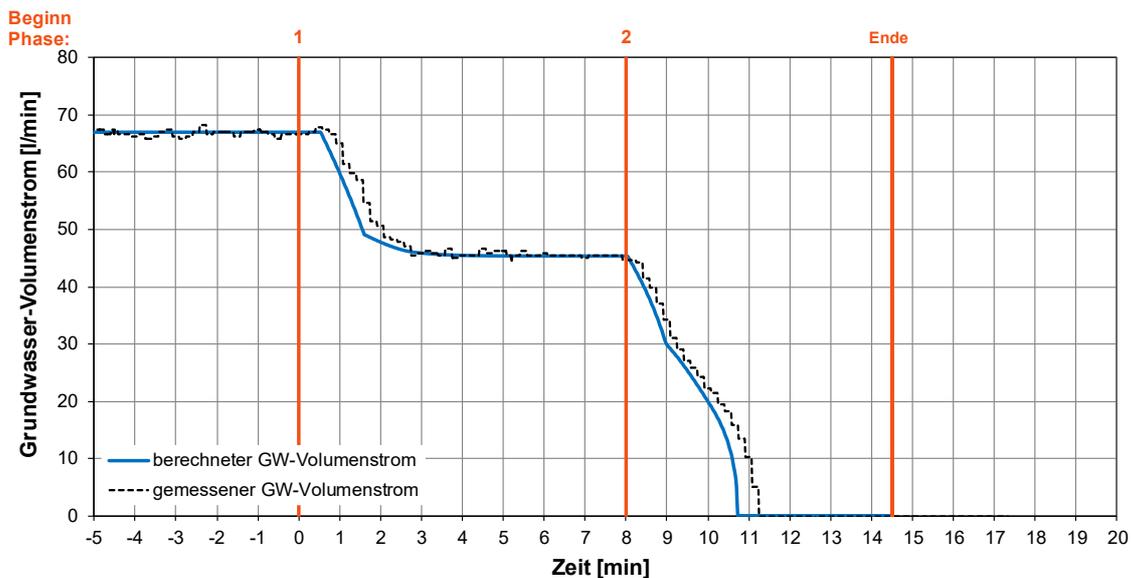
Mittlere

Suspensionstemperatur: 24.1 °C

Mittlerer Verpressvolumenstrom: 45.0 l/min

Eingebrachtes Suspensionsvolumen: 657 l

Abbildung 7-46: Messdaten Vorversuch 4



	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
Verpressvolumenstrom [l/min]	33,0	65				
Suspensionsdichte [kg/l]	1,92	1,91				

Abbildung 7-47: Vergleich des mit dem Berechnungstool aus Abschnitt 7.4 berechneten Grundwasservolumenstroms und des gemessenen Grundwasservolumenstroms für Vorversuch 4

7.10.9. Versuch 021

↓

Berechnung Potentialunterschiede:

$$\frac{\text{Anbohrtiefe unterer Leiter [m unter GOK]} - \text{Anbohrtiefe darüberliegender Leiter [m unter GOK]}}{\text{Potential unterer Leiter [mWS]} - \text{Potential darüberliegender Leiter von unterem Leiter aus [mWS]}} =$$

≥3

kein kritischer Stockwerksbau

≥1

Kritischer Stockwerksbau

<1

kritischer Stockwerksbau, besondere Maßnahmen erforderlich

Versuch 21	
Faktor	1,3
Grundwasservolumenstrom	0,67 l/sek
Verfülldichte	1,96 kg/l
Verfüllvolumenstrom	40 l/min

Versuch 021 hat das Ziel eine Bohrlochverfüllung unter kritischen Bedingungen (nach LQS EWS) nachzustellen, bei der zunächst keine erfolgreiche Abdichtung erreicht werden soll und die Abdichtung erst durch einen erhöhten Volumenstrom erfolgt. Wie Abbildung 7-48 und Abbildung 7-49 zeigt, wurde der Grundwasservolumenstrom jedoch schon in der ersten Phase gestoppt. Als Grund dafür wurde das Ansteigen der Suspension oberhalb der Bohrlochoberkante identifiziert. Da die dickflüssige Suspension nicht ausreichend schnell durch die Abflussöffnung abströmen konnte, stieg die Suspensionsäule etwa 20 cm über die Oberkante dieser Öffnung an. Dieser so

entstandene zusätzliche hydrostatische Druck führte bereits zum Abdichten des Bohrlochs. Nachdem der Suspensionsüberschuss in das Berechnungstool integriert wurde, konnte der Verlauf des Grundwasser-Volumenstroms des Versuch 021 mit hoher Übereinstimmung nachberechnet werden (Abbildung 7-49). Der Versuch zeigt damit die hohe Sensitivität des Systems. Schon leicht geänderten Randbedingungen können über das Zustandekommen eines Abdichtungserfolgs entscheiden.

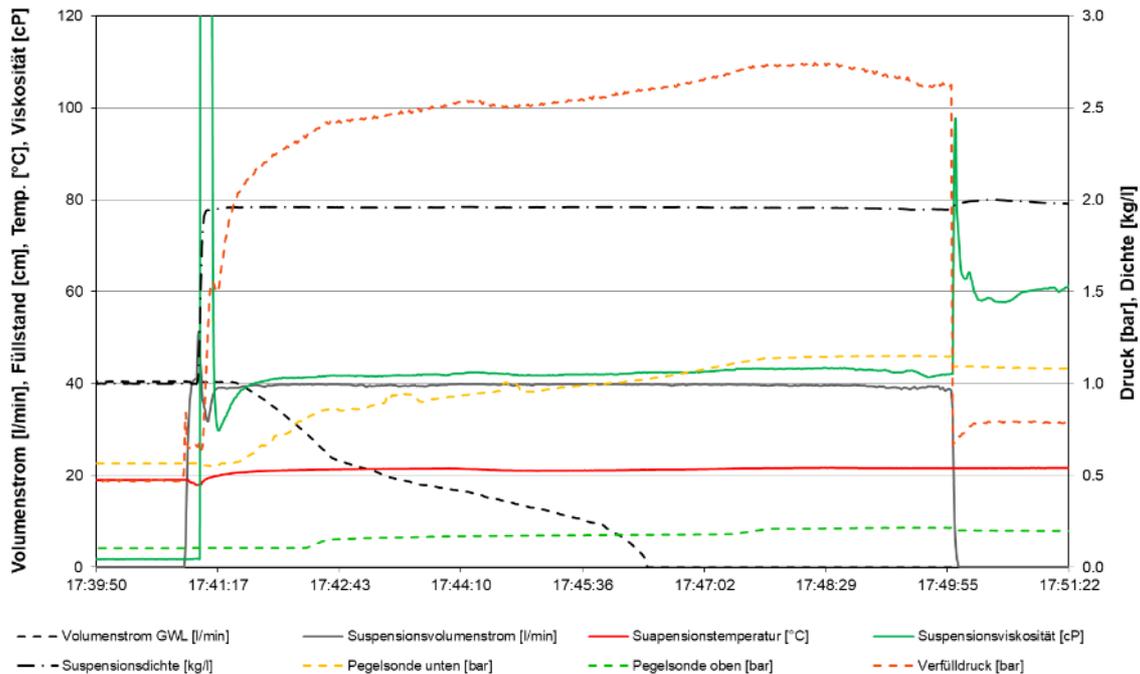


Abbildung 7-48: Messdaten Versuch 021

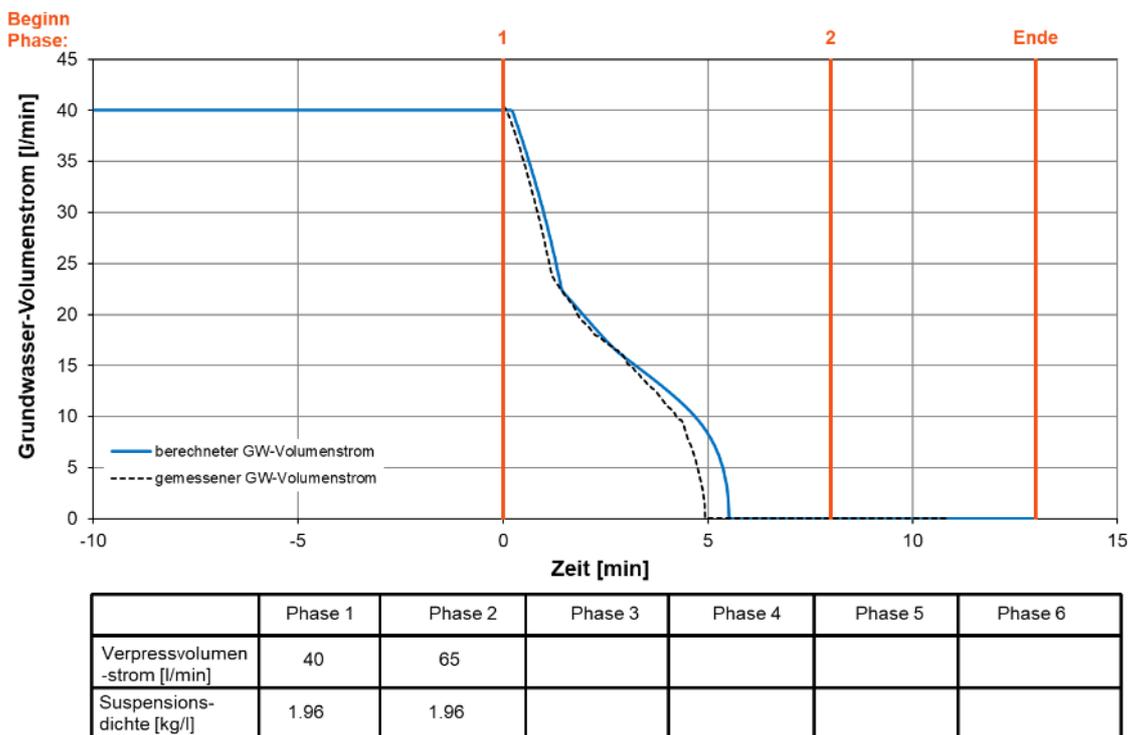
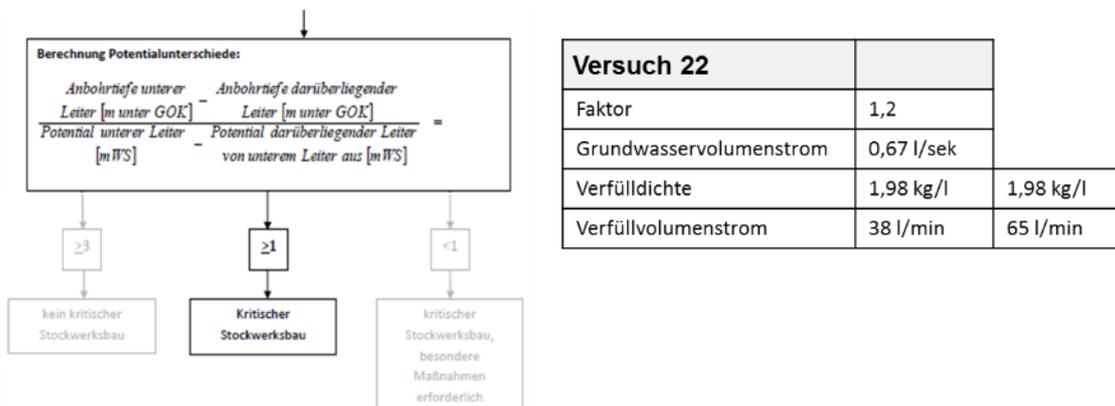


Abbildung 7-49: Vergleich des mit dem Berechnungstool aus Abschnitt 4.3.4 berechneten Grundwasservolumenstroms und des gemessenen Grundwasservolumenstroms für Versuch 021

7.10.10. Versuch 022



Nach den Erfahrungen aus Versuch 021 wurde der Versuchsstand angepasst und das ungehinderte Abfließen der Suspension an der GOK ermöglicht, in dem für den Ablauf der Suspension statt durch die Öffnung in der Rohrwandung ein Überlaufkragen angebracht wurde. In Versuch 022 lagen, in Anlehnung an den vorherigen Versuch, ähnliche hydrogeologische Bedingungen vor die lediglich leicht verändert wurden, um einem erneuten vorzeitigen Abdichten vorzubeugen. Der Verpressvolumenstrom wurde dabei von 40 l/min auf 38 l/min gesenkt und der Grundwasserdruck leicht erhöht, sodass der Bewertungsfaktor nach LQS EWS von 1,3 auf 1,2 sinkt. Wie Abbildung 7-50 und Abbildung 7-51 zeigen, konnte in Phase 1 nicht abgedichtet werden, eine Abdichtung erfolgt erst durch einen erhöhten Verpressvolumenstrom in Phase 2.

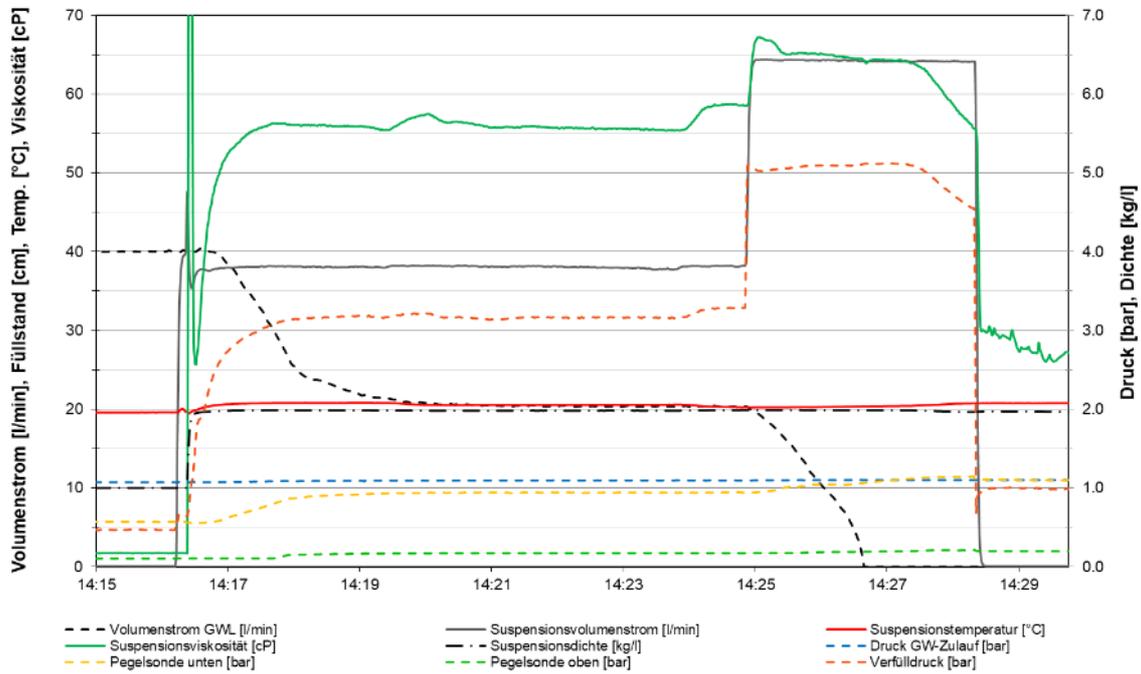


Abbildung 7-50: Messdaten Versuch 022 (Versuch mit dem Referenzbaustoff M4)

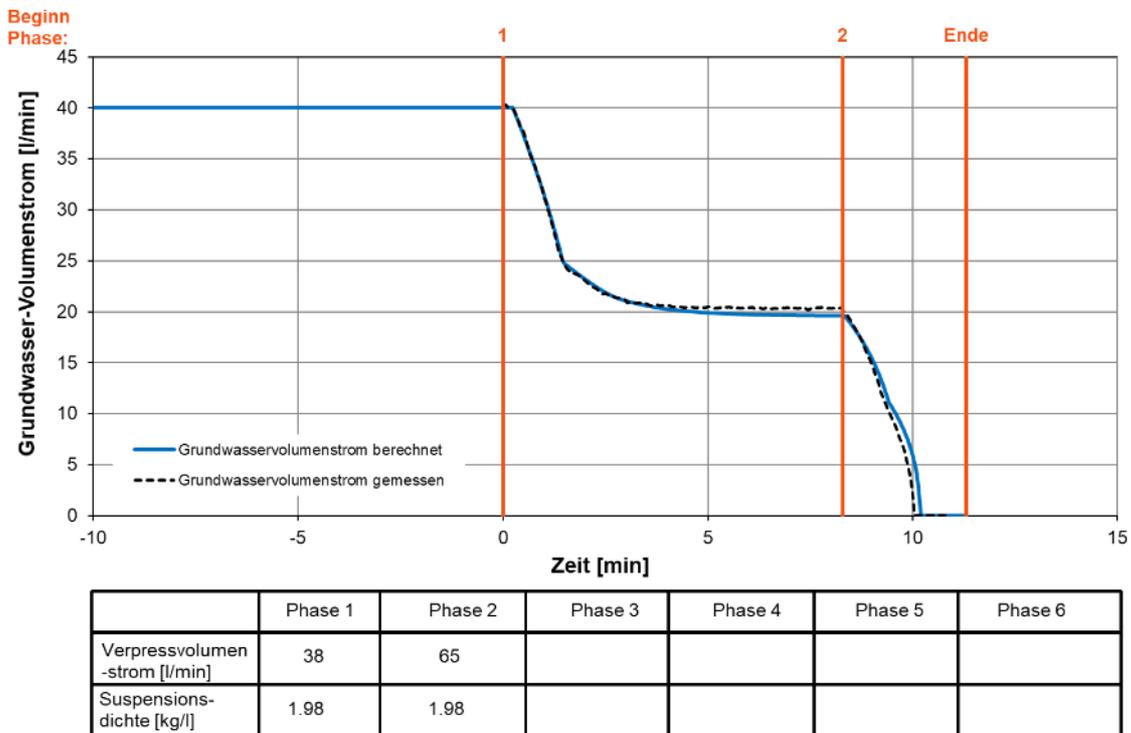
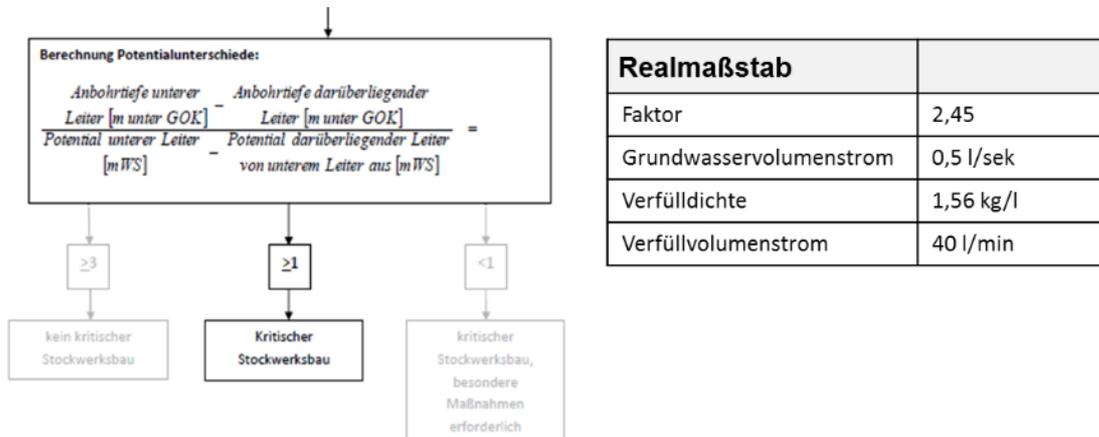


Abbildung 7-51: Vergleich des in Abhängigkeit des Verfüllvolumenstroms und der Suspensionsdichte mit dem Berechnungstool vorhergesagten Verlaufs des Grundwasservolumenstroms mit dem während des Versuchs 022 tatsächlich gemessenen Grundwasservolumenstrom

7.10.11. Ergebnisse des Realmaßstabversuchs



Die 10 vorangegangenen Versuche konnten bereits zeigen, dass das Berechnungsmodell zuverlässig für die Berechnung des Versuchsverlaufs unter den Versuchsrandbedingungen im Technikum eingesetzt werden kann. Zum Nachweis, dass dies nicht nur auf diesen Modellmaßstab anwendbar ist, sondern auch unter Randbedingungen, welche näher an den Bedingungen der Realität liegen, korrekte Ergebnisse liefern kann, wurde der Realmaßstabsversuch durchgeführt. Dafür wurde eine Versuchslänge von 26,5 m hergestellt. Der Wasserzutritt von 0,5 l/sek erfolgte in einer Tiefe von 24,5 m. Das Druckpotential am Auslauf betrug 34,5 m. Dies entspricht einem Überdruck von rund 1 bar an der Geländeoberkante.

Leider versagte die Datenaufzeichnung bei diesem Versuch, wodurch die Daten der Drücke und der Suspensionsviskosität nicht erfasst werden konnten. Die Werte von Suspensionsdichte, Verfüllvolumenstrom und Grundwasservolumenstrom können jedoch an den jeweiligen Messgeräten auf einem Display abgelesen werden. So konnte die korrekte Einstellung der Versuchsrandbedingungen dennoch realisiert werden. Der Verlauf des Grundwasservolumenstromes wurde punktuell händisch erfasst.

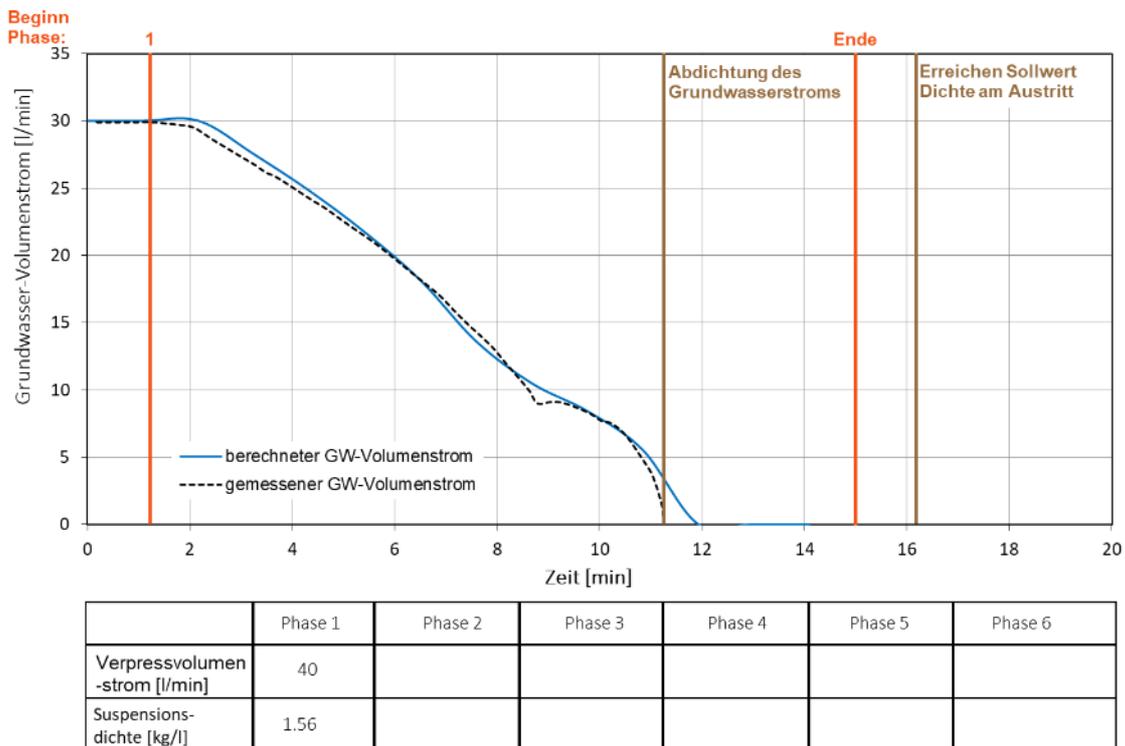


Abbildung 7-52: Vergleich des in Abhängigkeit des Verfüllvolumenstroms und der Suspensionsdichte mit dem Berechnungstool vorhergesagten Verlaufs des Grundwasservolumenstroms mit dem während des Realmaßstabversuchs tatsächlich gemessenen Grundwasservolumens

Wie in Abbildung 7-52 zu erkennen ist, konnte auch mit den größeren Abmessungen dieses Versuchs der Verlauf der Grundwasserabdichtung korrekt vorausberechnet werden. In den letzten Sekunden der Versuchsdauer ist die Abweichung des gemessenen Grundwasservolumenstroms etwas größer als während des Versuchs. Dies stellt in der Übertragung auf die Realität jedoch kein Problem dar. Der Verlauf des Versuchs ist „günstiger“ als die Berechnung, da das gewünschte Ergebnis des Versuchs- die Abdichtung des GWL- eher eintritt als berechnet.

Zum Zeitpunkt der Abdichtung wurde mit einer Dichtewaage die am Bohrlochkopf austretende Dichte bestimmt. Diese betrug 1,33 kg/l, so wie in dem Berechnungsmodell auch berechnet (Abbildung 7-53). Anschließend wurde entsprechend der Vorgabe der LQS EWS das Bohrloch so lange weiter verfüllt, bis die oben austretende Dichte die der eingepumpten Dichte von 1,56 kg/l entsprach. Dies wurde nach einer Zeit von weiteren 5 Minuten erreicht.

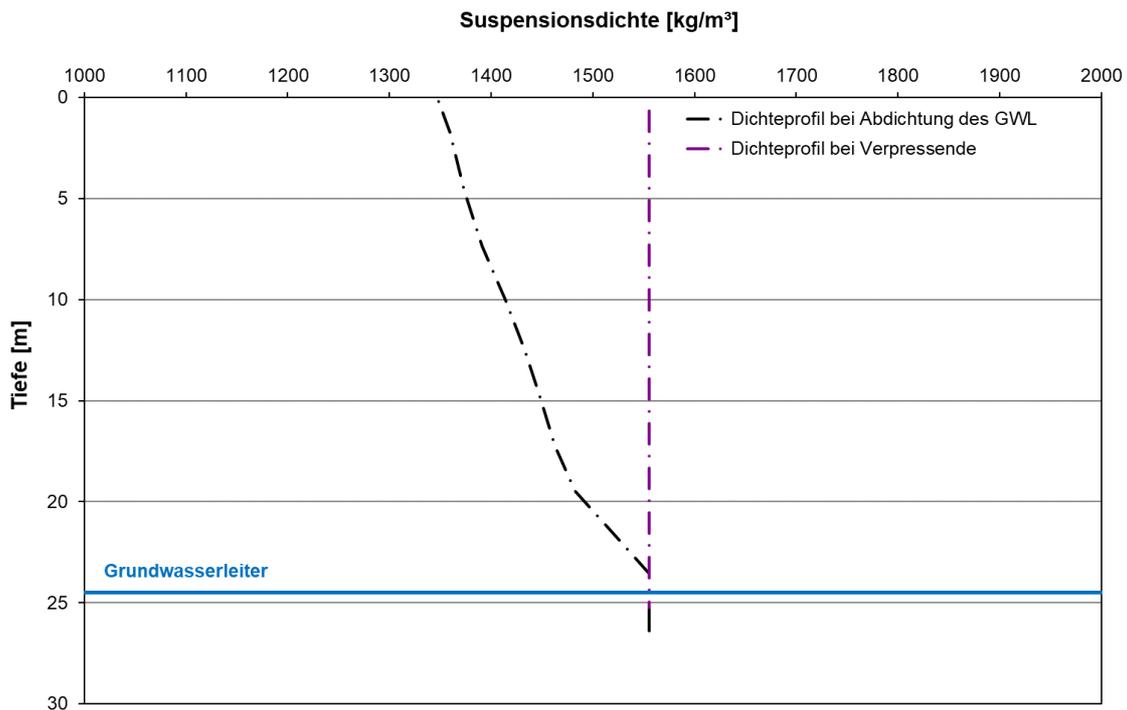


Abbildung 7-53: berechneter Dichteverlauf zum Zeitpunkt der Abdichtung und zu Verpressende des Realmaßstabsversuchs

Nach einer Aushärtezeit von einer Woche erfolgte der Ausbau der Verfüllsäule. Die Proben wurden zunächst optisch beurteilt, anschließend erfolgte die Messung des Eindringwiderstands mittels Nadelpenetrometer und der magnetischen Suszeptibilität mit der Auflegesonde.

Allgemein weist die Verfüllsäule eine mäßig gute Qualität auf. In den meisten Abschnitten ist die Verfüllung integer (vergl. Abbildung 7-54), es finden sich jedoch immer wieder Entmischungen, kleinere Sackungen und Fehlstellen (Abbildung 7-55). Diese nehmen an Ausprägung mit der Höhe zu. Zwei größere Fehlstellen wurden dagegen in 17,2 m und 8,3 m Bohrlochtiefe unter GOK (Abbildung 7-56) ausgebildet. In Anhang 10.13 ist eine Gesamtübersicht der optischen Analyse des Realmaßstabversuches zu finden.



Abbildung 7-54: Verfüllsäule des Realmaßstabversuchs mit guter Qualität der Verfüllung in 21 m Tiefe



Abbildung 7-55: Verfüllsäule des Realmaßstabversuchs um 3,2 m Tiefe mit kleinen Fehlstellen und Sackungen

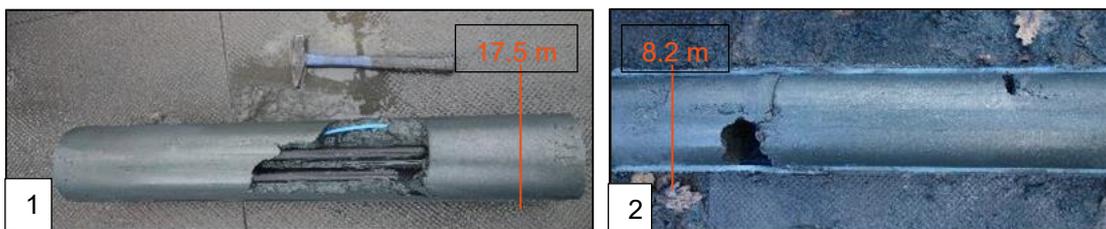


Abbildung 7-56: 1: größte Fehlstelle der Verfüllung des Realmaßstabversuchs um 17,5 m Tiefe, 2: zweitgrößte Fehlstelle um 8,2 m Tiefe, ebenso sind Sackungen und weitere Fehlstellen zu erkennen

Diese Beobachtungen spiegeln sich auch in den Messungen des Nadelpenetrometerindex und der magnetischen Suszeptibilität wieder (Abbildung 7-57). Allgemein lässt sich feststellen, dass diese Messwerte nur eine geringe Verteilung aufweisen. Auffällig sind deutliche Abweichungen auf 17,5 m und 9,4 m. Hier werden jeweils deutlich geringere Suszeptibilitäten gemessen, bzw. ein deutlich geringerer Eindringwiderstand auf 17,5 m Tiefe.

Diese Messpunkte befinden sich jeweils knapp unterhalb der Fehlstellen. Es ist zu vermuten, dass es hier abschnittsweise zu Entmischungen kam. Dabei sammelte sich Wasser weiter oben an, die festen Bestandteile der Suspension wie Zement und Magnetit-Partikel sanken in diesem Bereich ab. Die Ausprägung der Abweichung scheint dabei mit der Größe der Fehlstelle in Zusammenhang zu stehen. Sowohl die größeren Abweichungen als auch die größere Fehlstelle liegen bei 17,5 m.

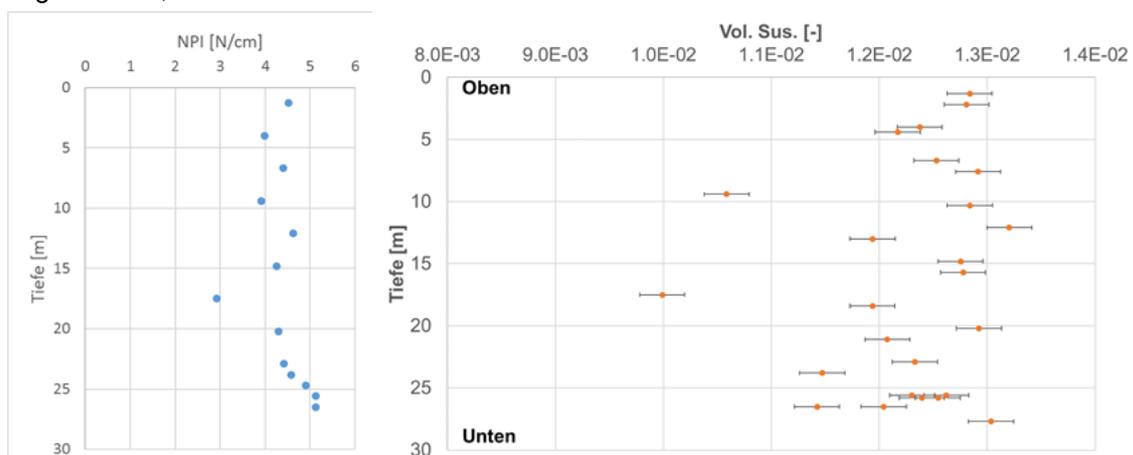


Abbildung 7-57: Darstellung des Nadelpenetrometerindex (NPI) und der magnetischen Suszeptibilität (Vol. Sus.). Erkennbar sind die großen Fehlstellen im Realmaßstabversuch 17,5 m Tiefe und eine starke Abweichung in 9,4 m Tiefe

7.11. Bewertung der Versuche

Die Annahmen der bei der Abdichtung des Grundwasserleiters zu Grunde liegenden physikalischen Vorgänge scheinen korrekt zu sein. Der generelle Versuchsaufbau, die Art der Datenerfassung als auch die Versuchsdurchführung mit dem Grundwasser-Vorratsbehälter auf der Scheerenarbeitsbühne haben sich bewährt. Der Datenlogger selbst muss zukünftig robuster ausgeführt oder besser geschützt werden.

Es wurde deutlich, dass zur Abdichtung eines ins Bohrloch einströmenden Grundwasserleiters der Druck im Bohrloch auf Höhe der Anbohrtiefe größer sein muss als der Druck des ins Bohrloch einströmenden Grundwassers. Dabei ist die Annahme des Vorhandenseins eines hydrostatischen Druckes in der Verfüllsäule, basierend auf der zuvor gemessene Suspensionsdichte, gerechtfertigt. Faktoren, die dazu führen, dass dieser angenommene hydrostatische Druck unterschritten wird, sind eine bereits zu Verfüllbeginn zu geringe Dichte des Verfüllbaustoffs oder eine sich in Folge des in das Bohrloch einströmenden Grundwassers ergebende zu geringe Mischdichte aus Grundwasser und Suspension.

Die Intention zur Entwicklung des Berechnungsmodells war ursprünglich, die Versuchsrandbedingungen festzulegen. Es zeigte sich jedoch, dass das Modell auf Grund seiner Genauigkeit auch zur Berechnung und theoretischen Nachbildung weiterer Randbedingungen eingesetzt werden kann, für die kein Versuch durchgeführt wird. Dabei gelten die Berechnungen nicht nur für die Größenverhältnisse des Technikumsmaßstabs von 6 m Höhe, sondern können auch für reale Bohrlochtiefen eingesetzt werden. Nachfolgend soll dazu ein Beispiel gegeben werden.

Beispielberechnung zur erfolgreichen Verfüllung eines kritischen Grundwasserleiters

Es sei in 70 m Tiefe ein artesischer Grundwasserleiter angebohrt worden. Das Potential bei GOK betrage 4,7 bar (117 m Wassersäule von Anbohrtiefe), bei einer Schüttung von 2 l/sek. Diese Randbedingungen entsprechen einem Faktor von 1,5 nach LQS EWS. Mit dem Berechnungstool können die Randbedingungen dieses extremen Szenarios nachgebildet und ein Vorgehen für eine erfolgreiche Verfüllung simuliert werden.

Zur Abdichtung des GWL stehen 70 m Bohrtiefe zur Verfügung. Ein komplett mit einer Dichte von 1,7 kg/l gefülltes Bohrloch erzeugt auf Höhe der Anbohrtiefe in 70 m einen Druck von 11,7 bar. Eine Verfüllung mit dieser Dichte würde aber nicht abdichten. Eine Erhöhung der Dichte auf 1,9 kg/l vermindert den ins Bohrloch (BL) einströmenden Grundwasser-Volumenstrom ebenfalls nur geringfügig. Es reicht weiterhin nicht aus, in einer Verfüllgeschwindigkeit von 40 l/min zu verfüllen. Eine Steigerung der Verfüllgeschwindigkeit auf 70 l/min vermindert zwar den ins BL einströmenden GW-Volumenstrom weiter, kann ihn jedoch nicht vollständig abdichten. Erst mit einer weiteren Erhöhung der Dichte auf 2 kg/l gelingt die Abdichtung des Bohrlochs.

Das Bohrlochvolumen beträgt in diesem Szenario 1224 l, die verpresste Suspensionsmenge 6810 l (5,6-fache Menge).

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
V_Verpress	l/min	40,0	40	70	70		
Rho_Suspension	kg/l	1,70	1,90	1,90	2,00		
Dauer	min	30	30	20	43		
Start	min		30	60	80	123	123
Ende	min	30	60	80	123	123	123
		6810	1200	1200	1400	3010	0
Fitting mit Wasser (vor Versuchsbeginn/Verfüllung)							
Bohrlochtiefe	m	80					
Anbohrtiefe GWL (h3)	m	70					
Druckpotenzial GWL (h1)	m	117					
Dichte Wasser	kg/m³	999,70					
V_punkt_GWL_ini	l/min	120,00					
zeta* (Fittingparameter)	1/m4	8,89					
Startwerte bei Versuchsbeginn							
V_punkt_GWL	l/min	120,00					
mittlere Dichte im Bohrloch	kg/m³	999,70					
Anzahl Startelemente GWL-GOK	-	81					
Anzahl Startelemente unten-GWL	-	12					
Zeitschrittweite	s	20,00					
Bohrlochdurchmesser	m	0,1396					
Bohrlochvolumen GWL-GOK	l	1071,90	13,2333501				
Bohrlochvolumen unten-GWL	l	153,13	12,7607305				
Fehlermeldungen:							

Abbildung 7-58: Eingabeparameter Berechnungstool für Beispielberechnung

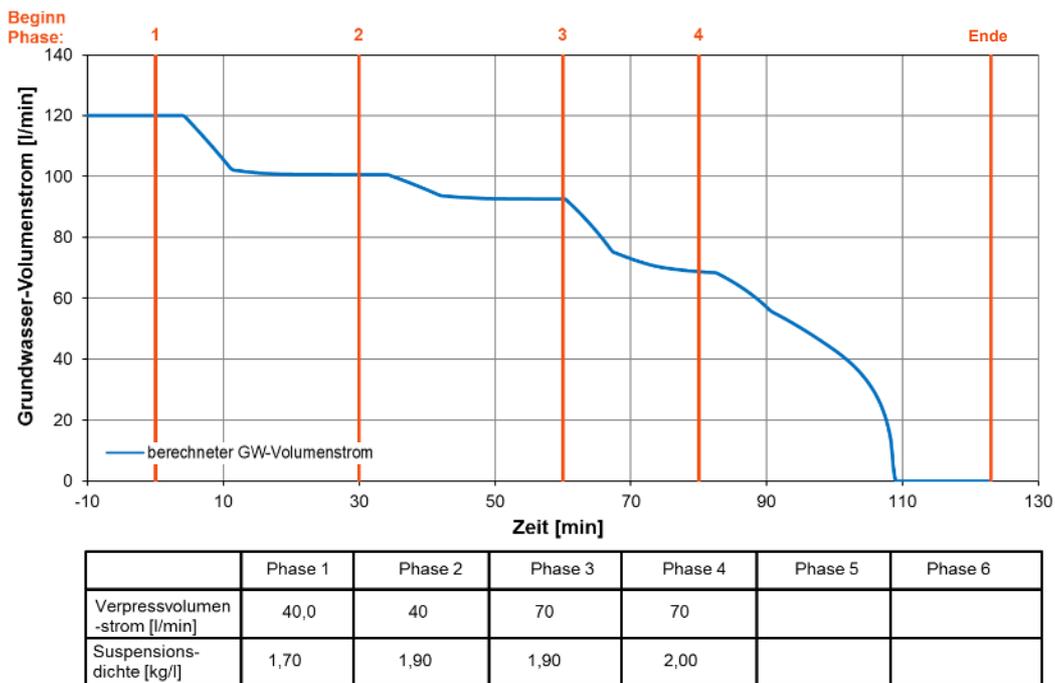


Abbildung 7-59: Berechneter Verlauf des Grundwasservolumenstroms in Abhängigkeit des Verfüllvolumenstroms und der Suspensionsdichte für ein fiktives Szenario (LQS EWS-Bewertungsfaktor 1,5)

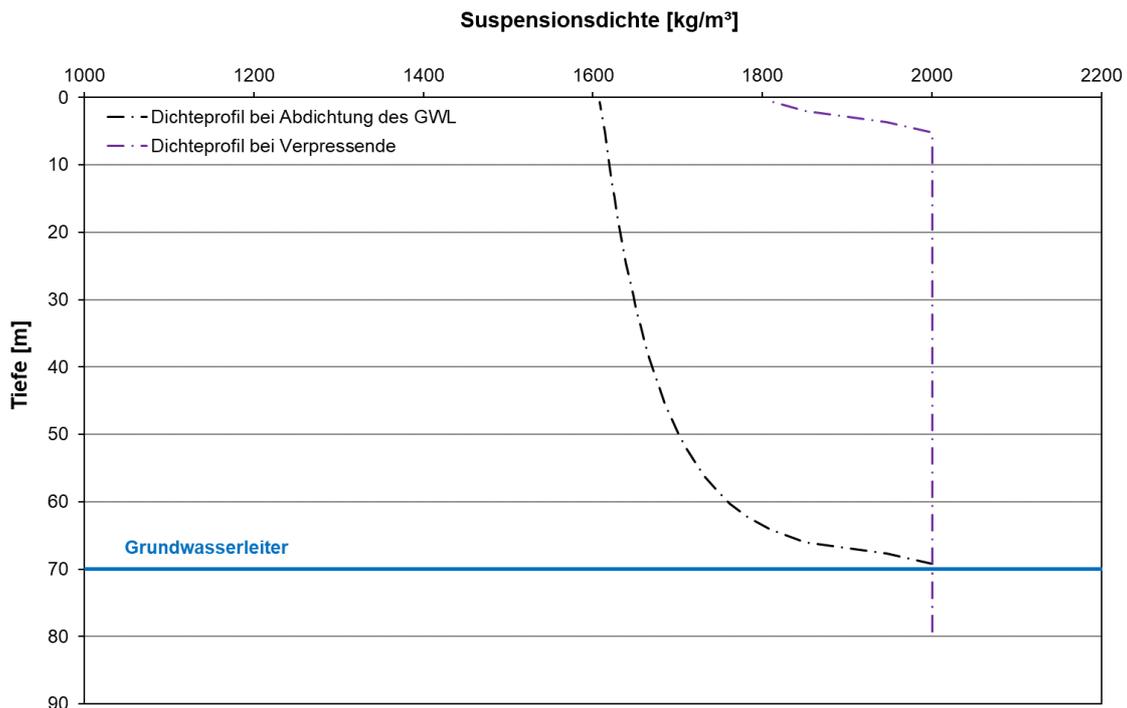


Abbildung 7-60: berechnete Dichteprofile zum Zeitpunkt der Abdichtung des GWL und bei Berechnungs-ende des fiktiven Szenario (LQS EWS-Bewertungsfaktor 1,5)

Grenzen der Aussagefähigkeit des Berechnungstools und der Versuche

- Die Analyse der Qualität des ausgehärteten Verfüllbaustoffs, insbesondere im Bereich des Grundwasserzutritts, kann nicht direkt auf reale Bedingungen übertragen werden. Der Aquifer ist als poröse Formation wasserdurchlässig. Kann Grundwasser ins Bohrloch einströmen, ist von einer vorhandenen Wasserwegsamkeit auszugehen. Zu Beginn der Verfüllung strömt das Wasser ins nachgebildete Bohrloch ein. Ist eine die Abdichtung ermöglichende Mischdichte im Bohrloch erreicht, wird der ins Bohrloch einströmende Wasserzustrom unterbunden. In diesem Moment, wenn der Druck im Bohrloch höher wird als der anstehende Druck des Grundwasserleiters findet eine Strömungsumkehr statt. Es strömt nun statt Wasser ins Bohrloch Suspension aus dem Bohrloch heraus, da durch die weiter erfolgende Verfüllung der Druck im Bohrloch höher wird als der Druck des anstehenden Wasserpotentials. (Abbildung 7-61). Dieser erhöhte Druck bewirkt in einem realen Bohrloch zunächst eine Penetration des Baustoffs in das umgebende wasserdurchlässige Gebirge hinein. Ist dies nicht weiter möglich, der erhöhte Druck jedoch noch immer anstehend, findet eine Wasserabgabe aus dem Baustoff heraus ins Gebirge statt. Wie im Forschungsvorhaben QEWS II festgestellt wurde, verändert diese Filtration die Zusammensetzung des im Bohrloch befindlichen Baustoffs, zudem konnte eine bessere Verfüllqualität beobachtet werden (Lutz & Reduth, 2020). In den durchgeführten Technikumsversuchen fand die Verfüllung jedoch im Plastikrohr statt, eine Wasserabgabe aus dem Baustoff heraus war nicht möglich und der Baustoff

blieb nach der Abdichtung des Grundwasserzustroms in seiner angemischten Zusammensetzung.



Abbildung 7-61: Phasen der Verfüllung, 1: Start der Verfüllung, 2: Verfüllung, dabei strömt Wasser in das „Bohrloch“, 3: Zeitpunkt der Abdichtung: Strömungsumkehr- statt Grundwasser ins Bohrloch, strömt Suspension aus dem Bohrloch heraus, es kann kein Wasser mehr ins „Bohrloch“ einströmen, 4: Ende der Verfüllung

- Das Berechnungstool wurde zur Vorhersage des Verlaufs der Versuche entwickelt. Es kann Szenarien mit einem einzelnen Grundwasserleiter mit einem artesischen Austritt abbilden oder eine stockwerksübergreifende Verfüllung, bei der ein schnelles Infiltrieren des im Bohrloch verdrängten, aufsteigenden Wassers in den oberen GWL bzw. in eine durchlässige Formation möglich ist. Letzteres kann beispielsweise bei einem trockengefallenen, stark karstifizierten GWL der Fall sein. Diese Szenarien stellen den kritischsten Fall beim Anbohren eines gespannten GWLs dar. Ist das Druckpotenzial des GWLs geringer als dessen Anbohrtiefe, und kann das noch oben strömende Wasser nicht abfließen, stellt sich ein freier Wasserspiegel im Bohrloch ein. Sobald sich dieser stabilisiert hat, strömt kein weiteres Wasser mehr ins Bohrloch ein, da der Gegendruck im Bohrloch zu groß ist. Die Verfüllung erhöht diesen Gegendruck nur noch.
- Die einzelnen Versuchsaufbauten wurden im Rahmen eines Expertenworkshops mit der Branche und Experten diskutiert und erhielt deren Zustimmung. Auch wenn sich die Entwicklung so nah wie möglich an der Realität orientierte, bleibt der Aufbau dennoch ein Modell. Die mit diesem Modell erzielten Ergebnisse sind nur für die Randbedingungen der oben dargestellten Versuche überprüft. Dies beinhaltet nicht eventuelle Effekte, welche in einem realen Bohrloch auftreten. Ebenso ist es nicht für größere Tiefen eines Grundwasserzutritts in 24,5 m überprüft. Es ist zwar davon auszugehen, dass die Abdichtung in einer noch größeren Tiefe ebenso eintritt, da die selben physikalischen Zusammenhänge bestehen, ein praktischer Beweis liegt jedoch nicht vor.
- Eine Verfüllung von stockwerksübergreifenden Bohrungen mit verschiedenen Druckpotenzialen, sowohl auf- als auch absteigende Potentiale, kann nicht nachgebildet werden.

Im Falle des Vorliegens eines aufsteigenden Potentials muss dieses im Bereich des darüber liegenden Stauers abgedichtet werden. Wenn keine solche Situation wie im vorgehend genannten Punkt vorliegt, würde die Wassersäule im Bohrloch während der Verfüllung mit ansteigen. Der auf den Aquifer wirkende Druck zur Abdichtung würde in Realität günstiger im Sinne einer erfolgreichen Abdichtung ansteigen, als wenn die Situation vereinfacht auf den Versuchsstand übertragen würde, da die über den Auslauf ansteigende Wassersäule fehlt.

- Das Berechnungstool kann keine Verluste von Volumina aus dem Bohrloch heraus berücksichtigen. Diese können zum Beispiel auftreten, wenn Suspension aus dem Bohrloch heraus in Klüfte oder stark durchlässige Lockergesteinsschichten eindringt und abfließt, oder wenn Wasser beim Aufstieg im Bohrloch in durchlässige Formationen abfließt, die Suspension jedoch dort nicht eindringen kann. Diese sich daraus ergebenden Druckverhältnisse können nicht abgebildet werden.
- Als Verfüllmethode wurde nur das Kontratorverfahren berücksichtigt, das heißt die Verfüllung erfolgt über einen Verpressschlauch vom Bohrlochtieferen aus.

7.12. Diskussion einzelner Punkte der LQS

Die vorab detailliert beschriebenen Versuchsergebnisse werden im Folgenden in Bezug zur LQS EWS diskutiert. Hieraus werden Punkte extrahiert, die im Rahmen einer möglichen Fortschreibung der LQS detailliert zu betrachten sind.

7.12.1. GWL < 0,5 l/sek als unkritisch eingestuft

Wie bereits in Kapitel 2.2 deutlich wurde, gibt es derzeit keine Möglichkeit der genauen Bestimmung des ins Bohrloch einströmenden Grundwasservolumenstroms. Dies stellt eine Unsicherheit für das sichere Verfüllen von Bohrungen mit artesischem Austritt dar, wie in den nachfolgenden Berechnungen gezeigt wird. Die LQS EWS besagt, dass von einem unkritischen Szenario ausgegangen werden kann, wenn der Grundwasserstrom kleiner als 25 l/min ist, wie in den nachfolgenden Beispielberechnungen mit verschiedenen Szenarien dargestellt wird.

- Im ersten Szenario kann mit den fiktiven Randparametern (s. Berechnungstool Abbildung 7-62) zunächst eine Abdichtung erzielt werden (Abbildung 7-63).

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
V_Verpress	l/min	40.0					
Rho_Suspension	kg/l	1.70					
Dauer	min	90					
Start	min		90	90	90	90	90
Ende	min	90	90	90	90	90	90
		3600	3600	0	0	0	0
Fitting mit Wasser (vor Versuchsbeginn/Verfüllung)							
Bohrlochtiefe	m	60					
Anbohrtiefe GWL (h3)	m	40					
Druckpotenzial GWL (h1)	m	65					
Dichte Wasser	kg/m³	999.70					
V_punkt_GWL_ini	l/min	25.00					
zeta* (Fittingparameter)	1/m4	109.00					
Startwerte bei Versuchsbeginn							
V_punkt_GWL	l/min		25.00				
mittlere Dichte im Bohrloch	kg/m³		999.70				
Anzahl Startelemente GWL-GOK	-		74				
Anzahl Startelemente unten-GWL	-		37				
Zeitschrittweite	s		20.00				
Bohrlochdurchmesser	m		0.1396				
Bohrlochvolumen GWL-GOK	l		612.52	8.27723058			
Bohrlochvolumen unten-GWL	l		306.26	8.27723058			

rot: Eingabewerte

Fehlermeldungen:

Abbildung 7-62: Beispielrechnung für Szenario GWL <0,5 l/sek und erfolgreiche Abdichtung

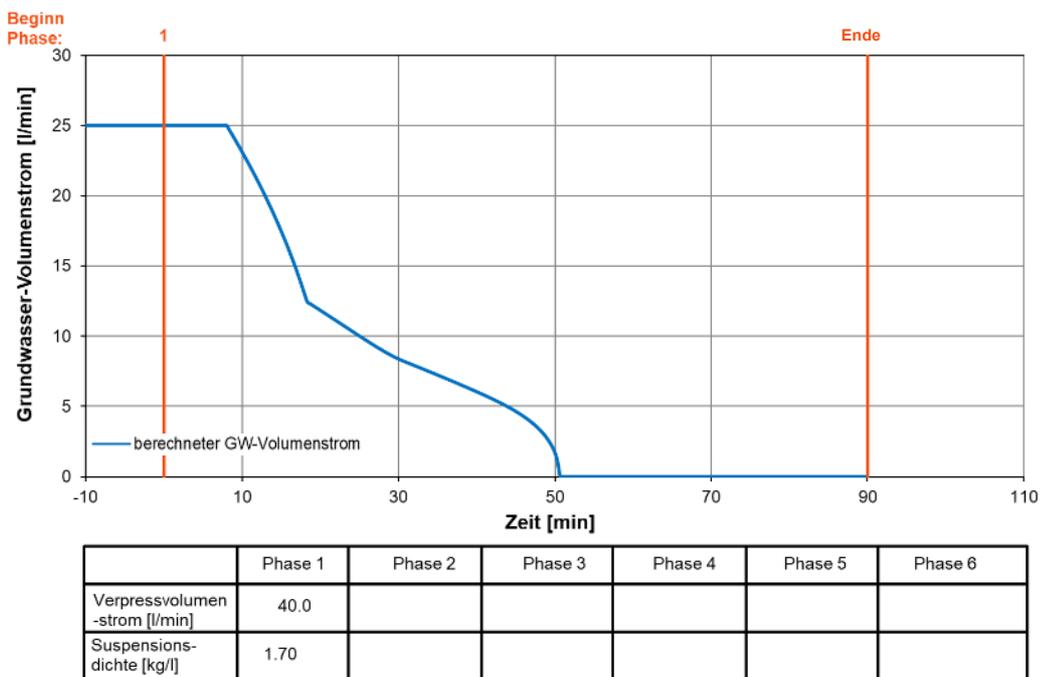


Abbildung 7-63: Berechneter Grundwasservolumenstrom während Verfüllung bei Szenario GWL <0,5l/sek

- Bei einem um nur 2 m erhöhten Grundwasserpotential (Abbildung 7-64) kann eine Abdichtung auch bei diesem geringen Grundwasservolumenstrom nicht erreicht werden (Abbildung 7-65).

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
V_Verpress	l/min	40.0					
Rho_Suspension	kg/l	1.70					
Dauer	min	90					
Start	min		90	90	90	90	90
Ende	min	90	90	90	90	90	90
		3600	3600	0	0	0	0
Fitting mit Wasser (vor Versuchsbeginn/Verfüllung)							
Bohrlochtiefe	m	60					
Anbohrtiefe GWL (h3)	m	40					
Druckpotenzial GWL (h1)	m	67					
Dichte Wasser	kg/m ³	999.70					
V_punkt_GWL_ini	l/min	25.00					
zeta* (Fittingparameter)	1/m4	117.72					
Startwerte bei Versuchsbeginn							
V_punkt_GWL	l/min	25.00					
mittlere Dichte im Bohrloch	kg/m ³	999.70					
Anzahl Startelemente GWL-GOK	-	74					
Anzahl Startelemente unten-GWL	-	37					
Zeitschrittweite	s	20.00					
Bohrlochdurchmesser	m	0.1396					
Bohrlochvolumen GWL-GOK	l	612.52	8.27723058				
Bohrlochvolumen unten-GWL	l	306.26	8.27723058				

rot: Eingabewerte

Fehlermeldungen:

Grundwasserleiter wird nicht abgedichtet.

Abbildung 7-64: Beispielrechnung für GWL < 25 l/min bei leicht verändertem Druckpotential des GWL (67 m statt 65 m)

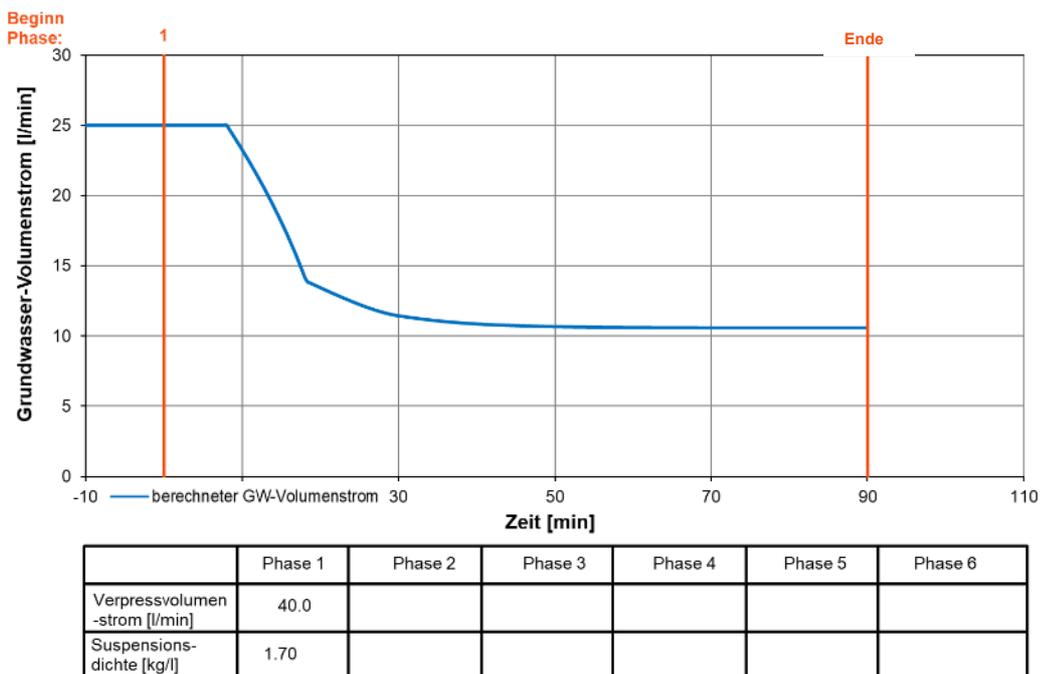


Abbildung 7-65: Berechneter Grundwasservolumenstrom in Abhängigkeit von Verpressvolumenstrom und Suspensionsdichte bei leicht erhöhtem Potential: keine erfolgreiche Abdichtung des GWL

- Kann das anliegende Druckpotential genau ermittelt werden, jedoch der Grundwasservolumenstrom nicht und beträgt dieser in Wirklichkeit anstatt 25 l/min, mit nur 5 l/min

mehr, 30 l/min (Abbildung 7-66), ist eine Abdichtung mit derselben Verfüllmethodik ebenfalls nicht mehr zu erreichen (Abbildung 7-67). Der Bewertungsfaktor beträgt für dieses Szenario dann bereits 1,7, was einem kritischen Stockwerksbau entspricht.

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
V_Verpress	l/min	40.0					
Rho_Suspension	kg/l	1.70					
Dauer	min	90					
Start	min		90	90	90	90	90
Ende	min	90	90	90	90	90	90
		3600	3600	0	0	0	0
Fitting mit Wasser (vor Versuchsbeginn/Verfüllung)							
Bohrlochtiefe	m	60					
Anbohrtiefe GWL (h3)	m	40					
Druckpotenzial GWL (h1)	m	65					
Dichte Wasser	kg/m³	999.70					
V_punkt_GWL_ini	l/min	30.00					
zeta* (Fittingparameter)	1/m4	75.69					
Startwerte bei Versuchsbeginn							
V_punkt_GWL	l/min	30.00	Fehlermeldungen: Grundwasserleiter wird nicht abgedichtet.				
mittlere Dichte im Bohrloch	kg/m³	999.70					
Anzahl Startelemente GWL-GOK	-	62					
Anzahl Startelemente unten-GWL	-	31					
Zeitschrittweite	s	20.00					
Bohrlochdurchmesser	m	0.1396					
Bohrlochvolumen GWL-GOK	l	612.52	9.87927521				
Bohrlochvolumen unten-GWL	l	306.26	9.87927521				

Abbildung 7-66: Beispielrechnung für GWL > 25 l/min

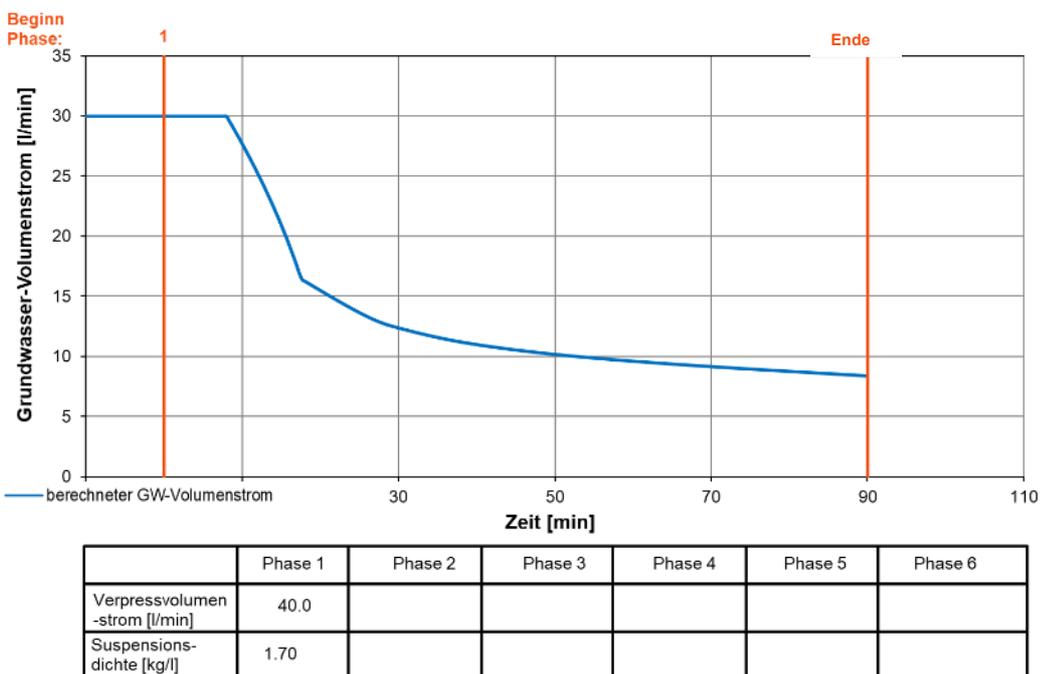


Abbildung 7-67: Berechneter Grundwasservolumenstrom in Abhängigkeit von Verpressvolumenstrom und Suspensionsdichte

- Wird in dem Szenario mit einem geringen Volumenstrom des GWL von 20 l/min und einer geringeren Dichte von lediglich 1,5 kg/l verpresst (Abbildung 7-68), kann der Grundwasserleiter ebenso nicht abgedichtet werden (Abbildung 7-69).

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
V_Verpress	l/min	40.0					
Rho_Suspension	kg/l	1.50					
Dauer	min	90					
Start	min		90	90	90	90	90
Ende	min	90		90	90	90	90
		3600	3600	0	0	0	0
Fitting mit Wasser (vor Versuchsbeginn/Verfüllung)							
Bohrlochtiefe	m	60					
Anbohrtiefe GWL (h3)	m	40					
Druckpotenzial GWL (h1)	m	65					
Dichte Wasser	kg/m ³	999.70					
V_punkt_GWL_ini	l/min	20.00					
zeta* (Fittingparameter)	1/m ⁴	170.31					
Startwerte bei Versuchsbeginn							
V_punkt_GWL	l/min		20.00				
mittlere Dichte im Bohrloch	kg/m ³		999.70				
Anzahl Startelemente GWL-GOK	-		92				
Anzahl Startelemente unten-GWL	-		46				
Zeitschrittweite	s		20.00				
Bohrlochdurchmesser	m		0.1396				
Bohrlochvolumen GWL-GOK	l		612.52	6.65777242			
Bohrlochvolumen unten-GWL	l		306.26	6.65777242			

rot: Eingabewerte

Fehlermeldungen:

Grundwasserleiter wird nicht abgedichtet.

Abbildung 7-68: Beispielrechnung für GWL < 20 l/min, aber mit geringerer Dichte der Verpresssuspension

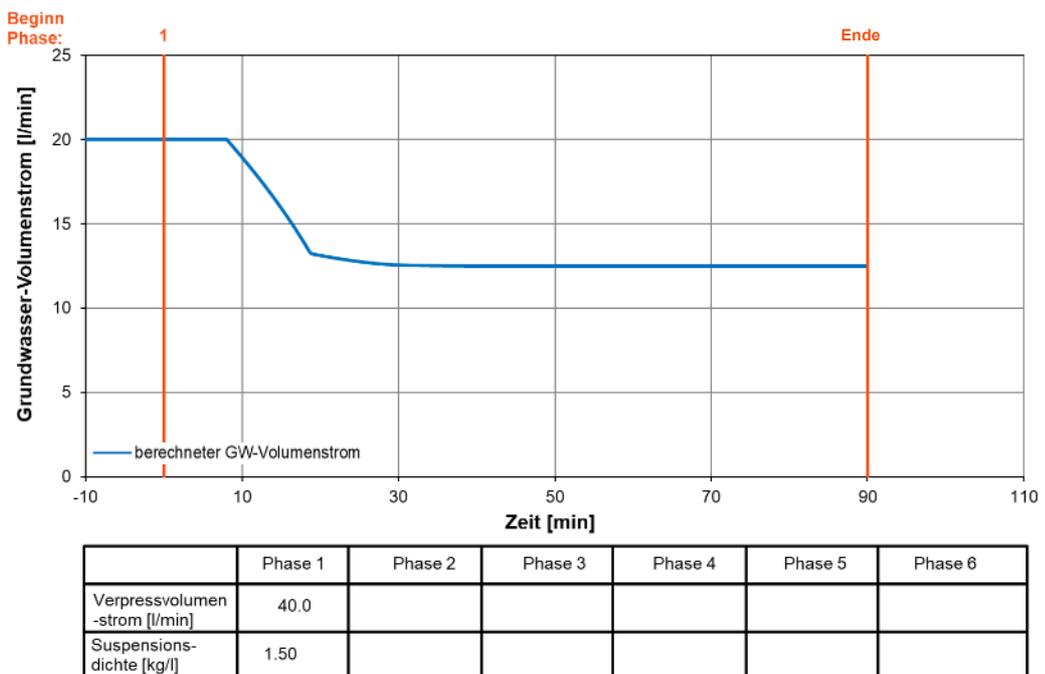


Abbildung 7-69: Berechneter Grundwasservolumenstrom in Abhängigkeit von Verpressvolumenstrom und Suspensionsdichte

Die dargestellten Fälle sind fiktive Szenarien. Das Verhältnis von Druckpotential und Grundwasservolumenstrom wurde so ausgewählt, dass eine Lücke in den Bestimmungen der LQS EWS aufgezeigt werden kann. Es gibt jedoch keine flächendeckende Übersicht über die Zusammenhänge des lokalen Druckpotentials und dem lokalen Grundwasservolumenstrom in Baden-Württemberg. Es ist zu vermuten, dass ein geringes Potential eines angebohrten Grundwasserleiters mit einer geringen Schüttung desselben einhergeht. Auf Grund der Sensibilität des Systems in

Abhängigkeit des Druckpotentials, des ins Bohrloch einströmenden Grundwassers und der Verfüllmethodik, ist eine genaue Kenntnis der hydrogeologischen Gegebenheiten notwendig, um eine angepasste Vorgehensweise anwenden zu können. Verfüllmethodik meint hier die Anmischzeit, die Verfüllgeschwindigkeit und die Baustellenpraxis (Wie lange kann eine konstant hohe Verfüllgeschwindigkeit gewährleistet werden, ist genügend Baustoff und ein entsprechender Wasseranschluss vorhanden etc.).

7.12.2. LQS EWS Anlage 4

Auf Seite 14 der LQS EWS wird festgestellt, dass die Suspension mindestens eine Dichte von 1,3 kg/l aufweisen muss. In Anlage 4 ist ein Beispiel für eine Handlungsanweisung gegeben, in der eine Suspensionsdichte von 1,214 als ausreichend eingestuft wird. Dies ist ein Widerspruch. Zugleich wird die austretende Wassermenge als „eher zweitrangig“ eingeschätzt. Sowohl die als ausreichend angenommene Dichte der Verfüllsuspension von 1,214 kg/l, als auch die Nachrangigkeit der eintretenden Wassermenge können auf Grundlage der vorab aufgeführten Berechnungen nicht bestätigt werden.

Mit einer Dichte der Verfüllsuspension von 1,214 kg/l ist bei einem beispielhaft angenommenen Volumenstrom des GWL von 10 und 30 l/min keine Abdichtung zu erreichen, weder bei einer Verfüllgeschwindigkeit von 40 l/min, noch bei 100 l/min.

Erst ab einer Dichte von 1,3 kg/l wird eine Abdichtung des GWL mit einer Schüttung von 30 l/min möglich. Würde die Schüttung aber 60 l/min betragen, wäre eine Abdichtung bereits wieder nicht mehr gegeben.

Wird die Dichte auf 1,5 kg/l erhöht, kann ein Volumenstrom des GWL von 30 l/min abgedichtet werden. Bei gleichen Druckverhältnissen, aber einer höheren Schüttung von 3 l/s kann wiederum keine Abdichtung erfolgen. Für eine erfolgreiche Abdichtung muss in diesem Fall entweder die Dichte weiter erhöht und länger verpresst werden, oder aber die Verfüllgeschwindigkeit erhöht werden. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, wie lange kontinuierlich verfüllt werden kann und ob die Suspension gleichbleibend gut angemischt werden kann (Solites, 2020).

8. EMPFEHLUNGSKATALOG

8.1. Anforderungskriterien für Erdwärmesondenverfüllbaustoffe

Es gilt anzumerken, dass die Anforderungskriterien, die im Rahmen des Vorläuferprojektes EWS-Tech-I ausgearbeitet wurden, aus unserer Sicht weiterhin gelten sollen.

Autoren: EIFER, AGW und MPA/IMB

Anforderungen an magnetische Messwerte und magnetischen Messungen:

- Nach dem derzeitigen Kenntnisstand können keine allgemein gültigen, notwendigen spezifischen magnetische Suszeptibilitätswertebereiche (Mindest- und/Höchstwerte) für die Baustoffe definiert und festgelegt werden. Wir empfehlen den Baustoffherstellern aber,
 - Eingangskontrolle der zugesetzten Magnetite

- Individuelle magnetische Suszeptibilitätsmessungen, da die verwendeten Magnetitchargen in ihren magnetischen Eigenschaften variieren können.
- Hilfreich wäre auch die Messung der Korngrößenverteilung, da die magnetische Suszeptibilität abhängig ist von Magnetitpartikelgröße.
- Ausgangskontrolle der Baustoffchargen
 - Mit Hilfe magnetischer Suszeptibilitätsmessungen des trockenen Baustoffes. Angabe des Wertes bei Versenden des Baustoffs, da damit Unterschiede in individuellen Baustoffchargen dokumentiert werden können.
- Angaben zur magnetischen Suszeptibilität im angerührten Zustand unter Berücksichtigung des zu verwendeten W/F Verhältnisses. Dies ist aus unserer Sicht notwendig, da sich die magnetischen Suszeptibilitäten in den untersuchten Baustoffen zum Teil sehr stark unterscheiden.
- Bewertung ihres Baustoffes hinsichtlich der Verwendung mit dem CemTrakker. Dies ist aus unserer Sicht notwendig, um individuelle Zielwerte definieren zu können.

Die Anforderungen an den Zementanteil:

- Nach dem derzeitigen Kenntnisstand können keine generellen Empfehlungen für Mindestzementanteile für Verfülbaustoffe gegeben werden, da diese sich für die jeweiligen Baustoff je nach Zusammensetzung unterschiedlich auswirken können.
- Trotzdem wäre es aus unserer Sicht hilfreich, wenn zusätzlich in den Datenblättern der Zementanteil angegeben würde, um zukünftig Baustoffe besser bewerten und vergleichen zu können

8.2. Vorschläge zur Weiterentwicklung der LQS EWS

Autoren: EIFER, AGW, und MPA/IMB

Hinsichtlich der im Laufe des Vorhabens durchgeführten magnetischen Messungen empfehlen wir, dass folgende Punkte bei einer Fortschreibung und Überarbeitung der LQS EWS diskutiert werden:

- Angaben spezifischer magnetischer Suszeptibilitäten in den Datenblättern der Baustoffhersteller.
 - magnetische Suszeptibilität des trockenen Baustoffes.
Damit ist dann eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den einzelnen Baustoffen gegeben, da sich herausgestellt hat, dass die jeweiligen Baustoffe in ihrer magnetischen Suszeptibilität sich doch sehr stark unterscheiden.
 - Angaben zur magnetischen Suszeptibilität im angerührten Zustand unter Berücksichtigung des zu verwendeten W/F Verhältnisses.
- Bei Verwendung der CemTrakker Messsonde:
Festlegung individueller CemTrakker Schwellenwerte für die unterschiedlichen spezifischen magnetischen Suszeptibilitäten der Baustoffe.

- Bei der Verwendung des CemTrakkers zur automatischen Abdichtungskontrollprüfung: Wenn der vorab festgelegte individuelle Schwellenwert des Baustoffes erreicht wird, soll nach Erreichen des Schwellenwertes ein weiterer signifikanter Anstieg des Messsignals zu verzeichnen sein. Erst dann sollte die Messsonde nach oben geführt werden (2-3 Meter). Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Sonde vor der Detektion des eigentlichen Suspensionsspiegels nach oben gezogen wird.
- Durchführung von Blindmessungen am besten in allen Sondenrohren vor dem Hinterfüllvorgang (zwingend aber in einem), um Störeinflüsse auf die nachfolgenden Messungen während dem Hinterfüllvorgang berücksichtigen und bewerten zu können. Die Messung in allen Sondenrohren macht auch deshalb Sinn, da z.B. die CemTrakker Messsonde eine maximale Reichweite von 2cm besitzt.
- Für die Verpresskontrollprüfung nach dem Hinterfüllvorgang sollte möglichst in allen Sondenrohren eine Messung erfolgen, denn auch hier gilt, dass, unter Berücksichtigung der Reichweite, die Messung nur in einer Sonde nicht repräsentativ sein kann.
- Bei den magnetischen Messungen gilt zudem ein geometrischer Faktor zu berücksichtigen. Aufgrund unterschiedlicher Durchmesser von verwendeten Sondenrohren und verschiedener Sondentypen ergeben sich unterschiedliche magnetische Messwerte. Höhere Sondendurchmesser führen im Allgemeinen zu geringen Messwerten.
- Bei der Verpresskontrollprüfung sollte die Höhe der CemTrakker Zielwerte individuell für den eingesetzten Baustoff bewertet werden. Der individuelle Zielwert ergibt sich aus den verwendeten Rohrsondendurchmesser. Die Differenz zu diesem Durchmesserabhängigen Zielwert sollte im Verpressprotokoll angegeben werden. Der gemessene Wert sollte im Mittel den Zielwert nicht mehr als 20% unterschreiten.
- Rückstellproben können dazu genutzt werden, magnetische Suszeptibilitätsmessungen zu bestimmen. Dadurch können nachträglich die CemTrakker Messprofile überprüft werden (Zielwerte im ausgehärtetem Zustand und im Verhältnis der Schwellenwerte beim Hochziehen). Zudem können die Rückstellproben möglicherweise auf ein kritisches Magnetitabsetzen überprüft werden.

Hinsichtlich einer Bewertung der Sedimentationsverhalten und der hydraulischen Durchlässigkeit empfehlen wir den folgenden Punkt mit in die Leitlinien aufzunehmen.

- Zusätzliche Herstellerangaben zum Zementanteil im Baustoff
Die Angaben zum Zementanteil wären hilfreich, um vor allem geringe Anteile in den Baustoffen erkennen zu können. Geringe Zementanteile sind besonders kritisch in Bezug auf das Sedimentationsverhalten (hohe Absetzmaße) zu sehen.

8.3. Hinweise zur Verfülltechnik bei Vorliegen von Grundwasserströmungen

Autor: Solites

Die durchgeführten Technikums- und Realmaßstabsversuche und ein hierzu entwickeltes Berechnungsmodell haben bestätigt, dass für eine erfolgreiche Abdichtung die Parameter Druckpotential und Volumenstrom des angebohrten Grundwasserleiters, Dichte der eingebrachten Verfüllsuspension und Verfüllgeschwindigkeit entscheidend sind.

Hinsichtlich der Parameter Druckpotential und insbesondere Volumenstrom der angebohrten GW-Leiters besteht bei Feld-EWS aktuell die Herausforderung, einer ökonomisch tragbaren und dennoch hinreichend genauen Bestimmung. Es wird daher vorgeschlagen, die Notwendigkeit sowie die Methoden und Randbedingungen zur Bestimmung dieser Parameter unter Einbezug der relevanten Akteure (Bohrunternehmen, Messtechnikanbieter, Wissenschaft, Behörden/UM) zu diskutieren und einheitlich festzulegen. Hierbei ist zu beachten, dass für eine Messung der Parameter des unteren Grundwasserleiters der obere Grundwasserleiter von diesem abgesperrt sein muss (z.B. durch eine Verrohrung im Bereich des oberen Grundwasserleiters).

In diesem Zusammenhang könnten auch die in den LQS EWS Abschnitt 3.4 verwendeten Begrifflichkeiten „größere Potentialdifferenz“ und „Grundwasserfluss im Bohrloch“ präzisiert und einheitlich definiert werden. Außerdem könnte auch die in der Matrix kritischer Stockwerksbau erfolgte Festlegung eines kritischen Grenzwerts von 0,5 l/s als GW-Volumenstrom überdacht werden. Denn bei den durchgeführten Technikumsversuchen konnte aufgezeigt werden, dass auch geringere Volumenströme kritisch sind und unter Einhaltung der Kriterien aus der Matrix kritischer Stockwerksbau zu einem Ausspülen der Verfüllung aus dem Bohrloch führen können (siehe Kapitel 7.12.1)

Hinweise zum Verfüllen bei stockwerksübergreifenden Bohrungen mit nach oben gerichtetem Druckpotential:

- Die nach dem Beispiel der Arbeitsanweisungen ermittelten Werte für die Dichte der Verfüllsuspension stellen den erforderlichen Minimalwert dar, wenn zuvor die GW-Strömung im Bohrloch durch geeignete Maßnahmen unterbunden wurde.
- Sofern die GW-Strömung im Bohrloch vor der Verfüllung nicht zum Erliegen gebracht wurde, sind höhere Suspensionsdichten erforderlich und möglichst hohe Verfüllvolumenströme zur Verfüllung einzusetzen, der Erfolg der Verfüllung ist dabei zwingend während und nach dem Verfüllen mit Cemtrakker-Messungen (Verfülldokumentation + Kontrollmessung) und durch Messungen der austretenden Suspensionsdichte, die der eingebrachten Suspensionsdichte entsprechen muss, nachzuweisen. Problematisch bei Vorliegen einer GW-Strömung im Bohrloch während des Verfüllvorgangs ist die resultierende Mischdichte aus Verfüllsuspension und Grundwasser im Bohrloch. Dadurch verliert die Berechnungsformel zur Ermittlung der erforderlichen Suspensionsdichte (s. oben) ihre Gültigkeit. Es ist grundsätzlich denkbar, dass zur Nachberechnung der Technikums- und Realmaßstabsversuche entwickelte Berechnungsmodell (Kapitel 7.4) auch auf die Verfüllung von Feld-Erdwärmesonden zu übertragen. Allerdings ist hierfür eine präzise Ermittlung der relevanten Parameter (Anbohrtiefen, Druckpotential und Volumenströme der angebohrten GWL) erforderlich. Zudem muss berücksichtigt werden, dass das Berechnungsmodell im Gegensatz zu der Formel zur Ermittlung der erforderlichen Suspensionsdichte bei unterbundener GW-Strömung deutlich komplexer ist. An Stelle einer Formel, die auf der Baustelle von Hand berechnet werden kann, wäre hierfür daher die Bereitstellung der Berechnungsmethodik in Form eines Berechnungstools oder einer App denkbar. Der Mehrwert einer derartigen Lösung sollte im Kreis der relevanten Akteure

(Bohrunternehmen, Messtechnikanbieter, Wissenschaft, Behörden/UM) diskutiert werden.

9. LITERATUR

- AD-HOC-Arbeitsgruppe Geologie. (2011). Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Wiesbaden: Bund/Länderarbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. Abgerufen am 09.. 08. 2016 von https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Downloads/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf
- Akbulut, S. & Saglamer, A. (2002): Estimating the groutability of granular soil: a new approach.- Tunnelling and Underground Space Technology 17, 371-380.
- API Spec 10A:R2015 (2010): Specification for Cements and Materials for Well Cementing, Twenty Fourth Edition.
- Arwanitaki, A., König, D. & Triantafyllidis, T. (2007): Zum Kontaktverhalten zwischen suspensionsgestützten Ortbetonwänden und dem anstehenden Boden.- Bautechnik 84, 781-792.
- Bartington Instruments Ltd. (o.D.): Operation manual for MS2 magnetic susceptibility system, Witney, Bartington.
- Bell, L. A (1982): Cut Off in Rock and Alluvium at Asprokremmos Dam. In Proceedings of the ASCE Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, 172 – 186.
- Benedix, R. (2011): Bauchemie, 5. Auflage, ISBN-978-3-8348-1348-0, 541 S. (Vieweg+Teubner-Verlag).
- Berverskog, B.; Puigdomenech, I. (1996): Revised pourbaix diagrams for iron at 25–300 C, Corrosion Science, 38, 2121-2135.
- Burkhardt, F. (2014). Herausforderungen im kritischen Stockwerksbau in Baden- Württemberg: Lösungen und Hintergründe. bbr (02-2014), S. 25-29.
- Burwell, E. B. (1958): Cement and clay grouting of foundations. Practice of the corps of engineering. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 84, 1551/1 – 1551/22.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2013): Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, Eine Einführung, Weinheim, WILEY-VCH Verlag, S.740-746, 687.
- Cody, A. M.; Lee, H.; Cody, R. D.; Spry, P. G. (2004): The effects of chemical environment on the nucleation, growth, and stability of ettringite $[Ca_3Al(OH)_6]_2(SO_4)_3 \cdot 26H_2O$, Cement and Concrete Research, 34, 869-881.
- DAfStB Richtlinie "Selbstverdichtender Beton" (2012): Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) - Teil 1: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA - Teil 2: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 206-1, DIN EN 206-9 und DIN 1045-2 - Teil 3: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 13670 und DIN 1045-3. Berlin: Beuth Verlag.
- Damidot, D.; Glasser, F. P. (1993): Thermodynamic investigation of the $CaO-Al_2O_3-CaSO_4-K_2O-H_2O$ system at 25° C, Cement and concrete research, 23, 1195-1204.

- Dearing, J. (1994): Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System, Kenilworth, Chi Pub.
- DIN-Fachbericht CEN/TR 15697 (2008): Zement – Prüfung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich des Sulfatwiderstandes – Bericht zum Stand der Technik, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN 196-1 (2016): Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1: Berlin (Beuth Verlag).
- DIN EN 196-2 (2013): Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement, Berlin (Beuth Verlag).
- DIN EN 196-3 (2017): Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 196-6 (2010) Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit. 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 1045-2 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton — Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (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 EN ISO 1183-3 (2000): Kunststoffe - Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 3: Gas-Pyknometer-Verfahren. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 4127 (2014): Erd- und Grundbau - Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangsstoffe: 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 4126 (2013): Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden, Berlin (Beuth Verlag).
- DIN EN ISO 7980 (2000): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Calcium und Magnesium - Verfahren mittels Absorptionsspektrometrie, Berlin (Beuth Verlag)
- DIN EN ISO 10426-1 (2010): Erdöl- und Erdgasindustrie - Zemente und Materialien für die Zementation von Tieflochbohrungen - Teil 1: Anforderungen (ISO 10426-1:2009 + Cor.1:2010). Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 10523 (2012): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung des pH-Werts (ISO 10523: 2008), Berlin (Beuth Verlag).

- DIN EN 12390-15 (2019): Prüfung von Festbeton - Teil 15: Adiabatisches Verfahren zur Bestimmung der Wärme, die während des Erhärtungsprozesses von Beton freigesetzt wird; Deutsche Fassung EN 12390-15: Berlin (Beuth Verlag).
- DIN EN 12457-4 (2003): Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung – Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung).
- 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 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 38404-6 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C); Bestimmung der Redox-Spannung (C 6): Berlin (Beuth Verlag).
- DIN 38409-7 (2005): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) – Teil 7: Bestimmung der Säure- und Basenkapazität.
- DIN 38414-T4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser, Berlin (Beuth Verlag).
- DIN 38414-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).
- Domes, X. (2015): Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive soils.- Henry Hydraulic Engineering Repository, 202S.
- Donel, M. (1990): Bodeninjektionstechnik. Verlag Glückauf, Essen.
- 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. (2000). *Optimierung von Erdwärmesonden*. München: Abschlussbericht zum DBU-Vorhaben AZ 17013.

- 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).
- EPA Method 9038: Sulfate (Turbidimetric). United States Environmental Protection Agency (<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/9038.pdf>).
- Frank, J. et al. (2011): Prüfwelle 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.
- Franzreb, M. (2003): Magnetettechnologie in der Verfahrenstechnik wässriger Medien, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, wissenschaftliche Berichte FZKA 6916, ISSN 0947-8620.
- Grimm, M., Stober, I., Kohl, T., Blum, P. (2014): Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg.- Grundwasser, 19/4, 275-286 (DOI 10.1007/s00767-014-0269-1).
- Grotzinger, J., Jordan, T. (2017): Press/Siever Allgemeine Geologie. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- 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.
- Guy, A.G. (1976): Essentials of Materials Science, New York, McGraw-Hill Book Company.
- Hauber, L.; Jordan, P.; Madsen F. T.; Nüesch, R.; Vöggtli, B. (2005): Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen: Ursachen und Wirkungen des Quellvorganges, Geologisch-palaeontologisches Institut der Universität Basel
- Hermann. (2008). *Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden*. Karlsruhe: Dissertation.
- Hermansson, H. P. (2004). The stability of magnetite and its significance as a passivating film in the repository environment (No. SKI-R--04-07): Swedish Nuclear Power Inspectorate.
- Hobbs, D. W.; Taylor, M. G. (2000): Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete. Cement and concrete research, 30, 529-533.

- Hobiger, G. (1997): Kohlensäure in Wasser – Theoretische Hintergründe zu den in der Wasseranalytik verwendeten Parametern. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien (Österreich), 2. Auflage, BE-086a, ISBN 3-85457-352-9, 45 S.
- ISO 13320 (2009): Partikelmessung durch Laserlichtbeugung. Berlin: Beuth Verlag.
- Kaesche, H. Die Korrosion der Metalle (2011): Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- Kainrath, A. (2017): Injektionen im Lockergestein – Prüfverfahren für zementbasiertes Injektionsgut und injizierte Böden.- https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_262621.pdf
- King, J., & Busch, E. (1961): Symposium on Grouting of Granular Materials, 2791, SM 2., Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers Paper 2791.
- Köhler, S. (2005): Mechanismen der Thaumasitbildung in unterschiedlichen Bindemittelsystemen. Cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 5 (2005), Technische Universität München, 2 S.
- Köhler, S. (2009): Thaumasitbildung in Modellsystemen und die Bedeutung des Ettringits, Dissertation, TU München
- Kolymbas D. (1998): Quellen- bzw. Schwellen. In: Geotechnik - Tunnelbau und Tunnelmechanik. Springer, Berlin, Heidelberg
- 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.
- Kovári, K.; Chiaverio, F. (2007). Modulares Knautschsystem für Tunnel in stark quellfähigem Gebirge. STUVA TAGUNG, 7, 195-200.
- Kravetz, G. (1958): Cement and Clay Grouting of Foundations: The Use of Clay in Pressure Grouting. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 84, 1, 1 – 30.
- Kuk, M. (2004): Untersuchung zur Beeinflussung der Feinstbindemittelausbreitung im Lockergestein durch Filtrationsmechanismen, <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6447?show=full>.
- Kutzner, C. (1991): Injektionen im Baugrund. Enke, Stuttgart.
- LGRB (2010): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (2010).
- LGRB (2012): Zweiter Sachstandsbericht zu den seit dem 01.03.2010 erfolgten Untersuchungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (2012).
- LGRB (2013): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Neubaugebiets „Im Kiesel“ in Rudersberg-Zumhof. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (2013).

- Locher, F. W.; Sprung, S. (1975): Die Beständigkeit von Beton gegenüber kalklösender Kohlen- säure, In: Beton 25, Heft 7, Düsseldorf (Verlag Bau + Technik).
- LQS EWS (2011): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS).- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Lipus, K., Puntke, S. (2003): Sulfatwiderstand unterschiedlich zusammengesetzter Betone. Be- tontechnische Berichte Teil 1-2, 3/2003. www.vdz-onlinde.de.
- Lutz, T., & Reduth, Y. (2/ 2020). QEWS II- Untersuchungen zur Bohrlochverfüllung und Abdichtung von Erdwärmesonden- Bohrungen. Geothermische Energie(95), S. 14-19
- Macdonald, D. D.; Shierman, G. R., Butler, P. (1972). The thermodynamics of metal-water sys- tems at elevated temperatures. Part 2: the iron-water system (No. AECL--4137). Atomic Energy of Canada Ltd.
- Malcherek, A. (o.D.): Sedimenttransport und Morphodynamik, Institut für Wasserwesen, Uni-ver- sität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- McCafferty, E. (2010). Introduction to corrosion science. Springer Science & Business Media
- Menéndez, E., Matschei, T. & Glasser, E.P. (2013): Sulfate attack of concrete.- In Alexander, M., Bertron, A. & De Belie, N. [Hrsg.] Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments: State-of-the-Art Report, RILEM TC 211 – PAE, 462 S., Dordrecht (Springer).
- Moeller, F., Frohne, H., Löcherer, K.H., Müller, H. (2008): Moeller Grundlagen der Elektrotech- nik, 19., korrigierte und durchgesehene Auflage, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, B.G. Teu- bner, S.182-185.
- Müllauer W. (2013): Mechanismen des Sulfatangriffs auf Beton – Phasenneubildungen und Ex- pansiondrücke in Mörteln unter Na₂SO₄ Belastung. Dissertation, Technische Universität München, 156 S.
- Müller. (2009). Frost- Tau- Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen von Geothermie- Bohrungen. bbr: Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Ausgabe 07-08/2009; Bonn.
- Mutschler, T.; Fröhlich, B. (2011): Zeitliche Entwicklung von Vorgängen des Anhydritschwellens. In: VEGAS-Kolloquium 2011, Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken, Mitteilun- gen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: Heft 205
- Niggli, P. (1948): Gesteine und Minerallagerstätten, Erster Band, Allgemeine Lehre von den Ge- steinen und Minerallagerstätten, Verlag Birkhäuser Basel: S. 464.
- Ogawa, K.; Roy, D. M. (1981). C₄A₃S hydration ettringite formation, and its expansion mechanism: I. expansion; Ettringite stability. Cement and Concrete Research, 11, 741-750.

- Pimentel, E.; Anagnostou, G. (2013). New apparatus and experimental setup for long-term swelling tests on sulphatic claystones, *Rock mechanics and rock engineering*, 46, 1271-1285.
- Pipilikaki, P.; Papageorgiou, D.; Teas, C.; Chaniotakis, E.; Katsioti, M. (2008). The effect of temperature on thaumasite formation. *Cement and Concrete Composites*, 30, 964-969.
- Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2013): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Neubaugebiets „Im Kiesel“ in Rudersberg-Zumhof - Sachstandsbericht
- Reuß, & Kuckelkorn. (2011). Systemdichtigkeit von Erdwärmesonden. Regensburg: Otti-Symposium Oberflächennahe Geothermie.
- Riegger, M. (2013): EWSPlus, Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden.- Endbericht, 139 S., Stuttgart.
- Riegger, M., Rolker, J., Steger, H. Stober, I., Haist, M., Eckhardt, J-D., Schlager, P. Zemann, M., Zorn, R. & Huttenloch, P. (2017): Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie (2017), Projektnummern L75 13004-13007, gefördert durch das Land Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft), Projektlaufzeit August 2013 – März 2016, <http://www.solites.de/Portals/0/content/2017-04-06%20EWS-tech%20Abschlussbericht.pdf..>
- Ring, M. (2016). Development of a test facility for the examination of borehole heat exchanger grouting processes in boreholes with vertical ground water movements. Freiburg: Albert-Ludwigs University of Freiburg.
- Santherr, U. (o.D.): CemTrakker 2.0 – Suszeptibilitätsmesssystem, Kisslegg, Santherr Geothermie Technik, pdf: http://santherr-geothermieteknik.com/index_htm_files/CemTrakker_V2_neu.pdf.
- Schön, J. (1983): Petrophysik: Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen, Enke Stuttgart.
- Schlötzer, C (1995): Filtrationsverhalten von Dichtuspensionen an flüssigkeitsgestützten Erdwänden. Mitteilung des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover. Heft 42.
- Schreiner, M., Kreysing, K. (1998): Handbuch zur Erkundung des Untergrunds von Deponien und Altlasten Band 4, Geotechnik Hydrogeologie, Springer Berlin, Heidelberg: S.235.
- Schuler, U. & Brauns, J. (2000): Die effektive Porenöffnung körniger Erdstoffe – ein Kriterium für die Injizierfähigkeit von Suspensionen. *Geotechnik* 23. 4.
- Schuze, B. (1992): Injektionssohlen – Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe.

- Sherard, J., Dunnigan, L., & Talbot, J. (1984): Filters for Silts and Clays. *Journal of Geotechnical Engineering* 110, 6, 701–718.
- Solites. (2020). interner Bericht. Stuttgart.
- Stark, J. & Wicht, B. (2013): *Dauerhaftigkeit von Beton*, Springer Vieweg Verlag, 2. Auflage, ISBN 978-3-642-35277-5, 479 S.
- Stober, I. & Bucher, K. (2014): *Geothermie.- Springer Verlag*, 2. Auflage, 302 S., 145 Abb., Heidelberg (DOI 10.1007/978-3-642-41763-4).
- Styrikovich, M. A.; Martynova, O. I.; Kobayakov, I. F.; Men'Shikova, V. L.; Reznikov, M. I. (1971). Solubility of magnetite in boiling water at high temperature. *Teploenergetika*, 18, 82-83.
- Svoboda, J. (1987): *Magnetic Methods for the Treatment of Minerals, Developments in Mineral Processing*, 8 Elsevier Sc. Publishers, Amsterdam.
- Sweeton, F. H.; Baes Jr, C. F. (1970). The solubility of magnetite and hydrolysis of ferrous ion in aqueous solutions at elevated temperatures. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2, 479-500.
- Thienel, K.-Ch. (2011): *Werkstoffe des Bauwesens, Dauerhaftigkeit von Beton – Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen*.
- Triller, F., Klinkhardt, D. (2016): Nachweis magnetisch markierter Baustoffe im Ringraum von Erdwaermesonden - Möglichkeiten und Grenzen des Magnetik-Logs. *bbr Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie* 67, S. 44–51.
- Uni Wien (2018): LW9, Elektrische und magnetische Eigenschaften von Stoffen, pdf: <https://www.univie.ac.at/anfpra/neu1/lw/lw9/LW9.pdf>.
- 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 (2019): *Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. VDI Handbuch Energietechnik – VDI-Handbuch Wärme-/Heiztechnik; VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU).
- 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).
- Vergara, M. R.; Balthasar, K.; Triantafyllidis, T. (2014). Comparison of experimental results in a testing device for swelling rocks, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 66, 177-180.

Wolff, G. (2004): Technischer Heilquellenschutz in Stuttgart. Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Bd. 4. Stuttgart (98 S.)

10. ANHANG

10.1. Aufbau automatischer Verfüllstandskontrollversuch (AP. C)

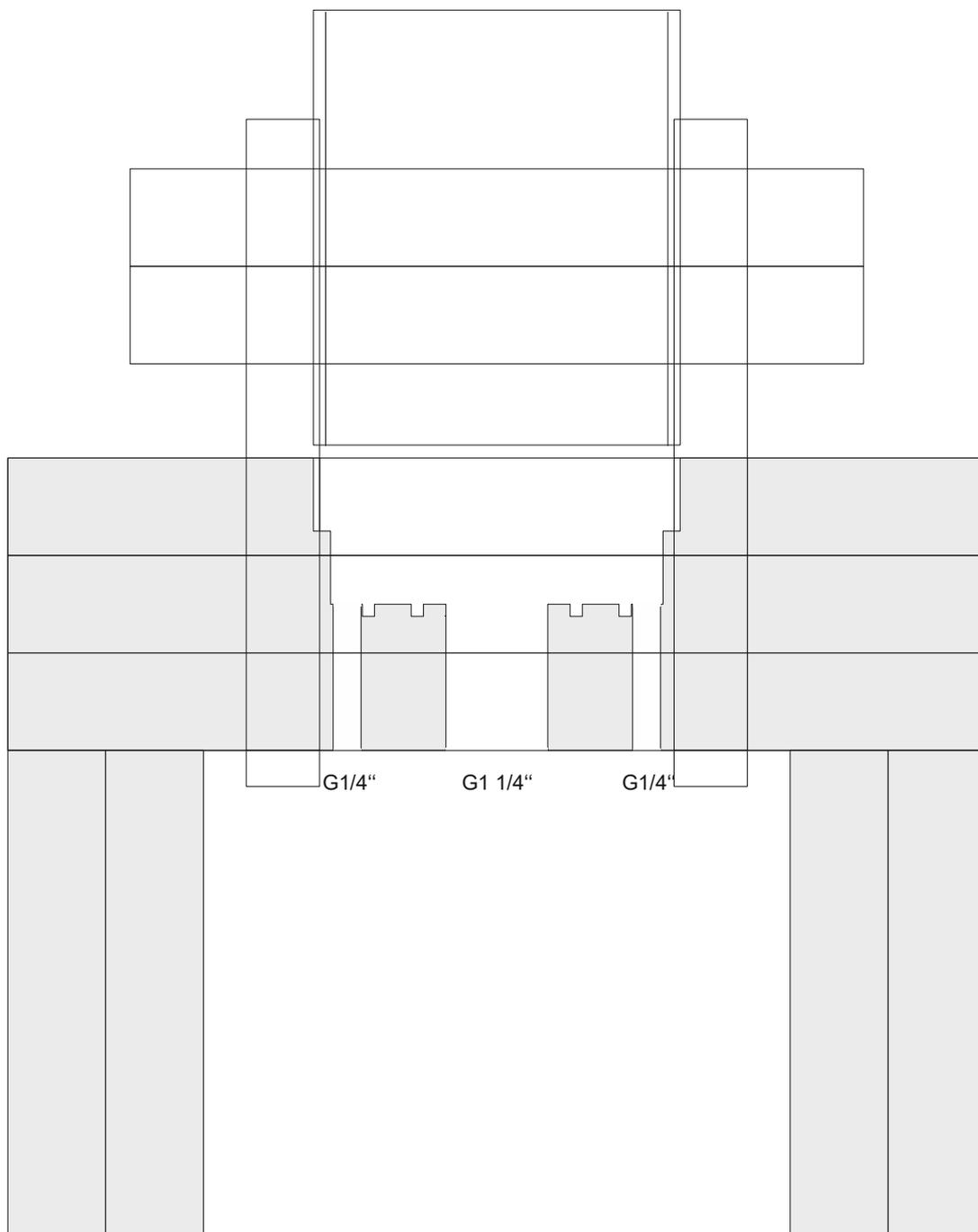


Abbildung 10-1: Schematische Darstellung des automatischer Verfüllstandskontrollversuchs

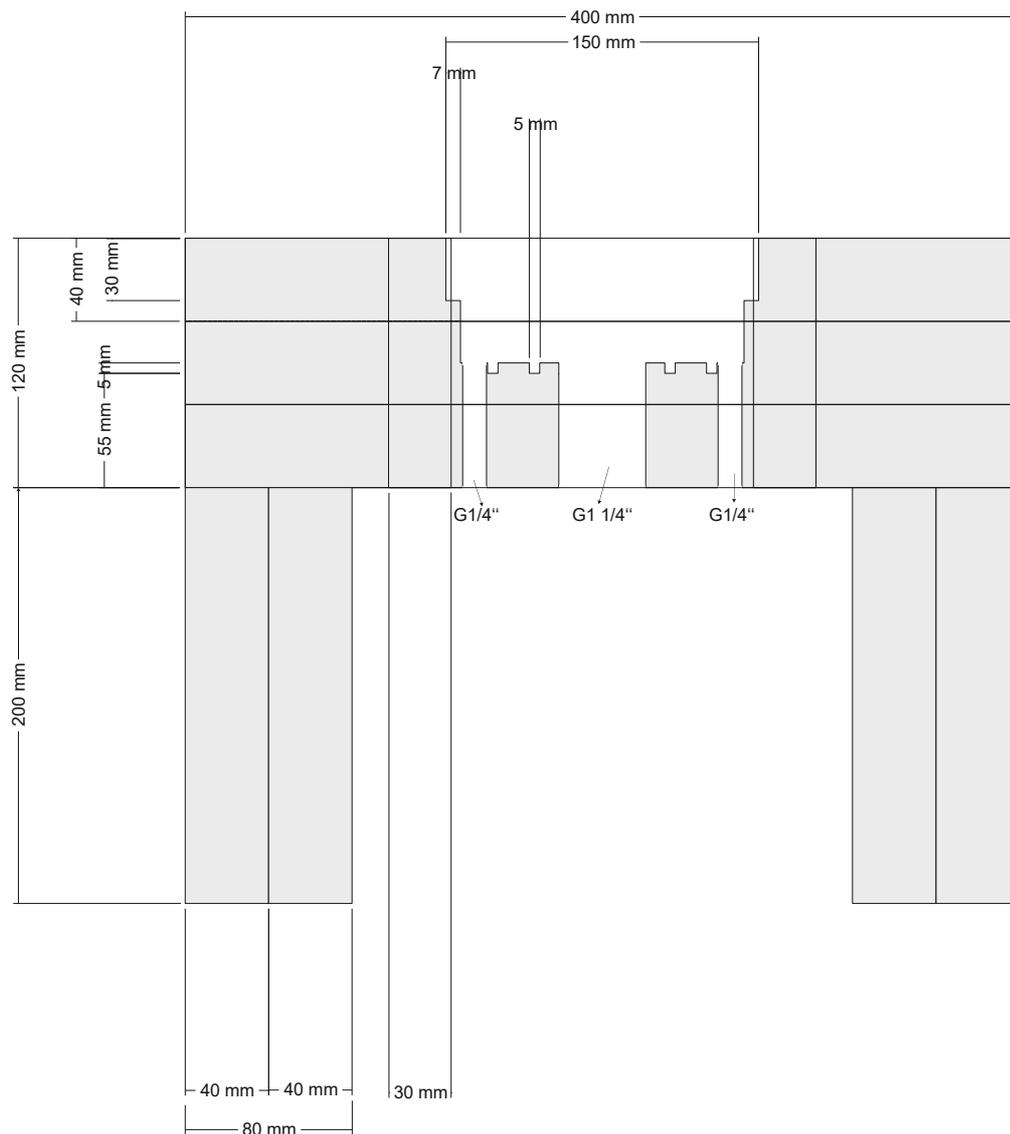


Abbildung 10-2: Seitenansicht der Bodenplatte des automatischer Verfüllstandskontrollversuchs

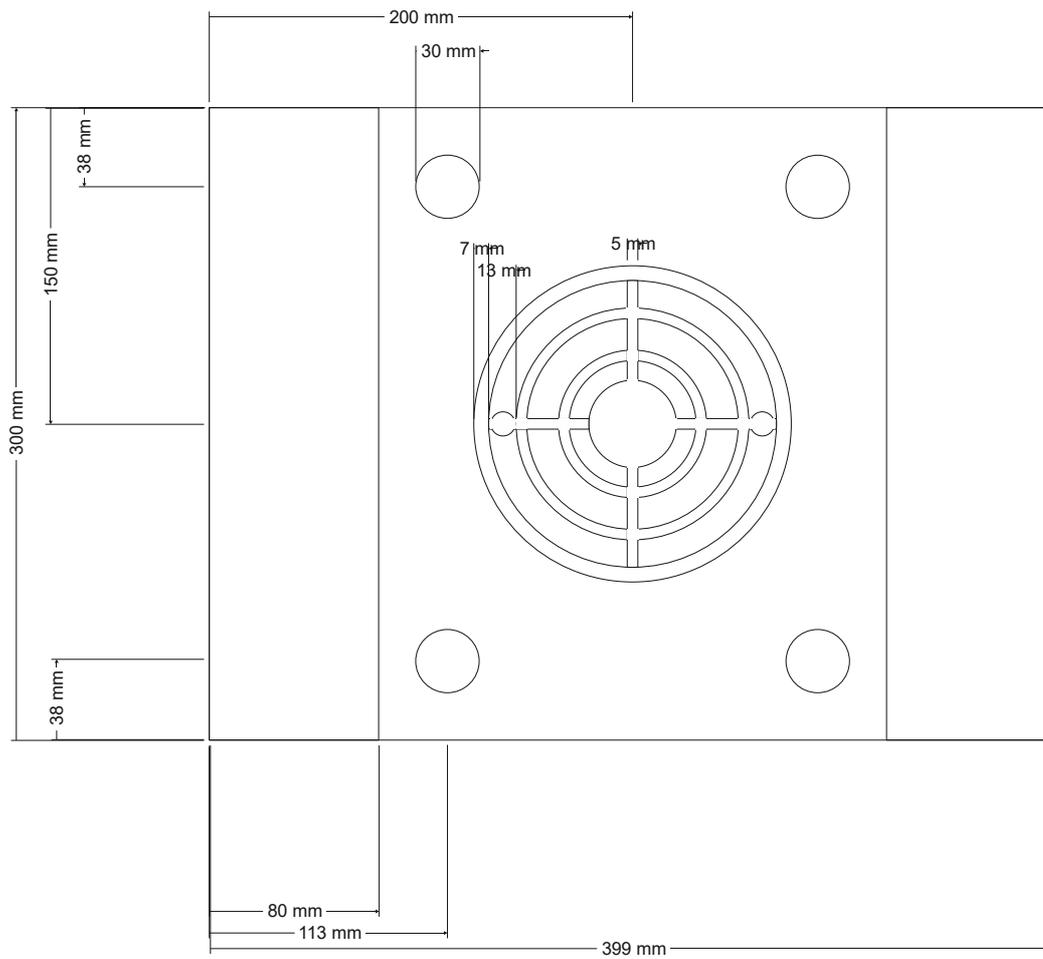


Abbildung 10-3: Aufsicht Bodenplatte des automatischer Verfüllstandskontrollversuchs

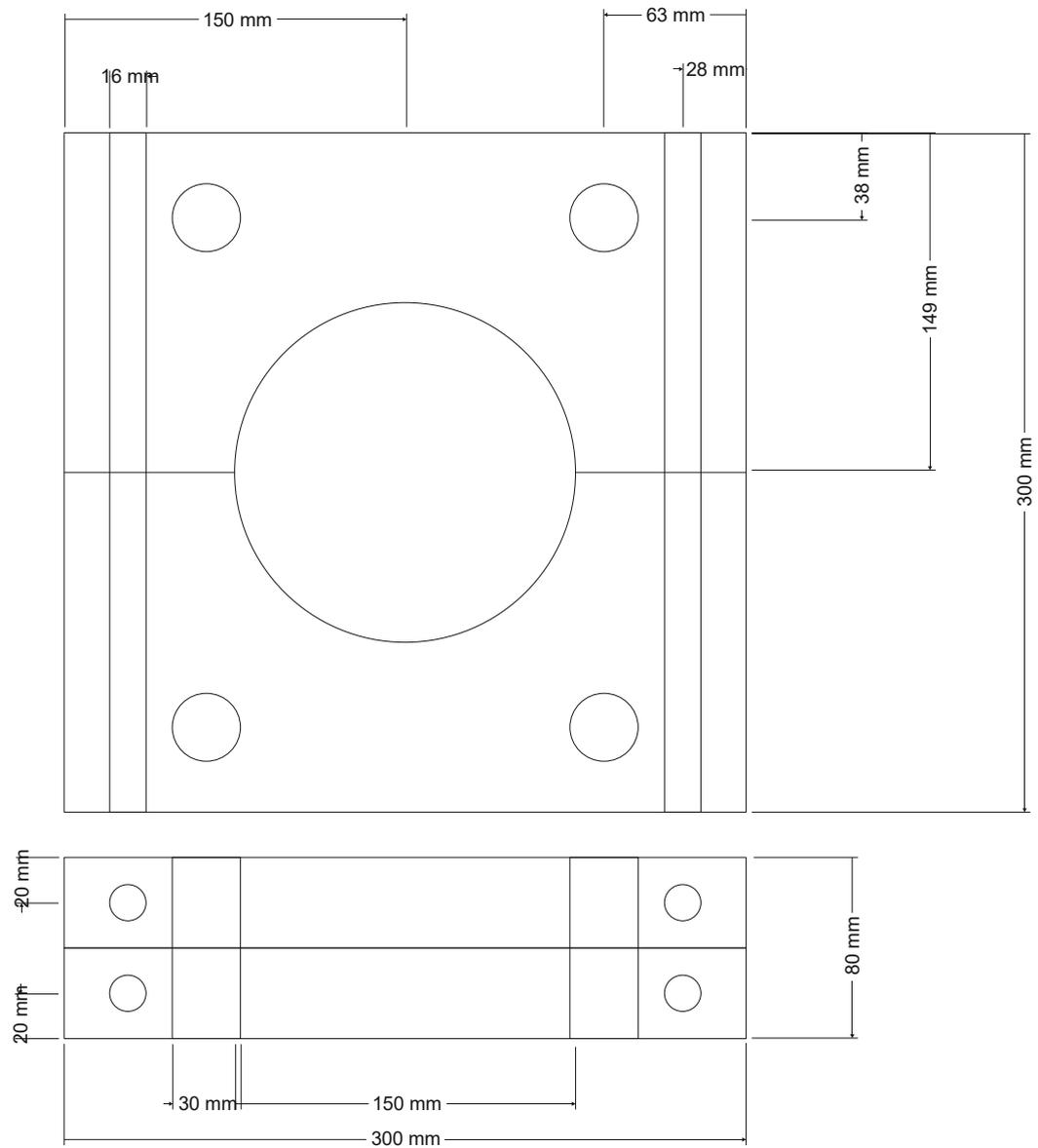


Abbildung 10-4: Skizze Abfangschelle

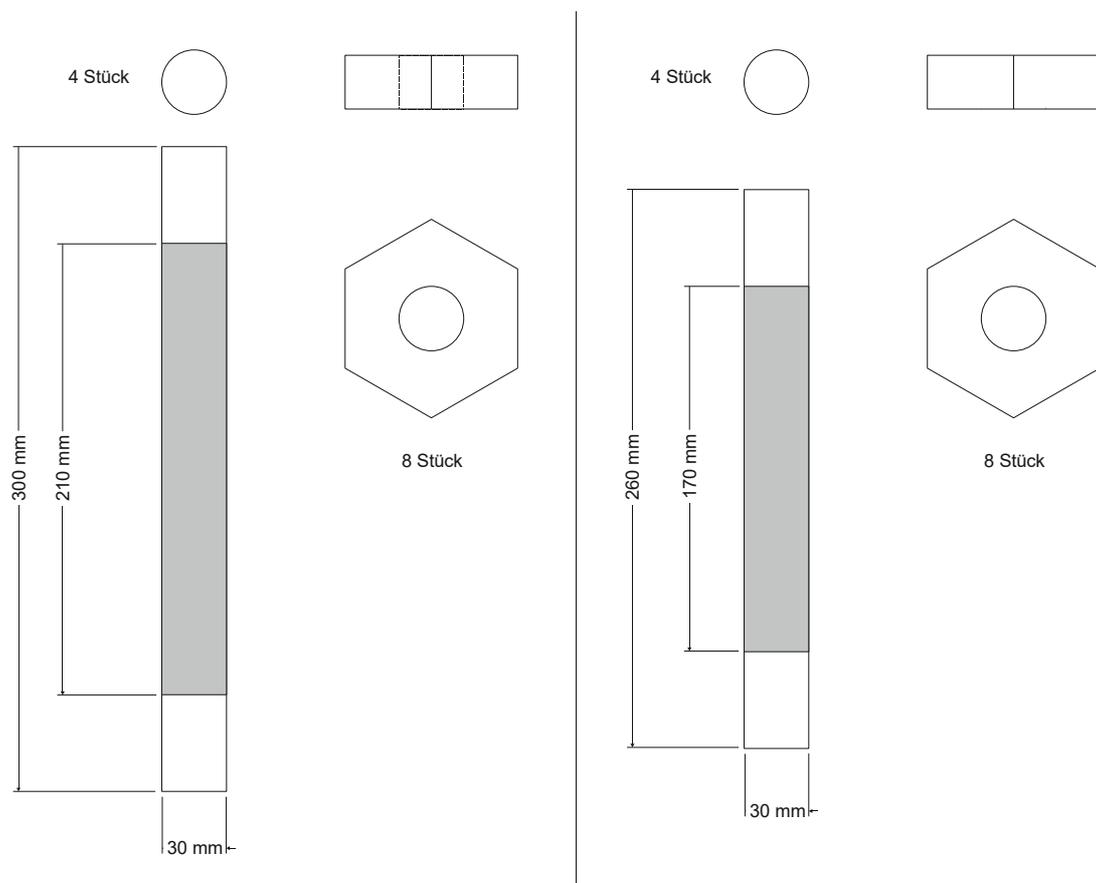


Abbildung 10-5: Schrauben zur Fixierung der Abfangschelle an die Bodenplatte

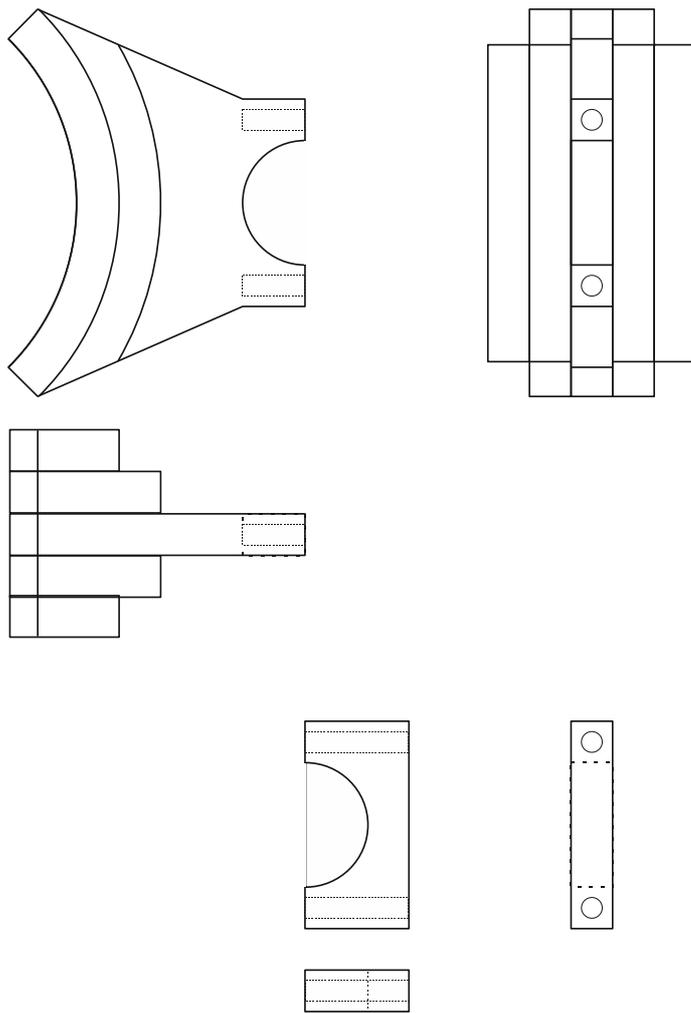


Abbildung 10-6: Skizze der Wandhalterung

10.2. Ergebnisse automatischer Verfüllstandskontrollversuch (AP. C)

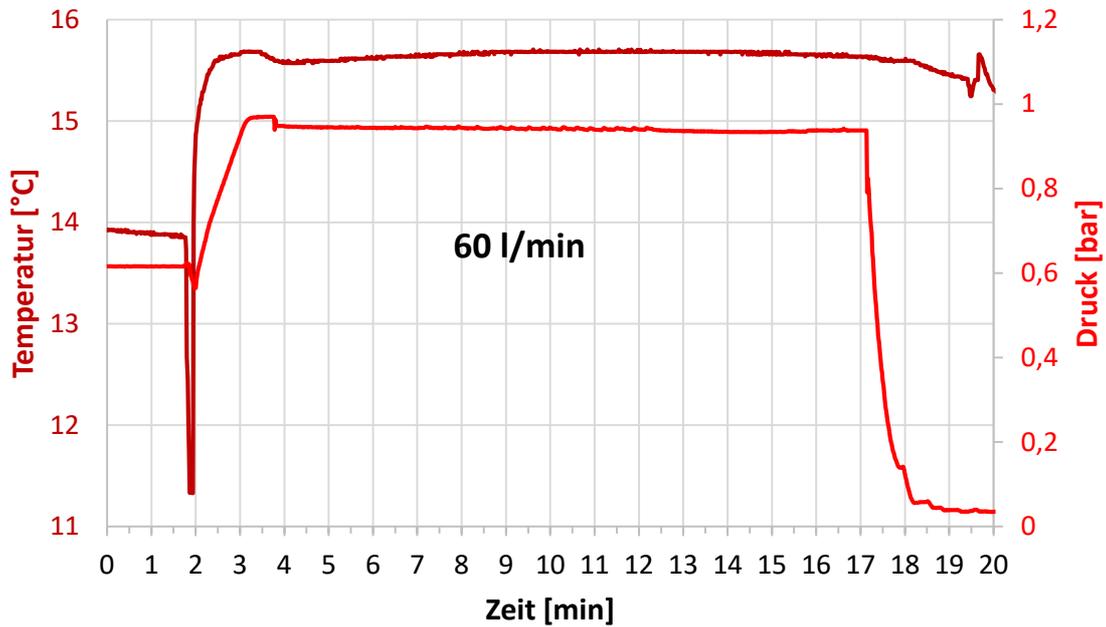


Abbildung 10-7: Druck- und Temperaturverläufe des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom).

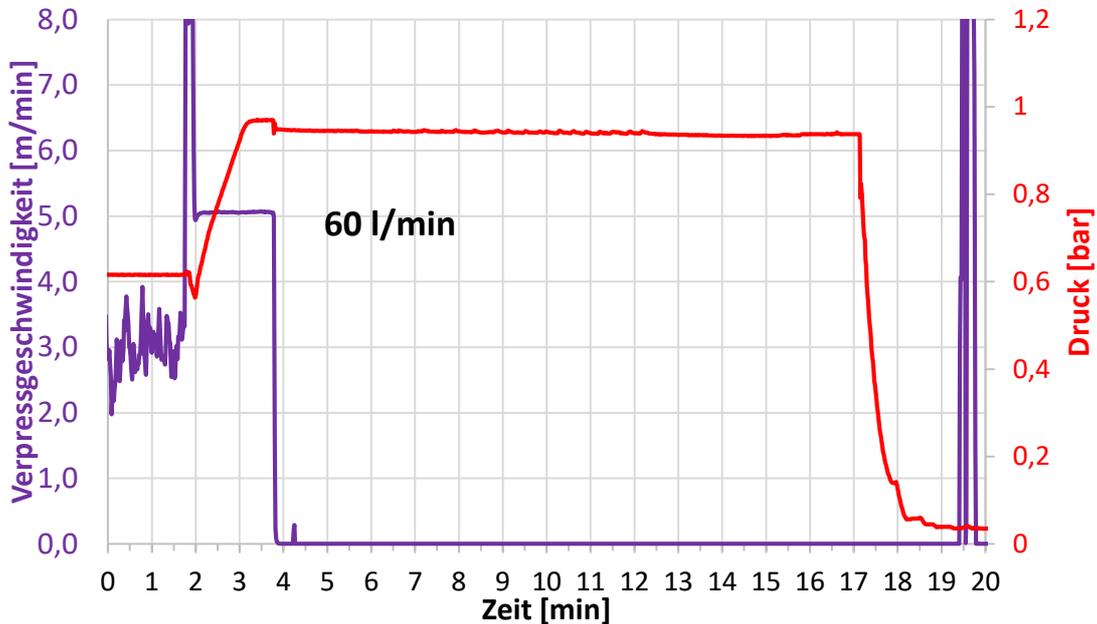


Abbildung 10-8: Druck und Verpressgeschwindigkeiten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom).

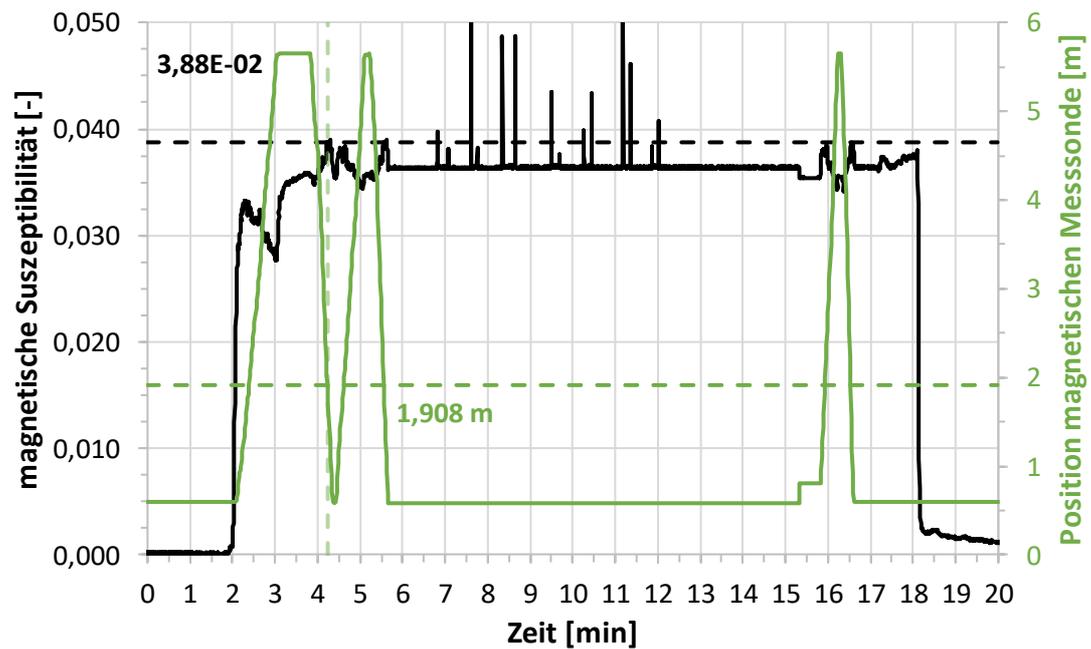


Abbildung 10-9: Verlauf der höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d (~60 l/min Volumenstrom).

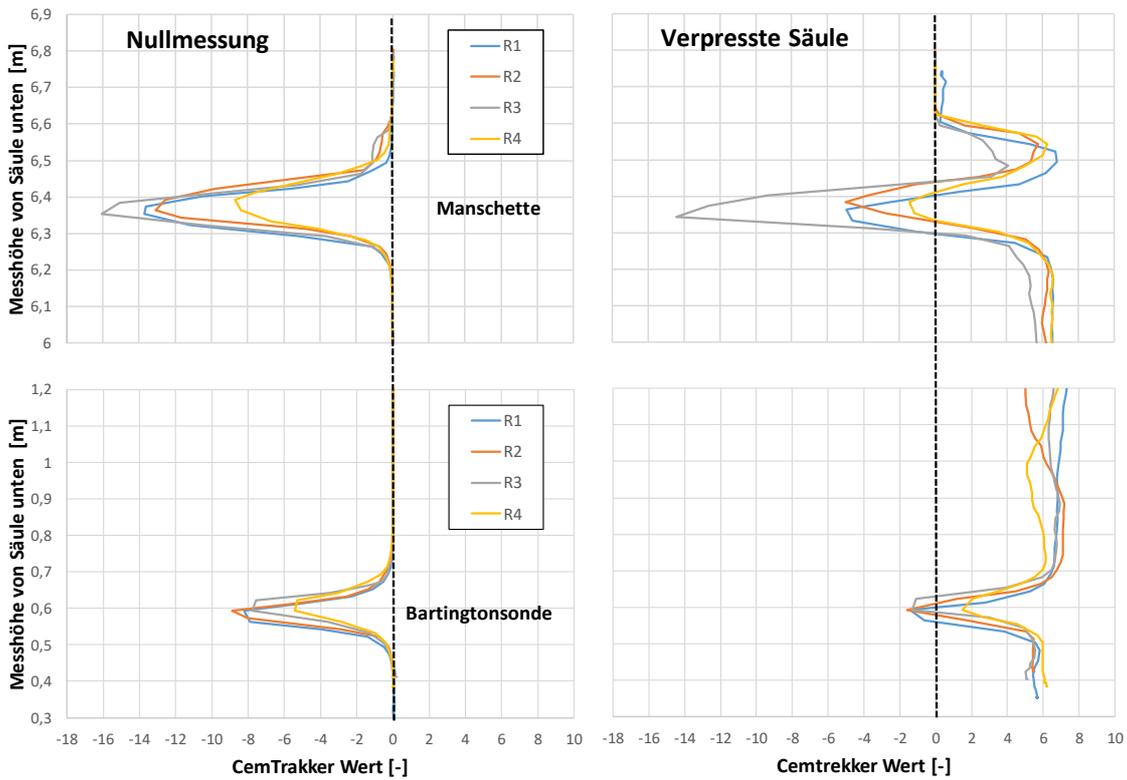


Abbildung 10-10: Einflussbereich der CemTrakker-Werte durch den Aufbau des Füllstandkontrollversuchs am Beispiel des Baustoffs 15d (~60 l/min Volumenstrom), oben: Fokus auf Manschette (Halterung für Säule), unten: Bartington-Messring, links: Nullmessung, rechts: Verpresste Säule.

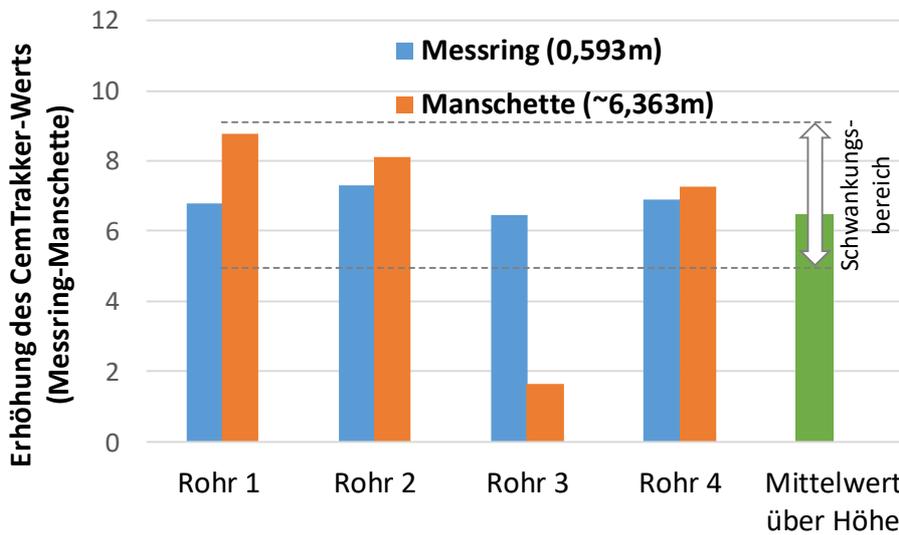


Abbildung 10-11: Erhöhung des minimalen CemTrakker-Werts nach Verpressen des Baustoffs 15d (~60 l/min Volumenstrom) am Messring und der Manschette, grüne Säule mit Mittelwert über die Höhe der ungestörten Messungen mit Maximal- und Minimalbereich.

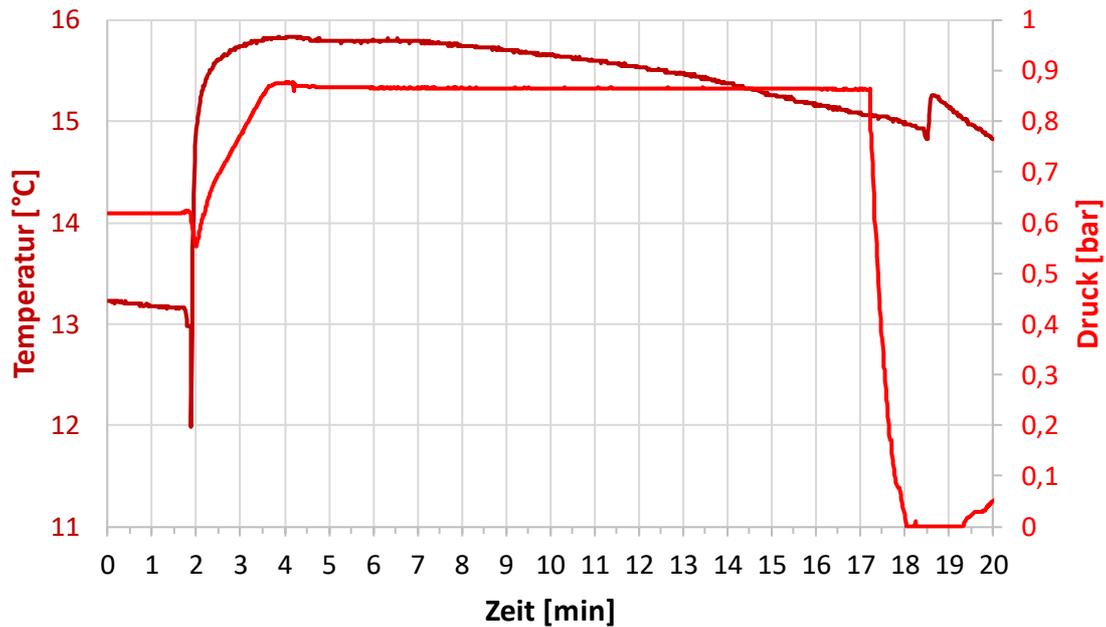


Abbildung 10-12: Druck- und Temperaturverläufe des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom, gemessen am Massendurchflussmesser).

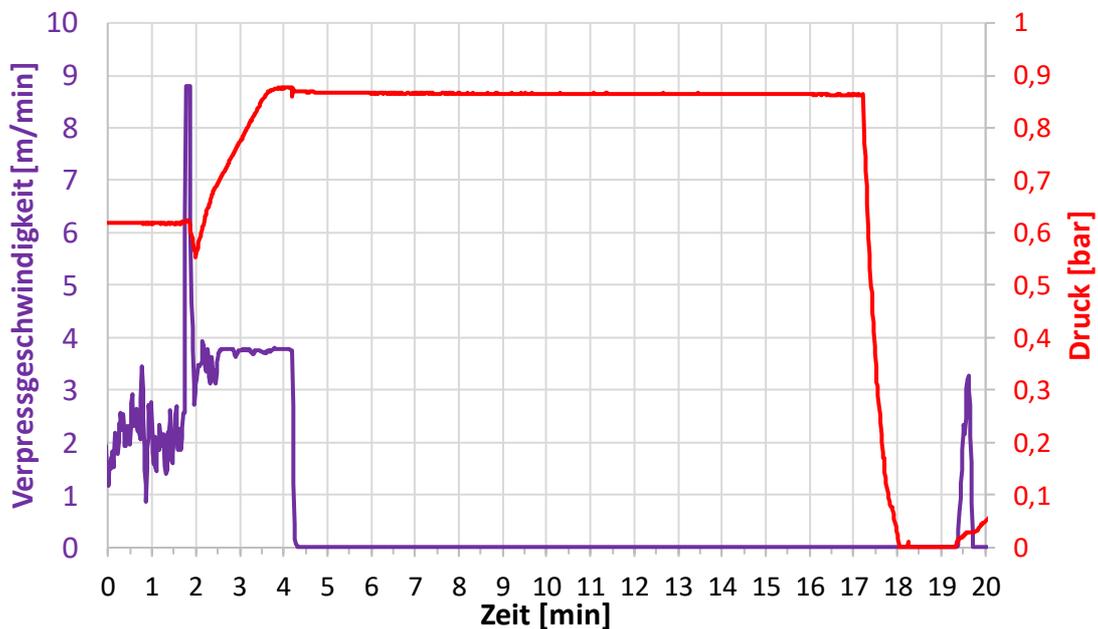


Abbildung 10-13: Druck und Verpressgeschwindigkeiten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom, gemessen am Massendurchflussmesser).

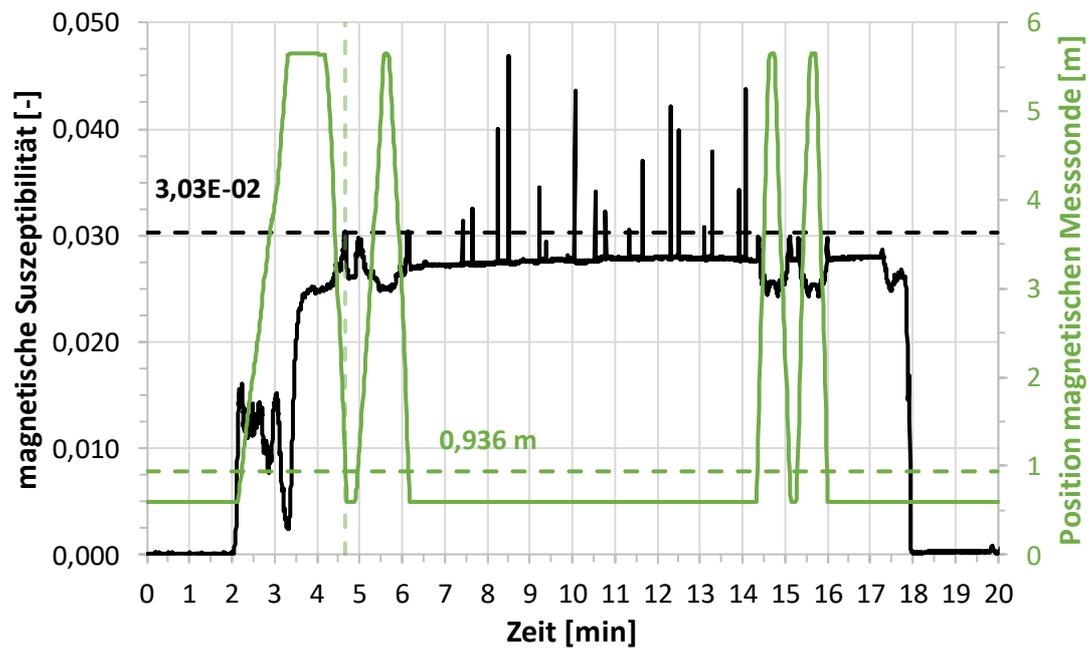


Abbildung 10-14: Verlauf der höhen-spezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 15d bei erhöhtem W/F Verhältnis (~40 l/min Volumenstrom).

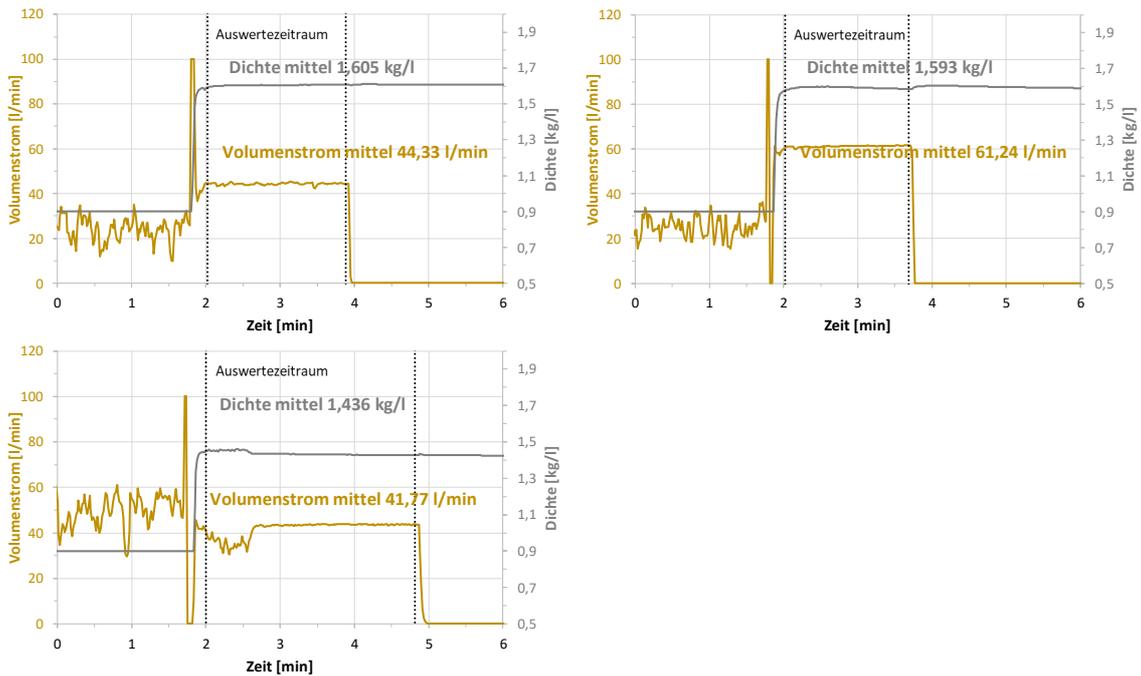


Abbildung 10-15: Volumenstrom und Dichte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 02d (gemessen am Massendurchflussmesser, (links oben: 40 l/min, links unten: 40 l/min + W/F erhöht, rechts: 60 l/min).

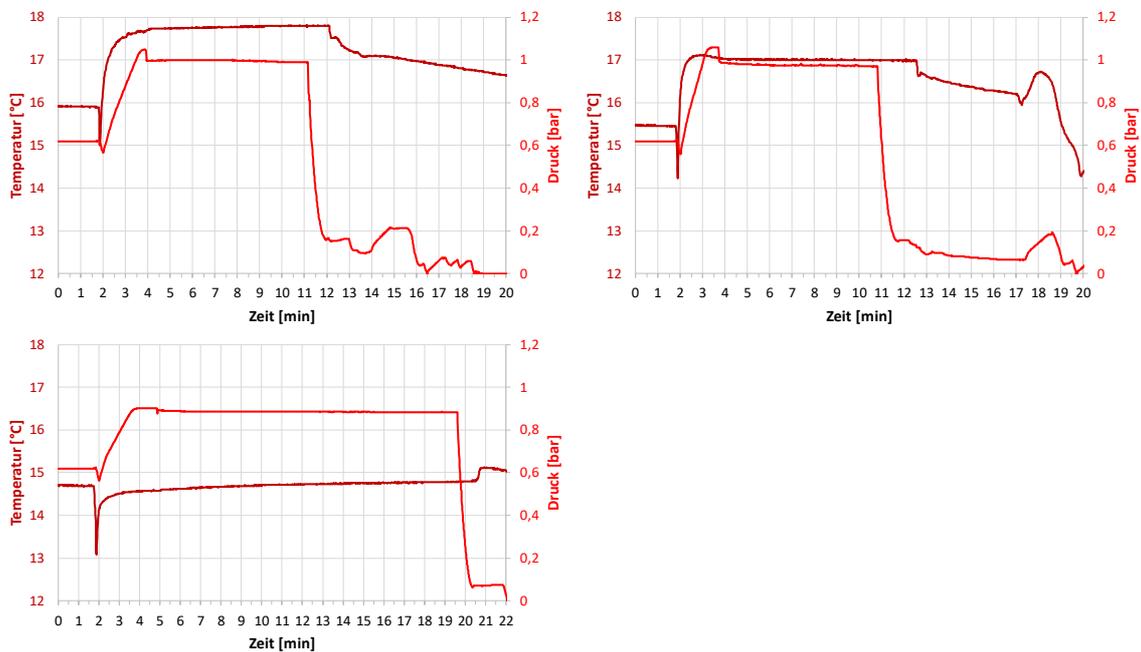


Abbildung 10-16: Druck- und Temperaturverläufe des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 02d (links oben: 40 l/min, links unten: 40 l/min + W/F erhöht, rechts: 60 l/min)

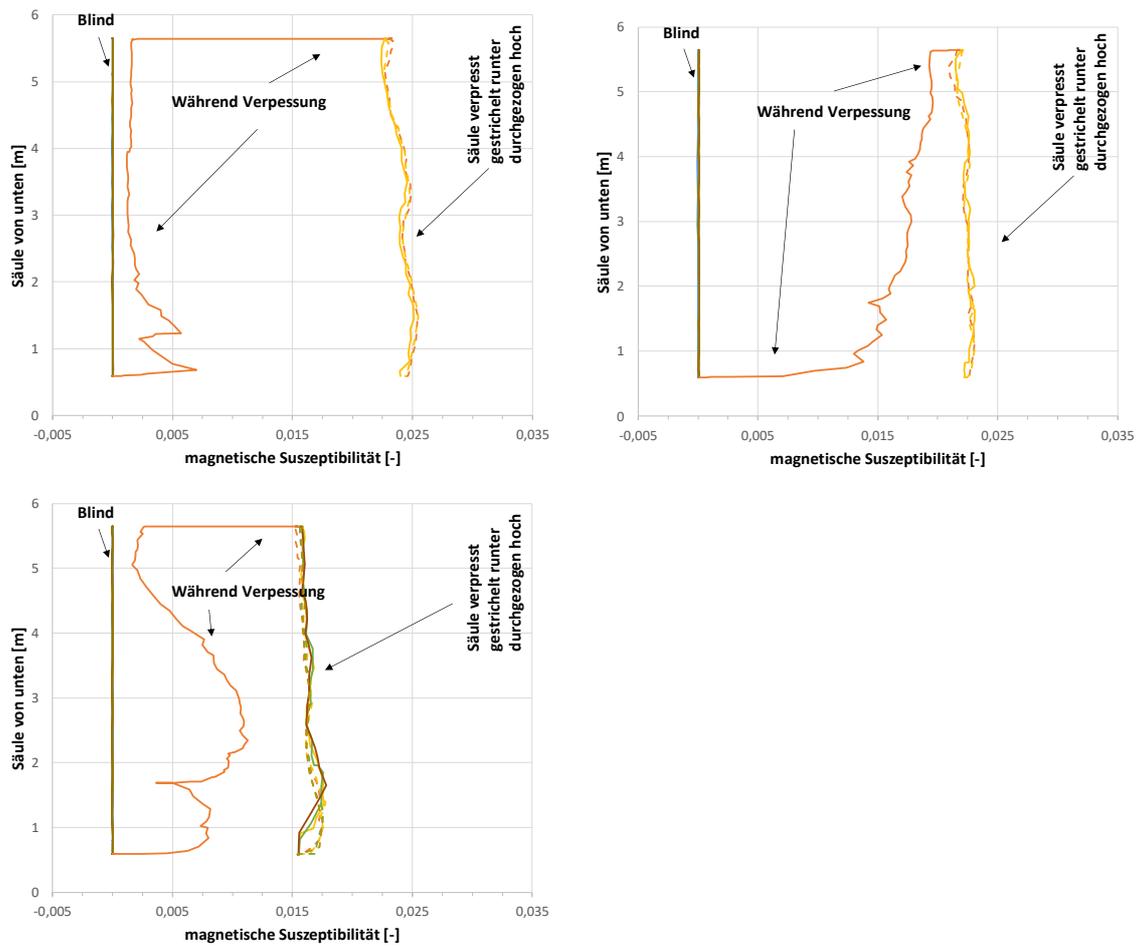


Abbildung 10-17: Höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff O2d (links oben: 40 l/min, links unten: 40 l/min + W/F erhöht, rechts: 60 l/min).

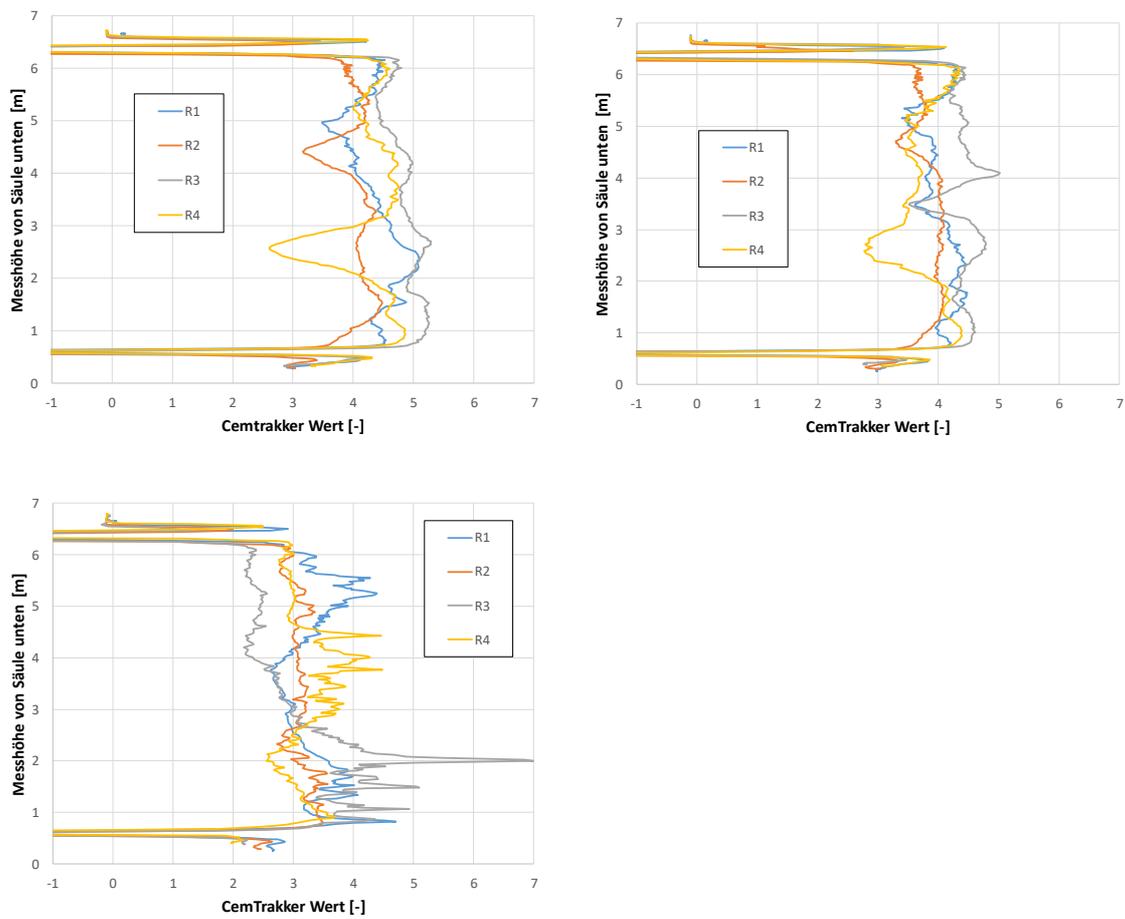


Abbildung 10-18: CemTrakker Profile des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 02d (links oben: 40 l/min, links unten: 40 l/min + W/F erhöht, rechts: 60 l/min).

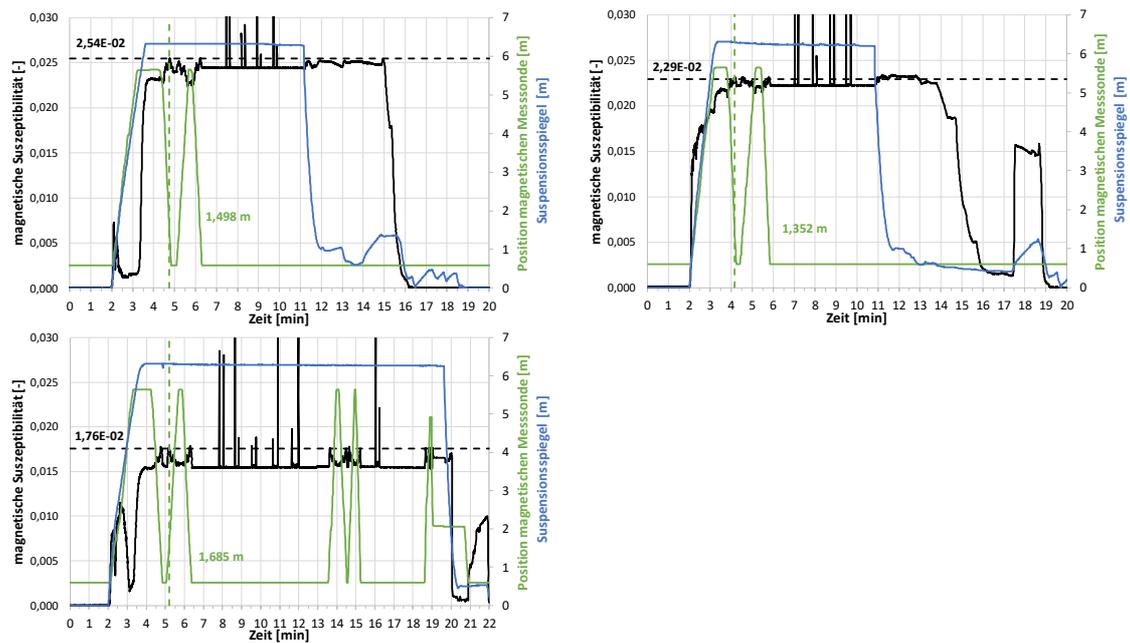


Abbildung 10-19: Verlauf der höhenpezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 02d (links oben: 40 l/min, links unten: 40 l/min + W/F erhöht, rechts: 60 l/min).

Tabelle 10-1: Maxima und Minima der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und umgerechneten CemTrakker Äquivalenten des Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 02d.

	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}
40 l/min								
Verpressph. und runter 1*	0,0255	4,4690	1,4985	0,0002	0,0362	0,5930	0,0253	4,4328
hoch 2	0,0251	4,4087	1,6543	0,0224	3,9316	5,3088	0,0027	0,4771
runter 2	0,0255	4,4755	1,3128	0,0225	3,9445	5,5978	0,0030	0,5310
Mittelwert	0,0254	4,4511	1,4885	0,0150	3,9380	5,4533	0,0029	0,5041
60 l/min								
Verpressph. und runter 1*	0,0231	4,1618	1,1272	0,0001	0,0135	0,5930	0,0231	4,1483
hoch 2	0,0231	4,1605	1,6411	0,0214	3,8452	5,4998	0,0018	0,3152
runter 2	0,0231	4,1629	1,0347	0,0215	3,8713	5,2499	0,0016	0,2916
Mittelwert	0,0231	4,1617	1,2676	0,0143	3,8583	5,3749	0,0017	0,3034
W/F erhöht								
Verpressph. und runter 1*	0,0178	3,5249	1,2711	-0,0000	-0,0072	0,5930	0,0178	3,5322
hoch 2	0,0179	3,5503	1,6845	0,0155	3,0761	0,9109	0,0024	0,4741
runter 2	0,0178	3,5356	1,2721	0,0154	3,0482	0,5930	0,0025	0,4873
hoch 3	0,0176	3,4918	1,6313	0,0155	3,0740	0,5982	0,0021	0,4177
runter 3	0,0176	3,4801	1,0413	0,0155	3,0706	0,5930	0,0021	0,4095
hoch 4	0,0178	3,5284	1,9186	0,0156	3,0870	1,2190	0,0023	0,4413
runter 4	0,0175	3,4771	0,7010	0,0154	3,0570	0,5877	0,0022	0,4201
Mittelwert	0,0177	3,5126	1,3600	0,0155	3,0688	0,7503	0,0023	0,4417

*runterfahren Zyklus 1, während Verpressphase, Beginn unterhalb Suspensionsspiegel (Kursiv)

Tabelle 10-2: Trend aus der Gradientenanalyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 02d

	$\Delta X/\text{min}$	$\Delta X/\text{h}$	$\Delta X/2\text{h}$	$\Delta X/\text{d}$
40 l/min				
Trend X_{Bart}	2,7E-06	0,0002	0,0003	0,0039
Trend X_{cem}	0,0005	0,0284	0,0569	0,6822
60 l/min				
Trend X_{Bart}	-1,1E-05	-0,0006	-0,0013	-0,0156
Trend X_{cem}	-0,0019	-0,1168	-0,2335	-2,8021
W/F erhöht				
Trend X_{Bart}	-0,0001	-0,0047	-0,0094	-0,1131
Trend X_{cem}	-0,0156	-0,9338	-1,8675	-22,4105

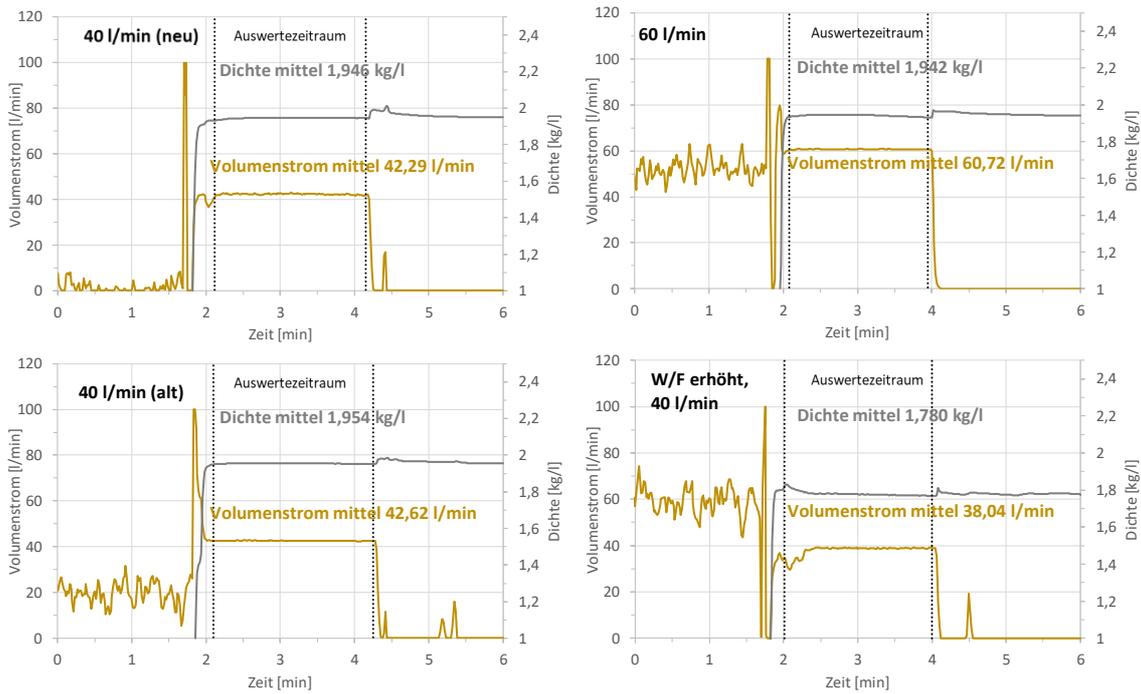


Abbildung 10-20: Volumenstrom und Dichte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d (gemessen am Massendurchflussmesser (links oben: 40 l/min (neu), links unten: 40 l/min (alt), rechts oben: 60 l/min, rechts unten: 40 l/min + W/F erhöht).

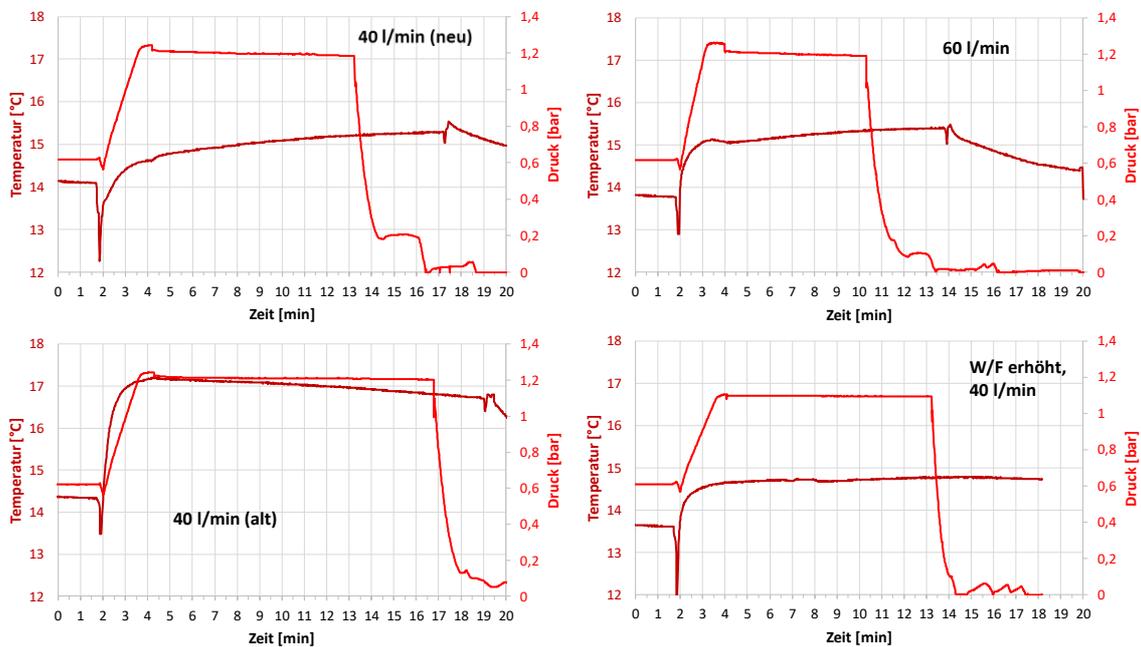


Abbildung 10-21: Druck- und Temperaturverläufe des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d (gemessen am Massendurchflussmesser (links oben: 40 l/min (neu), links unten: 40 l/min (alt), rechts oben: 60 l/min, rechts unten: 40 l/min + W/F erhöht).

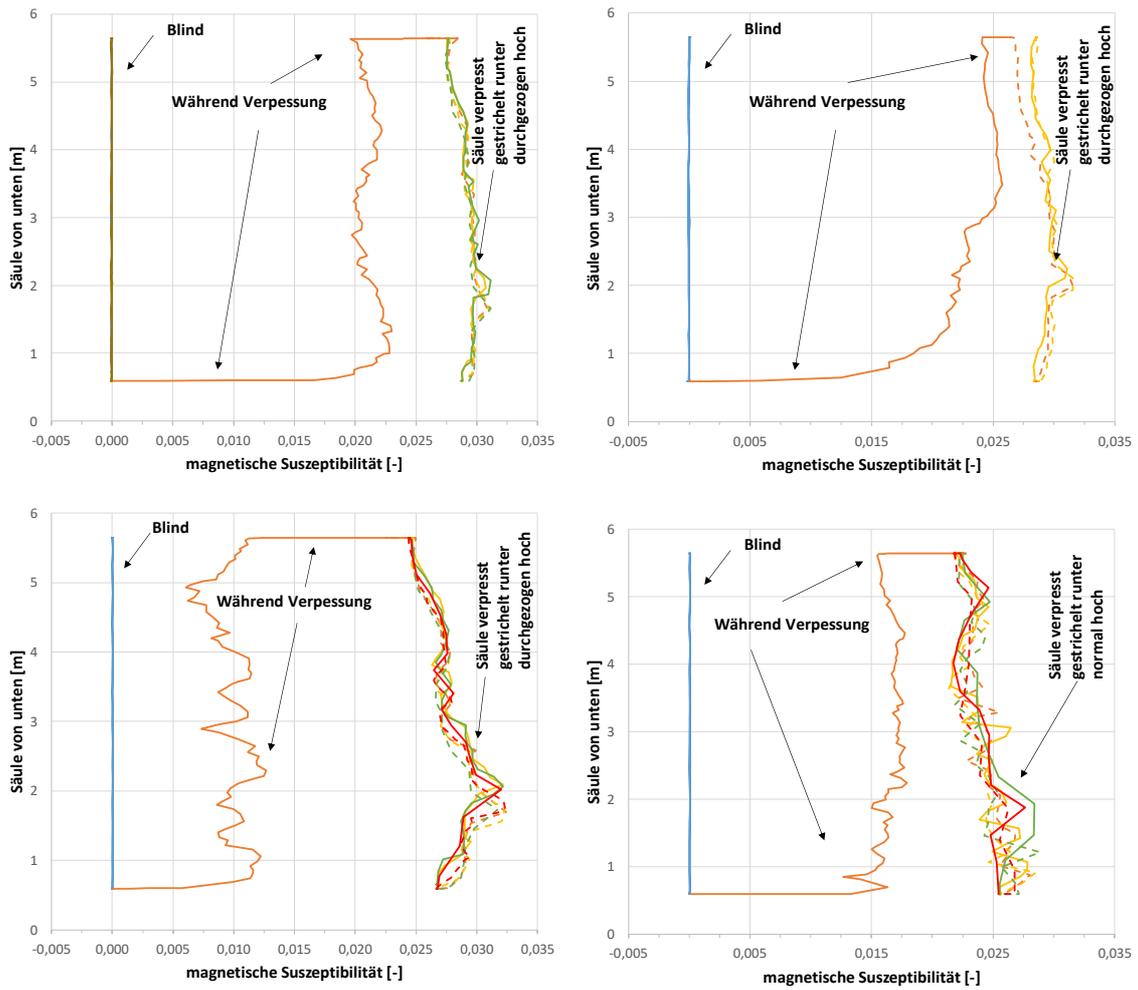


Abbildung 10-22: Höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d (links oben: 40 l/min (neu), links unten: 40 l/min (alt), rechts oben: 60 l/min, rechts unten: 40 l/min + W/F erhöht).

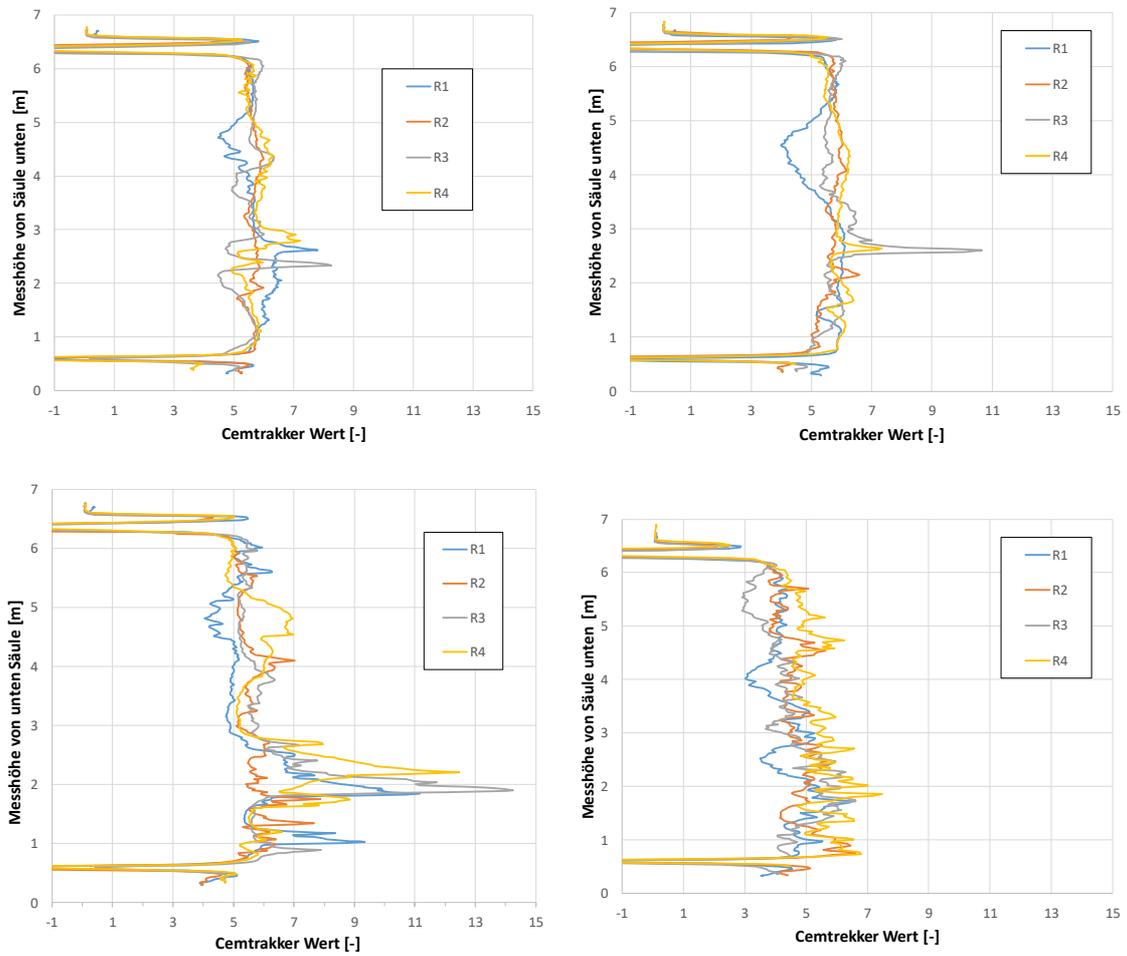


Abbildung 10-23: CemTrakker Profile des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d (links oben: 40 l/min (neu), links unten: 40 l/min (alt), rechts oben: 60 l/min, rechts unten: 40 l/min + W/F erhöht).

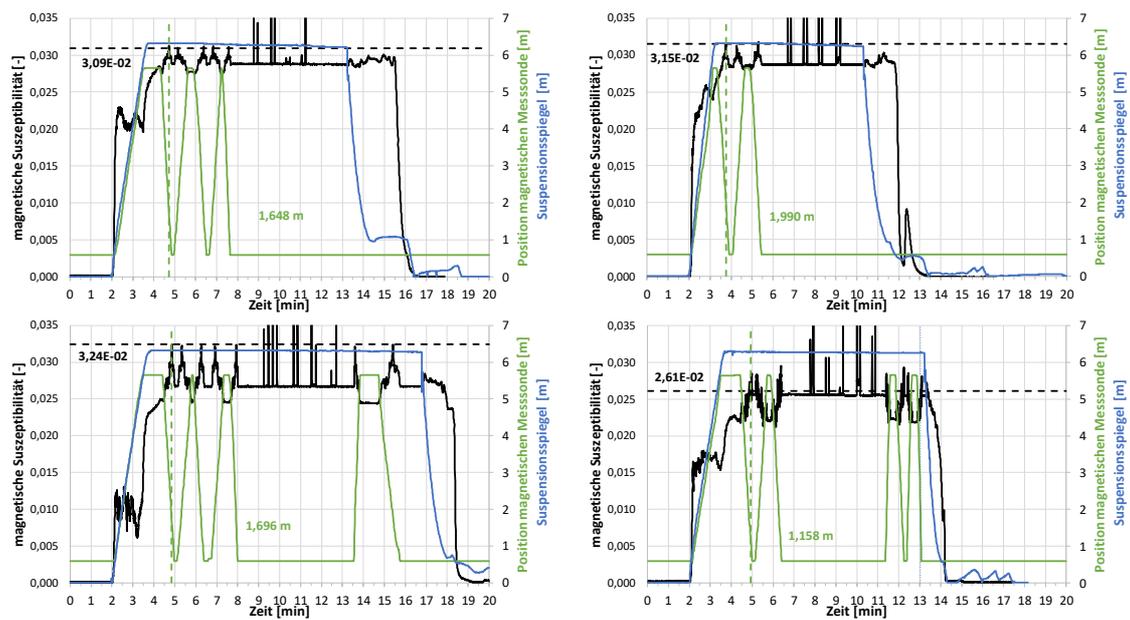


Abbildung 10-24: Verlauf der höhenpezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d (links oben: 40 l/min (neu), links unten: 40 l/min (alt), rechts oben: 60 l/min, rechts unten: 40 l/min + W/F erhöht).

Tabelle 10-3: Maxima und Minima der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und umgerechneten CemTrakker Äquivalenten des Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 07d.

	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}
40 l/min(neu)								
Verpressph. und runter 1*	0,0312	6,2442	1,6478	0,0001	0,0176	0,5930	0,0312	6,2266
hoch 2	0,0310	6,1987	1,9643	0,0274	5,4714	5,5996	0,0036	0,7273
runter 2	0,0312	6,2372	1,6260	0,0274	5,4724	5,2469	0,0038	0,7648
hoch 3	0,0311	6,2221	2,2125	0,0275	5,4939	5,6480	0,0036	0,7282
runter 3	0,0311	6,2201	1,3480	0,0274	5,4745	5,1939	0,0037	0,7457
Mittelwert	0,0311	6,2245	1,7597	0,0274	5,4780	5,4221	0,0037	0,7415
40 l/min(alt)								
Verpressph. und runter 1*	0,0324	6,8921	1,5391	0,0000	0,0062	0,5930	0,0324	6,8860
hoch 2	0,0322	6,8459	2,0948	0,0245	5,2089	5,6480	0,0077	1,6370
runter 2	0,0324	6,8736	1,5628	0,0246	5,2339	5,1130	0,0077	1,6397
hoch 3	0,0322	6,8433	2,0647	0,0245	5,2089	5,6160	0,0077	1,6344
runter 3	0,0323	6,8715	1,4547	0,0245	5,2095	5,6096	0,0078	1,6620
hoch 4	0,0321	6,8225	2,0207	0,0244	5,1765	5,6427	0,0077	1,6460
runter 4	0,0324	6,8740	1,7545	0,0244	5,1743	5,6480	0,0080	1,6997
Mittelwert	0,0323	6,8604	1,7845	0,0245	5,2020	5,5462	0,0078	1,6531
60 l/min								
Verpressph. und runter 1*	0,0315	5,8679	1,8273	-0,0001	-0,0215	0,5930	0,0316	5,8894
hoch 2	0,0312	5,8106	2,2423	0,0280	5,2136	5,5141	0,0032	0,5971
runter 2	0,0318	5,9108	1,9319	0,0281	5,2320	5,2217	0,0036	0,6788
Mittelwert	0,0315	5,8631	2,0005	0,0281	5,2228	5,3679	0,0034	0,6379
W/F erhöht								
Verpressph. und runter 1*	0,0285	5,7940	0,8784	0,0002	0,0359	0,5930	0,0283	5,7580
hoch 2	0,0284	5,7809	1,2229	0,0214	4,3468	3,8918	0,0070	1,4342
runter 2	0,0295	6,0049	0,9147	0,0211	4,3049	3,4068	0,0084	1,7001
hoch 3	0,0284	5,7864	2,3330	0,0218	4,4374	4,2326	0,0066	1,3491
runter 3	0,0293	5,9629	0,5985	0,0215	4,3863	3,3989	0,0077	1,5766
hoch 4	0,0286	5,8151	2,2038	0,0217	4,4243	4,3604	0,0068	1,3908
runter 4	0,0281	5,7179	0,5930	0,0218	4,4379	5,6480	0,0063	1,2800
Mittelwert	0,0287	5,8375	1,2492	0,0216	4,3896	4,1564	0,0071	1,4551

*runterfahren Zyklus 1, während Verpressphase, Beginn unterhalb Suspensionsspiegel (Kursiv)

Tabelle 10-4: Trend aus der Gradientenanalyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 07d

	$\Delta X/\text{min}$	$\Delta X/\text{h}$	$\Delta X/2\text{h}$	$\Delta X/\text{d}$
40 l/min (neu)				
Trend X_{Bart}	0,0000	-0,0009	-0,0018	-0,0217
Trend X_{cem}	-0,0030	-0,1806	-0,3613	-4,3351
40 l/min (alt)				
Trend X_{Bart}	0,0001	0,0053	0,0106	0,1271
Trend X_{cem}	0,0187	1,1247	2,2495	26,9936
60 l/min				
Trend X_{Bart}	0,0000	-0,0009	-0,0019	-0,0227
Trend X_{cem}	-0,0029	-0,1760	-0,3520	-4,2246
W/F erhöht				
Trend X_{Bart}	0,0000	-0,0002	-0,0005	-0,0060
Trend X_{cem}	-0,0008	-0,0508	-0,1016	-1,2194

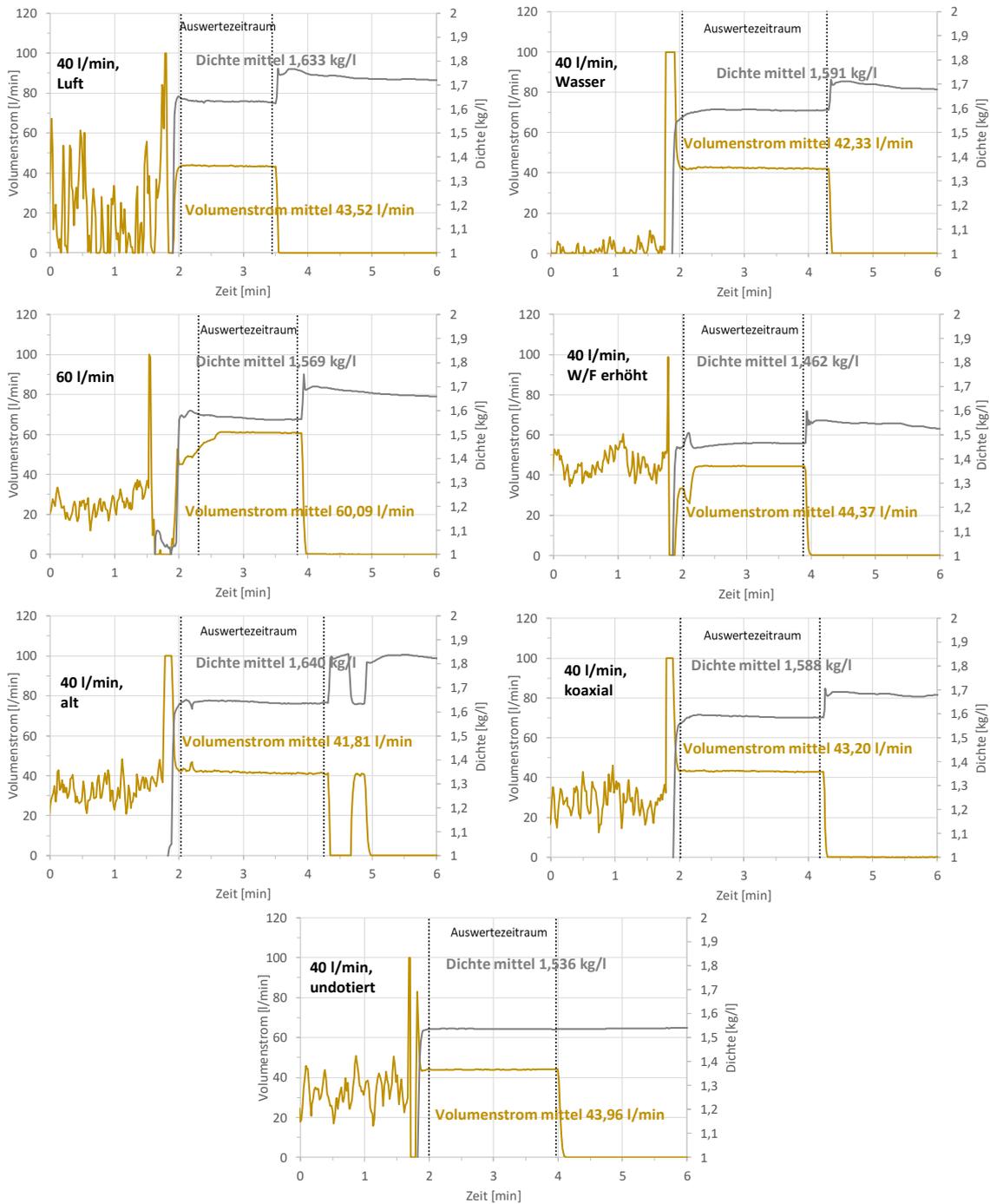


Abbildung 10-25: Volumenstrom und Dichte des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+ (gemessen am Massendurchflussmesser).

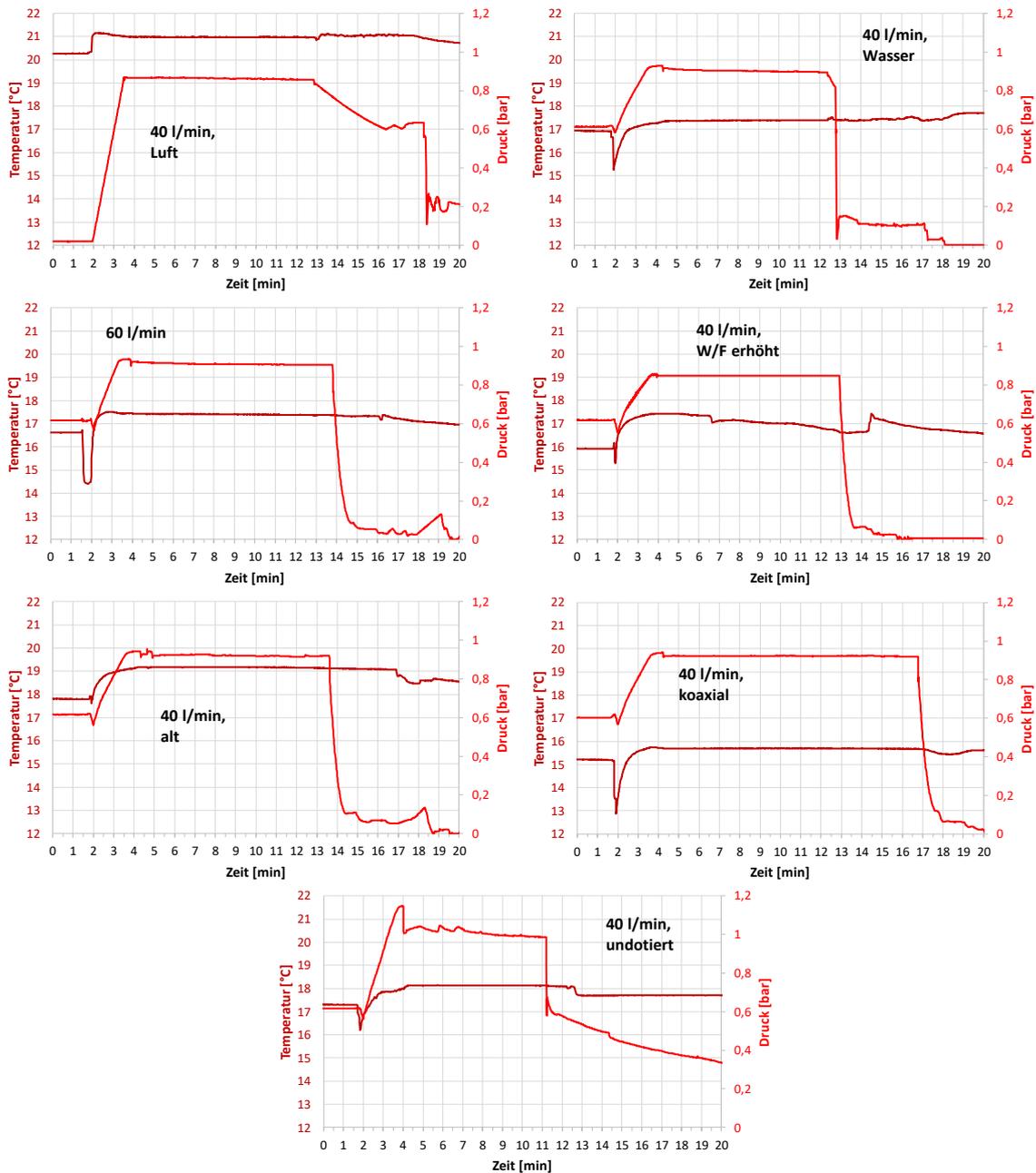


Abbildung 10-26: Druck- und Temperaturverläufe des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+ (gemessen am Massendurchflussmesser).

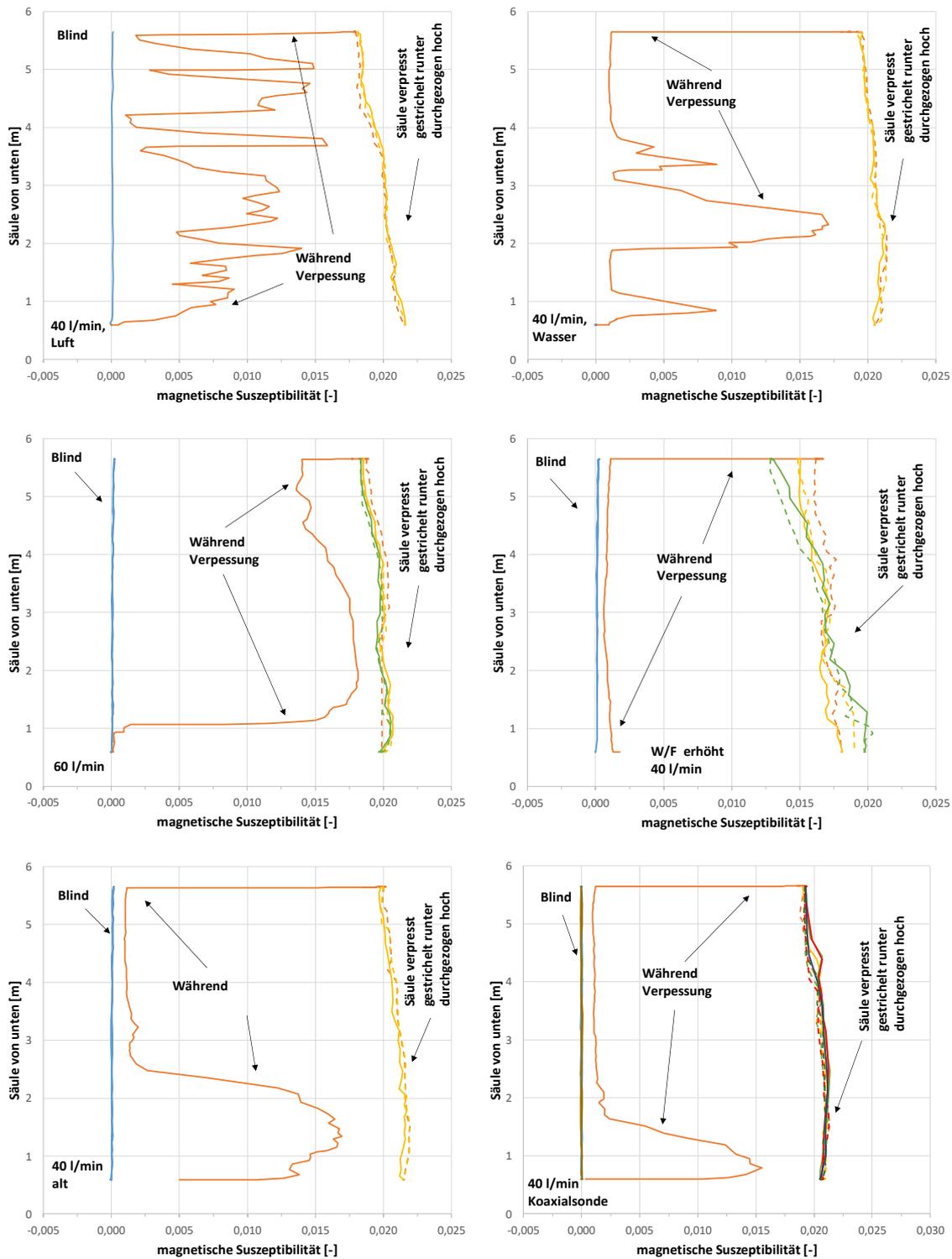


Abbildung 10-27: Höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+d.

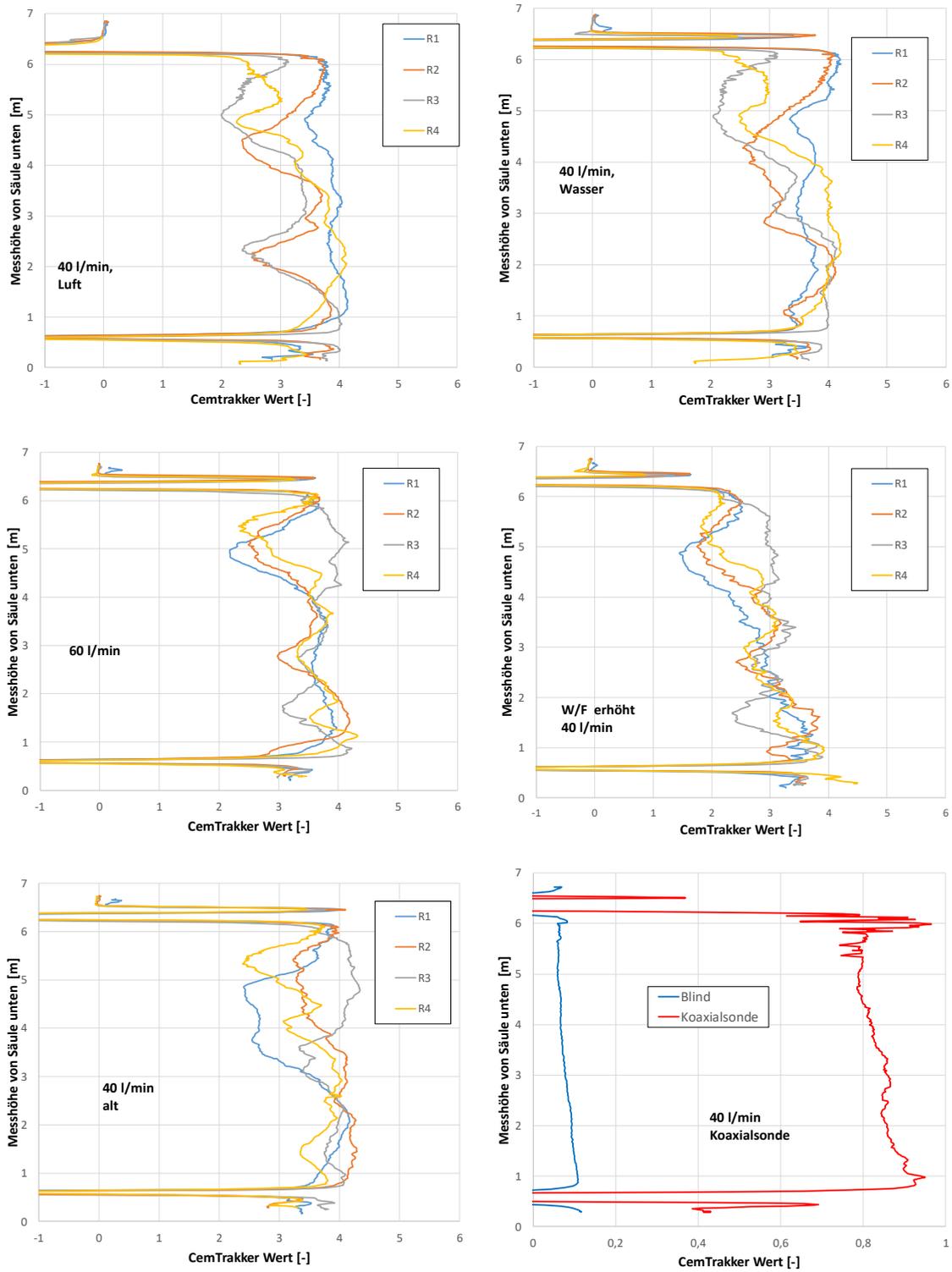


Abbildung 10-28: CemTrakker Profile des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+d.

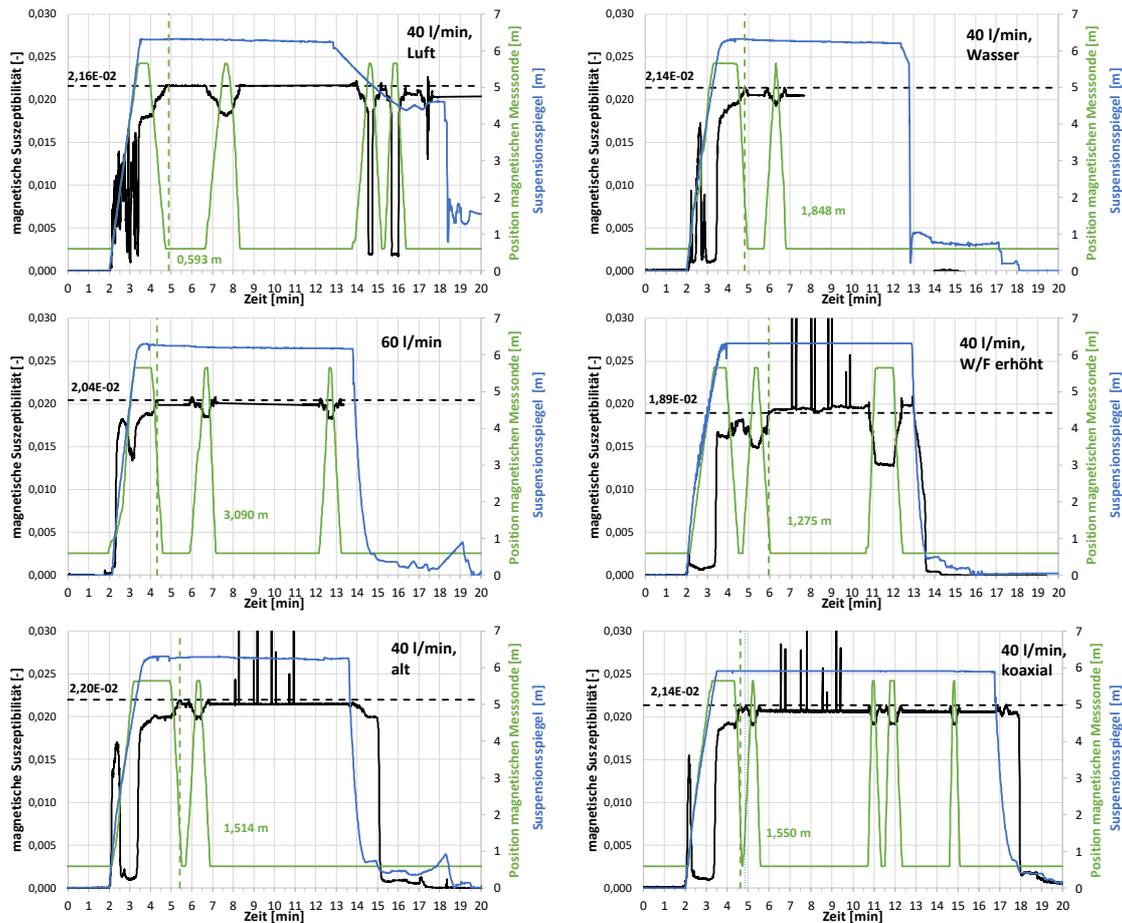


Abbildung 10-29: Verlauf der höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+d.

Tabelle 10-5: Maxima und Minima der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und umgerechneten CemTrakker Äquivalenten des Füllstandkontrollversuche mit dem Baustoff 13+d.

	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}
40 l/min(Luft)								
Verpressph. und runter 1*	0,0217	4,2845	0,5986	-0,0000	-0,0034	0,5930	0,0217	4,2879
hoch 2	0,0216	4,2776	0,5930	0,0181	3,5795	5,6480	0,0035	0,6980
runter 2	0,0217	4,2960	0,5930	0,0181	3,5794	5,6311	0,0036	0,7166
Mittelwert	0,0217	4,2860	0,5949	0,0181	3,5795	5,6395	0,0036	0,7073
40 l/min (Wasser)								
Verpressph. und runter 1*	0,0215	3,8237	2,0223	0,0000	0,0027	0,5930	0,0214	3,8210
hoch 2	0,0213	3,7955	2,4507	0,0194	3,4523	5,5859	0,0019	0,3432
runter 2	0,0214	3,8077	1,6661	0,0193	3,4363	5,5859	0,0021	0,3714
Mittelwert	0,0214	3,8090	2,0464	0,0193	3,4443	5,5859	0,0020	0,3573
60 l/min								
Verpressph. und runter 1*	0,0204	3,5349	2,8585	0,0002	0,0297	0,9065	0,0203	3,5051
hoch 2	0,0207	3,5846	0,9976	0,0184	3,1893	5,4646	0,0023	0,3954
runter 2	0,0207	3,5817	0,8983	0,0184	3,1865	5,2522	0,0023	0,3951
hoch 3	0,0206	3,5569	1,0405	0,0183	3,1625	5,6480	0,0023	0,3943
runter 3	0,0206	3,5551	0,7504	0,0183	3,1570	5,2600	0,0023	0,3981
Mittelwert	0,0206	3,5626	1,3091	0,0184	3,1738	5,4062	0,0023	0,3957
W/F erhöht								
Verpressph. und runter 1*	0,0181	3,1320	0,5930	0,0002	0,0263	0,5930	0,0179	3,1056
hoch 2	0,0181	3,1417	0,8811	0,0149	2,5812	5,6480	0,0032	0,5605
runter 2	0,0194	3,3541	0,5930	0,0148	2,5638	5,6480	0,0046	0,7903
hoch 3	0,0201	3,4880	1,5728	0,0129	2,2269	5,6426	0,0073	1,2611
runter 3	0,0207	3,5776	0,9127	0,0128	2,2112	5,4440	0,0079	1,3664
Mittelwert	0,0193	3,3387	0,9105	0,0138	2,3958	5,5957	0,0057	0,9946
40 l/min (alt)								
Verpressph. und runter 1*	0,0220	3,4985	1,5136	0,0002	0,0295	0,5930	0,0218	3,4691
hoch 2	0,0217	3,4591	1,7808	0,0197	3,1320	5,6425	0,0021	0,3271
runter 2	0,0220	3,4938	1,4768	0,0197	3,1375	5,2033	0,0022	0,3562
Mittelwert	0,0219	3,4838	1,5904	0,0197	3,1348	5,4229	0,0021	0,3417
40 l/min koaxial								
Verpressph. und runter 1*	0,0214	0,8866	1,2345	0,0003	0,0133	0,5930	0,0211	0,8732
hoch 2	0,0214	0,8864	2,2371	0,0190	0,7871	5,6480	0,0024	0,0993
runter 2	0,0213	0,8844	1,4182	0,0191	0,7917	5,6043	0,0022	0,0927
hoch 3	0,0214	0,8854	2,8572	0,0194	0,8057	5,1372	0,0019	0,0796

runter 3	0,0212	0,8807	1,4273	0,0192	0,7948	5,6480	0,0021	0,0859
hoch 4	0,0214	0,8851	2,4432	0,0191	0,7923	5,6427	0,0022	0,0928
runter 4	0,0213	0,8820	1,1950	0,0192	0,7944	4,7260	0,0021	0,0876
hoch 5	0,0213	0,8830	2,1435	0,0191	0,7922	5,6480	0,0022	0,0908
runter 5	0,0211	0,8756	1,6515	0,0191	0,7917	4,9729	0,0020	0,0839
Mittelwert	0,0213	0,8833	1,8453	0,0191	0,7937	5,3784	0,0021	0,0891

*runterfahren Zyklus 1, während Verpressphase, Beginn unterhalb Suspensionsspiegel (Kursiv)

Tabelle 10-6: Trend aus der Gradientenanalyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit dem Baustoff 13+d

	$\Delta X/\text{min}$	$\Delta X/\text{h}$	$\Delta X/2\text{h}$	$\Delta X/\text{d}$
40 l/min (Luft)				
Trend X_{Bart}	0,0000	0,0004	0,0008	0,0094
Trend X_{cem}	0,0013	0,0776	0,1552	1,8618
40 l/min (Wasser)				
Trend X_{Bart}	0,0000	-0,0017	-0,0034	-0,0405
Trend X_{cem}	-0,0050	-0,3010	-0,6020	-7,2243
60 l/min				
Trend X_{Bart}	0,0000	-0,0017	-0,0034	-0,0405
Trend X_{cem}	-0,0050	-0,3010	-0,6020	-7,2243
W/F erhöht				
Trend X_{Bart}	0,0001	0,0077	0,0153	0,1840
Trend X_{cem}	0,0221	1,3275	2,6550	31,8598
40 l/min (alt)				
Trend X_{Bart}	0,0000	0,0002	0,0004	0,0049
Trend X_{cem}	0,0005	0,0322	0,0643	0,7716
40 l/min koaxial				
Trend X_{Bart}	0,0000	-0,0007	-0,0013	-0,0160
Trend X_{cem}	-0,0005	-0,0277	-0,0554	-0,6642

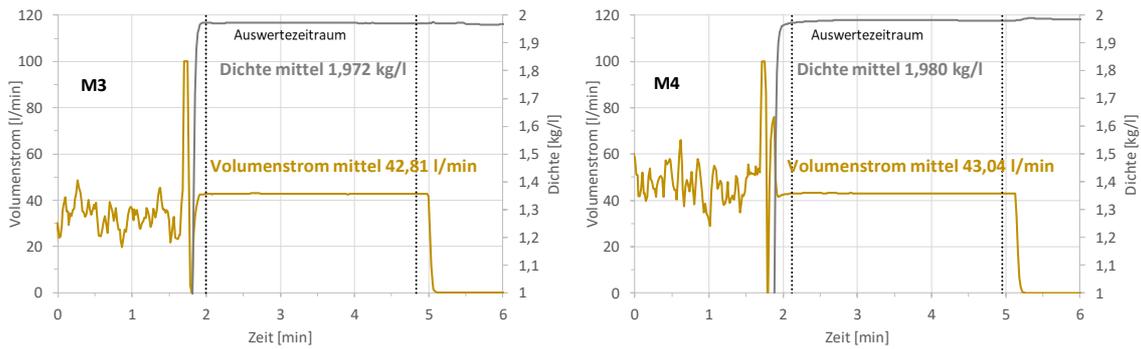


Abbildung 10-30: Volumenstrom und Dichte des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4 (gemessen am Massendurchflussmesser).

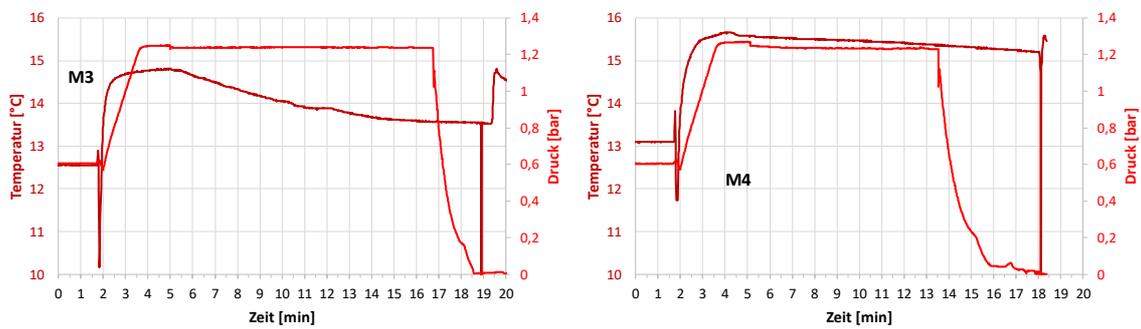


Abbildung 10-31: Druck- und Temperaturverläufe des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4 (gemessen am Massendurchflussmesser).

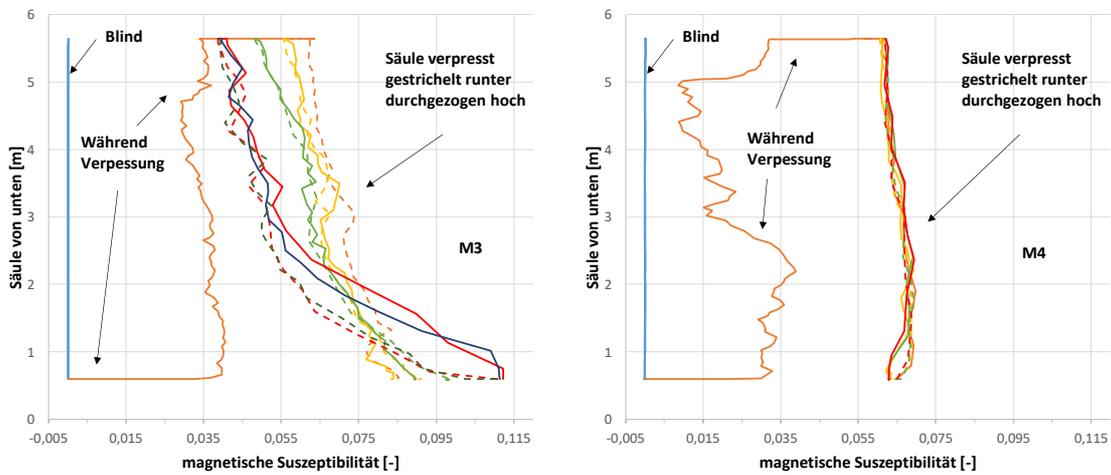


Abbildung 10-32: Höhengenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4.

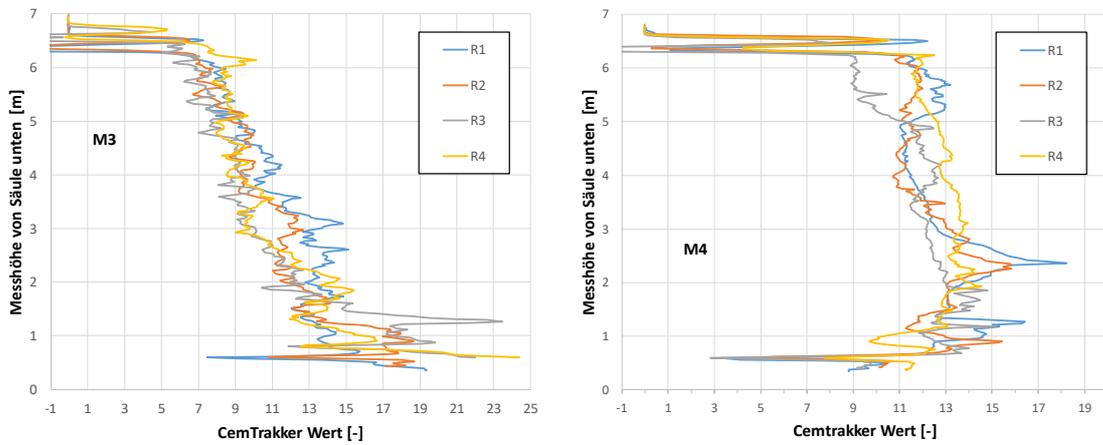


Abbildung 10-33: CemTrakker Profile des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4.

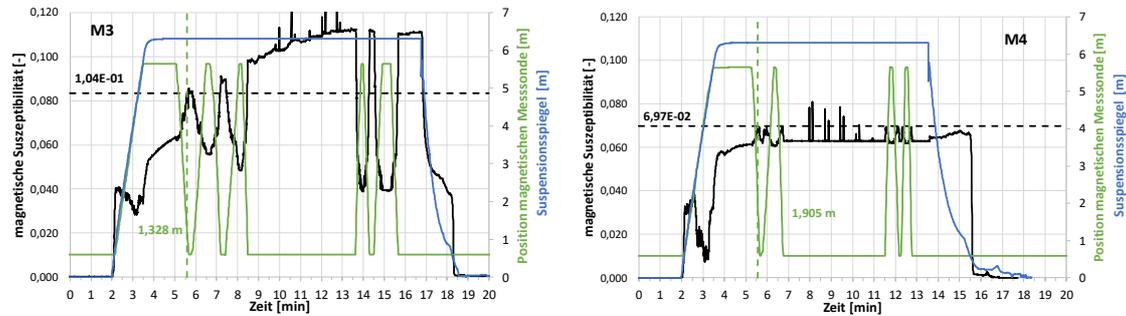


Abbildung 10-34: Verlauf der höhenspezifische volumetrische magnetische Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4.

Tabelle 10-7: Maxima und Minima der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten und umgerechneten CemTrakker Äquivalenten des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4.

	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. $H_{\text{Bart}} [\text{m}]$	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}
M3 (40 l/min)								
Verpressph. und runter 1*	0,0856	15,9876	0,6096	0,0002	0,0387	0,5930	0,0854	15,9489
hoch 2	0,0843	15,7330	0,6142	0,0558	10,4227	5,6480	0,0284	5,3103
runter 2	0,0913	17,0463	0,5930	0,0555	10,3709	5,5492	0,0357	6,6755
hoch 3	0,0897	16,7428	0,7651	0,0483	9,0217	5,6371	0,0413	7,7211
runter 3	0,0990	18,4956	0,5876	0,0483	9,0245	5,6096	0,0507	9,4711
hoch 4	0,1123	20,9766	0,7462	0,0387	7,2324	5,6371	0,0736	13,7442
runter 4	0,1123	20,9712	0,5930	0,0387	7,2344	5,5771	0,0736	13,7368
hoch 5	0,1116	20,8445	0,5930	0,0393	7,3356	5,6480	0,0723	13,5089
runter 5	0,1106	20,6606	0,5930	0,0393	7,3325	5,6480	0,0714	13,3281
Mittelwert	0,0996	18,6065	0,6327	0,0455	8,4968	5,6193	0,0559	10,4370
M4 (40 l/min)								
Verpressph. und runter 1*	0,0698	13,8033	1,9054	0,0002	0,0485	0,5930	0,0696	13,7548
hoch 2	0,0693	13,6956	2,3662	0,0607	11,9985	5,6480	0,0086	1,6971
runter 2	0,0699	13,8198	1,6778	0,0607	11,9968	5,3562	0,0092	1,8230
hoch 3	0,0694	13,7198	2,4094	0,0620	12,2478	5,0195	0,0074	1,4719
runter 3	0,0697	13,7897	1,7374	0,0618	12,2187	4,1673	0,0079	1,5710
hoch 4	0,0694	13,7144	2,7339	0,0618	12,2182	4,9642	0,0076	1,4962
runter 4	0,0694	13,7114	1,4988	0,0618	12,2201	3,9666	0,0075	1,4913
Mittelwert	0,0696	13,7506	2,0470	0,0615	12,1500	4,8536	0,0081	1,5917

*runterfahren Zyklus 1, während Verpressphase, Beginn unterhalb Suspensionsspiegel (Kursiv)

Tabelle 10-8: Trend aus der Gradientenanalyse der Basislinie in der Ruheposition des Messringes der volumetrischen magnetischen Suszeptibilitäten des Füllstandkontrollversuchs mit den Eigenmischungen M3 und M4.

	$\Delta X/\text{min}$	$\Delta X/\text{h}$	$\Delta X/2\text{h}$	$\Delta X/\text{d}$
M3 (40 l/min)				
Trend X_{Bart}	0,0016	0,0956	0,1912	2,2947
Trend X_{cem}	0,2976	17,8543	35,7086	428,5033
M4 (40 l/min)				
Trend X_{Bart}	0,0000	-0,0017	-0,0033	-0,0401
Trend X_{cem}	-0,0055	-0,3305	-0,6610	-7,9326

Tabelle 10-9: Ergebnisse der Füllstandkontrollversuche mit den dotierten Baustoffen im Vergleich.

	Um. Faktor	Aver. X_{Bart}	50% Schwelle X_{Cem}	Aver. X_{Cem}	Max. X_{Bart}	Max. X_{Cem}	Max. H_{Bart} [m]	Min. X_{Bart}	Min. X_{Cem}	Min. H_{Bart} [m]	ΔX_{Bart}	ΔX_{Cem}	Absetzmaß 1h	Absetzmaß 24h	$\Delta X/h$	Abnahme X_{max} zu X_{min} [%]
15d 40 l/min	185,2	0,045	4,128	8,256	0,048	8,889	1,445	0,036	7,913	5,210	0,005	0,973	4	4	-0,259	11,0
15d 60 l/min	178,2	0,036	3,252	6,503	0,039	6,904	1,658	0,028	6,149	5,101	0,004	0,744	2	2	0,071	10,9
15d W/F erhöht	207,4	0,026	2,732	5,465	0,030	6,219	1,128	0,025	5,077	4,901	0,005	1,126	28	36	1,283	18,4
02d 40 l/min	175,5	0,024	2,104	4,208	0,025	4,451	1,489	0,015	3,938	5,453	0,003	0,504	1	1	0,028	11,5
02d 60 l/min	179,9	0,022	2,007	4,014	0,023	4,162	1,268	0,014	3,858	5,375	0,002	0,303	0	0	-0,117	7,3
02d W/F erhöht	198,2	0,016	1,606	3,212	0,018	3,513	1,360	0,015	3,069	0,750	0,002	0,442	2,4	6	-0,934	12,6
07d 40 l/min (neu)	199,8	0,029	2,898	5,795	0,031	6,224	1,760	0,027	5,478	5,422	0,004	0,741	0,4	0,8	-0,181	12,0
07d 40 l/min (alt)	212,4	0,027	2,880	5,760	0,032	6,860	1,784	0,024	5,202	5,546	0,008	1,653	0,4	2,8	1,125	24,2
07d 60 l/min	186,1	0,029	2,693	5,386	0,032	5,863	2,000	0,028	5,223	5,368	0,003	0,638	0,4	0,8	-0,176	10,9
07d W/F erhöht	203,6		2,356	4,712	0,029	5,837	1,249	0,022	4,390	4,156	0,007	1,455	2,4	6	-0,051	24,8
13d 40 l/min (Luft)	197,2	0,020	1,924	3,847	0,022	4,286	0,595	0,018	3,579	5,640	0,004	0,707	0,4	1,6	0,078	16,5
13d 40 l/min (Wasser)	178,2	0,020	1,817	3,634	0,021	3,809	2,046	0,019	3,444	5,586	0,002	0,357	0,4	1,6	-0,301	9,6
13d 60 l/min	172,9	0,020	1,698	3,397	0,021	3,563	1,309	0,018	3,174	5,406	0,002	0,396	0,4	1,6	-0,008	10,9
13d W/F erhöht	173,1	0,015	1,292	2,585	0,019	3,339	0,911	0,014	2,396	5,596	0,006	0,995	22	23	1,327	28,2
13d 40 l/min (alt)	175,5	0,019	1,666	3,331	0,022	3,484	1,590	0,020	3,135	5,423	0,002	0,342	0	0	0,032	10,0
13d 40 l/min (koaxial)	41,5	0,020	0,420	0,839	0,021	0,883	1,845	0,019	0,794	5,378	0,002	0,089	1	1,5	-0,028	10,1
M3 (40 l/min)	186,7	0,059	5,688	11,375	0,100	18,606	0,633	0,046	8,497	5,619	0,056	10,437	7	7	35,709	54,3
M4 (40 l/min)	197,7	0,064	6,365	12,730	0,070	13,751	2,047	0,061	12,150	4,854	0,008	1,592	0	0	-0,331	11,6

10.3. Ergebnisse der Penetrationsversuche im Labormaßstab

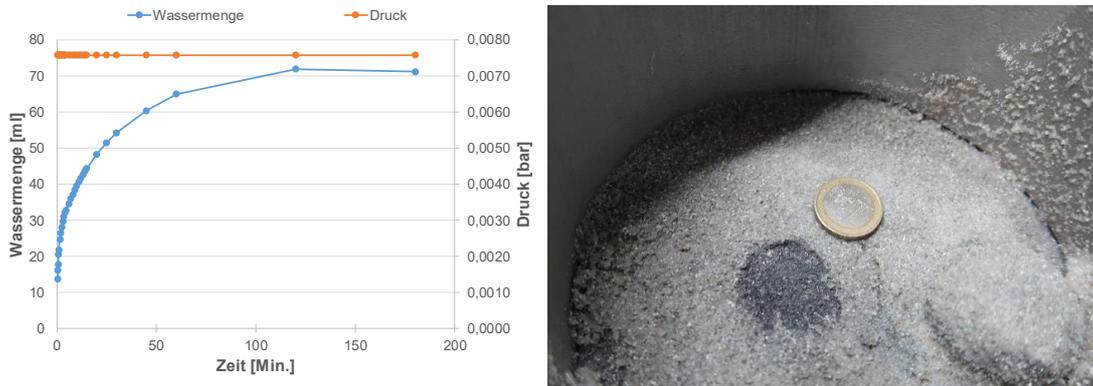


Abbildung 10-35: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 1 (links), Grenzschicht Sand/Verfüllung (rechts)



Abbildung 10-36: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 2 (links), Grenzschicht Sand/Verfüllung (rechts)

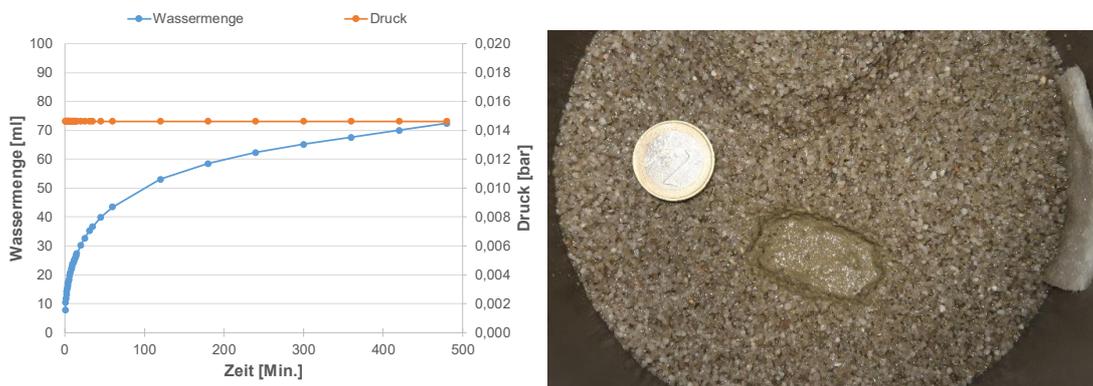


Abbildung 10-37: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 5 (links), Grenzschicht Sand/Verfüllung (rechts)

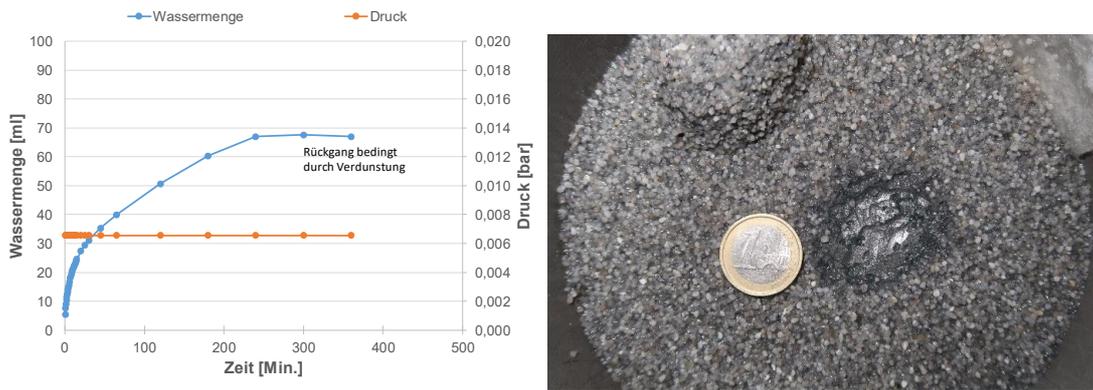


Abbildung 10-38: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 6 (links), Grenzschicht Sand/Verfüllung (rechts)

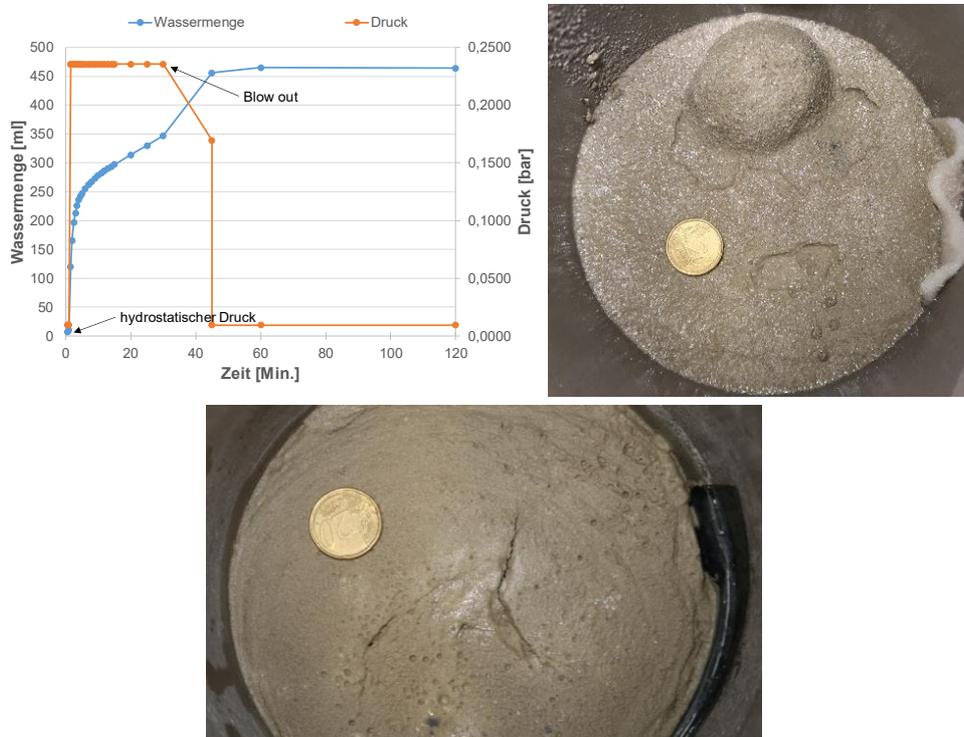


Abbildung 10-39: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 7 (links), Grenzschicht Sand/Verfüllung (rechts). Oberseite der Verfüllung nach Versuchsende (unten)

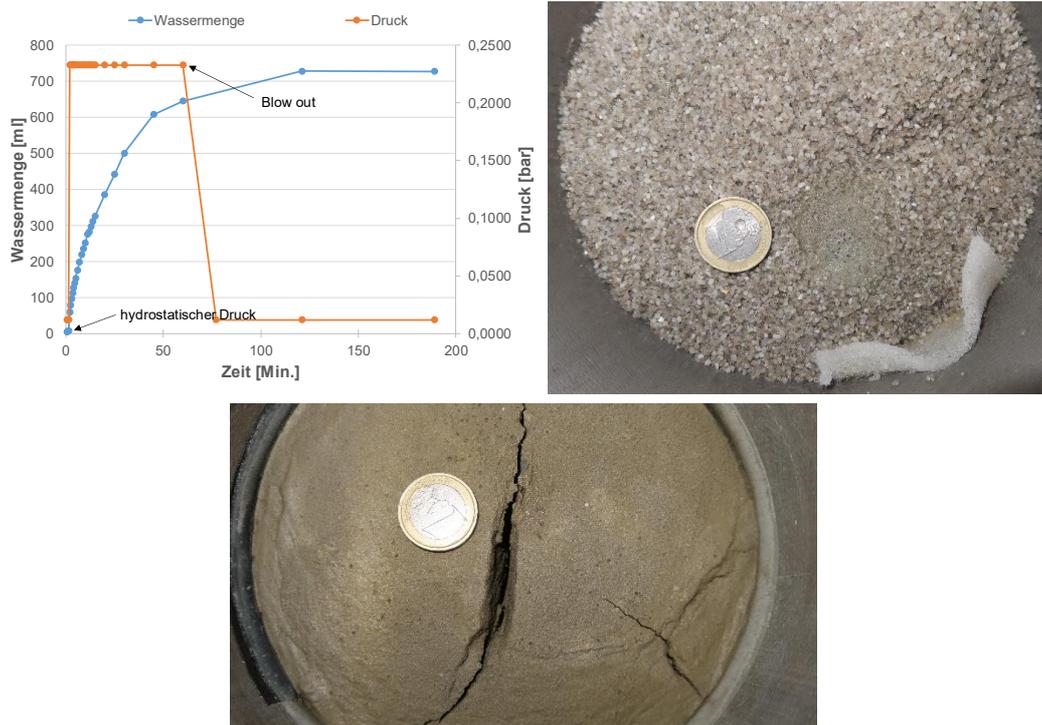


Abbildung 10-40: Zeitliche Entwicklung des filetierten Wassers aus Penetrationsversuch 8 (links), Grenzschicht Sand/Verfüllung (rechts). Oberseite der Verfüllung nach Versuchsende (unten)

10.4. Ergebnisse der magnetischen Suszeptibilitätsmessung

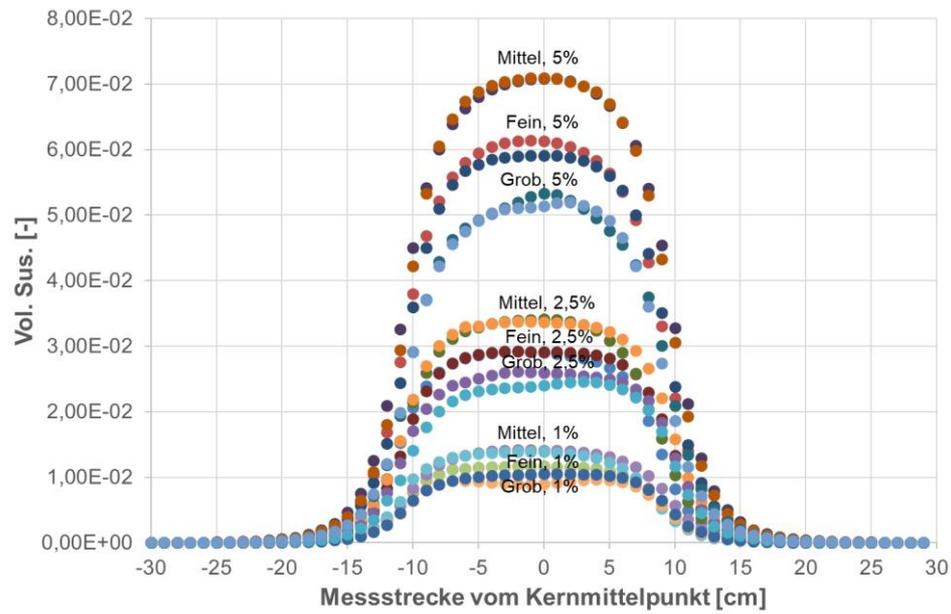


Abbildung 10-41: MS2C Messkurven zu 20 cm Referenzverfüllbaustoffproben mit unterschiedlicher Magnetitkorngröße und Dotierung

10.5. Ergebnisse der Batchversuche: Graphische Auswertung

10.5.1. 07 d

Tabelle 10-10: 07d: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Kationenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

- : bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

07d	650U (Raumtemp.)	650U (8°C)	2000U (Raumtemp.)	2000U (8°C)
Na⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
K⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Ca²⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Mg²⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Al³⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				

Tabelle 10-11: 07d: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Anionenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

↑: bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↓: geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

07d	650U	650U	2000U	2000U
	(Raumtemp.)	(8°C)	(Raumtemp.)	(8°C)
Cl⁻				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↑	↑	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↑	↑	↑
SO₄²⁻				
LW	↓	↓	↓	↓
S2	↓	↓	↓	↓
S3	↓	↓	↓	↓
S4	↓	↓	↓	↓
HCO₃⁻				
LW	↑	↑	↑	↓
S2	↑	↑	↑	↓
S3	↑	↑	↑	↓
S4	↑	↑	↑	=
CO₃²⁻				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↑	↑	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↑	↑	↑

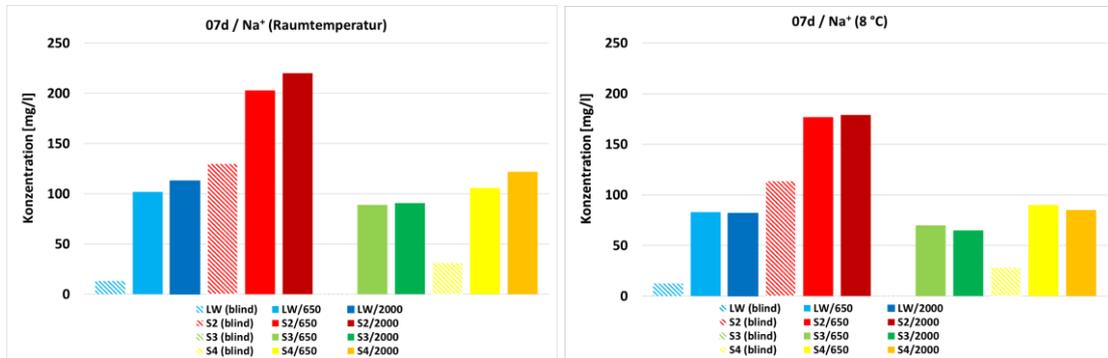


Abbildung 10-42: Vergleich des Na⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8 °C)

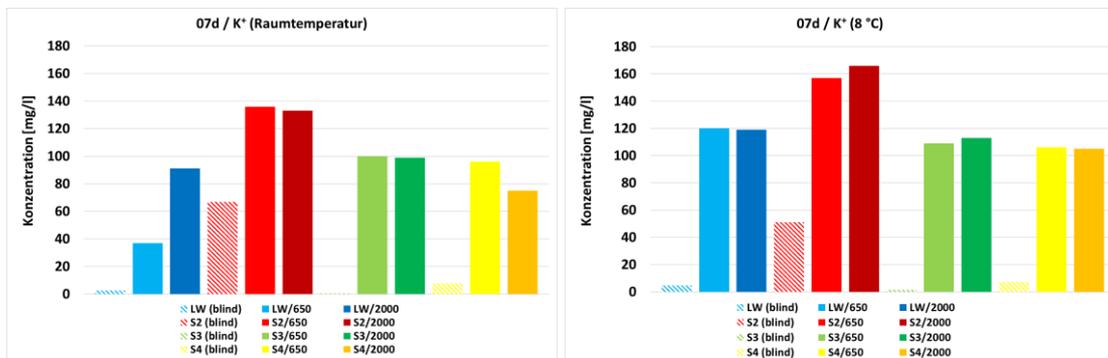


Abbildung 10-43: Vergleich des K⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8 °C)

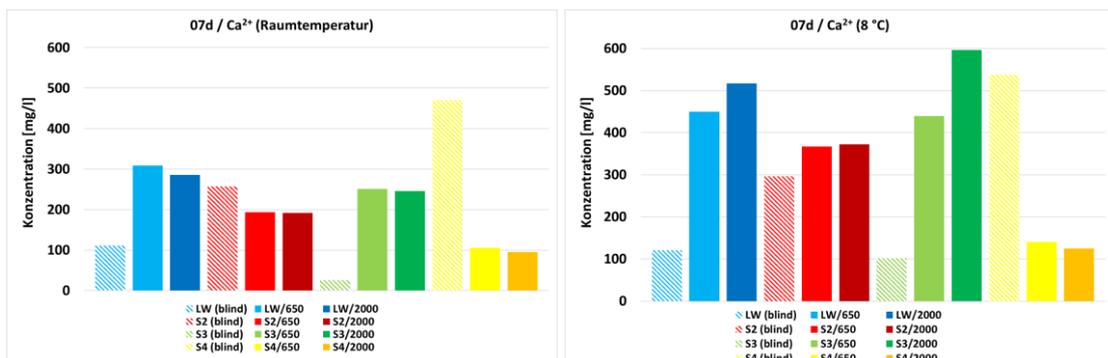


Abbildung 10-44: Vergleich des Ca²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8 °C)

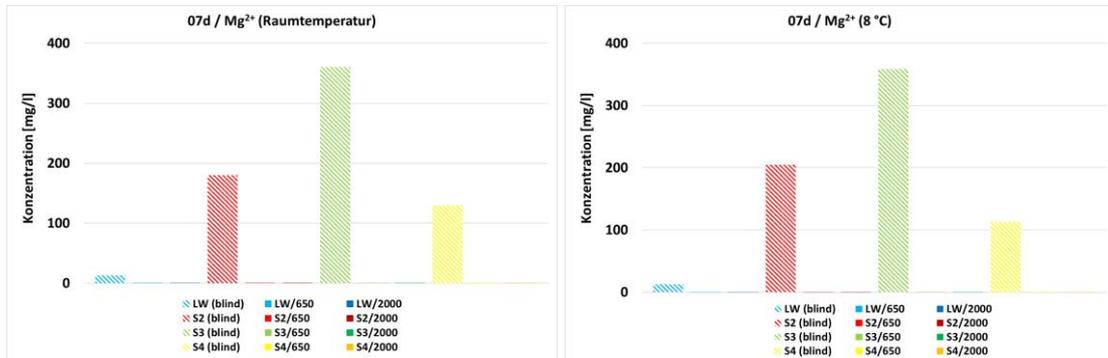


Abbildung 10-45: Vergleich des Mg²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8°C)

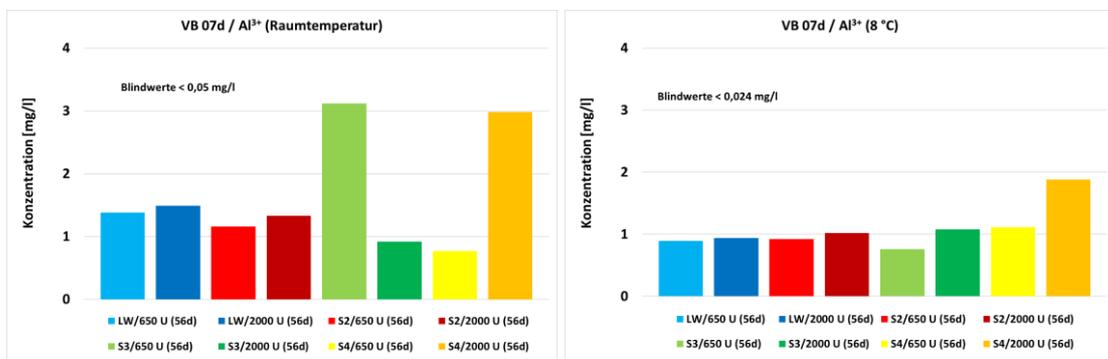


Abbildung 10-46: Al³⁺-Gehalte der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8°C)

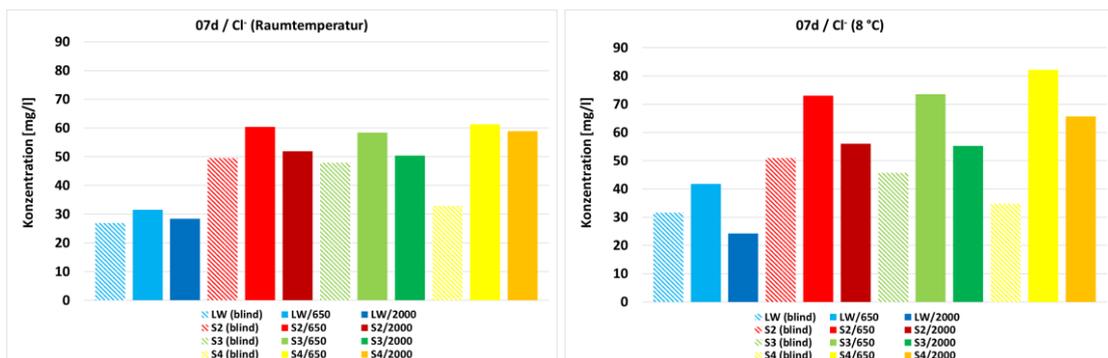


Abbildung 10-47: Vergleich des Cl⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8°C)

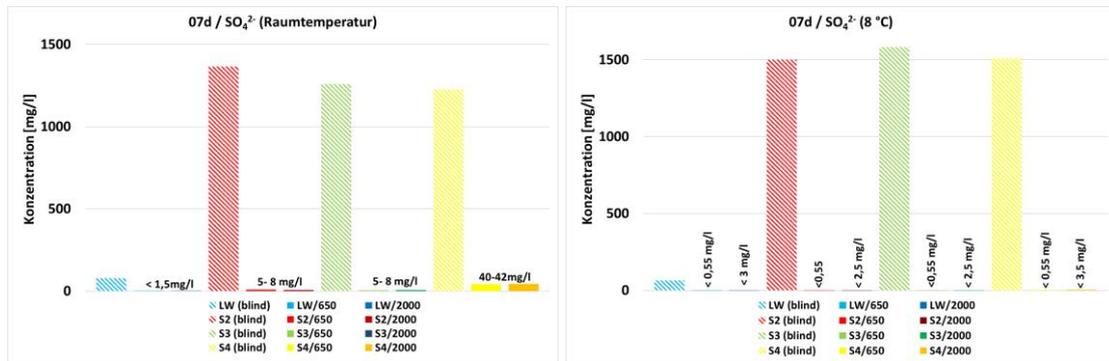


Abbildung 10-48: Vergleich des SO₄²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8°C)

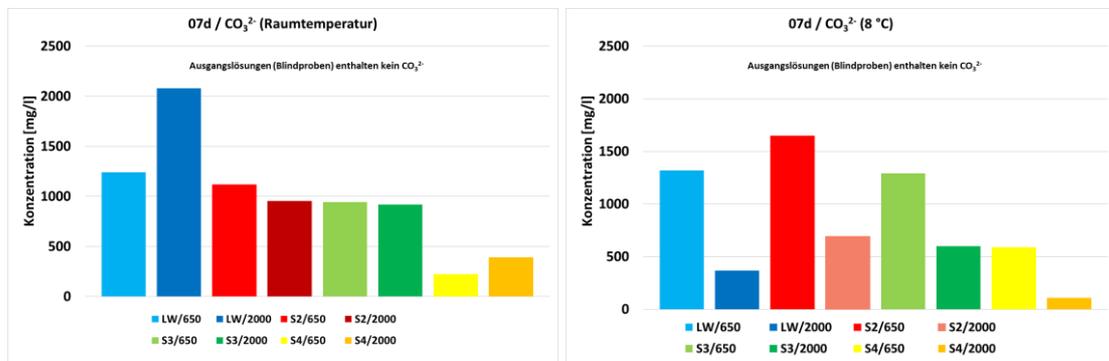


Abbildung 10-49: Vergleich des CO₃²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8°C)

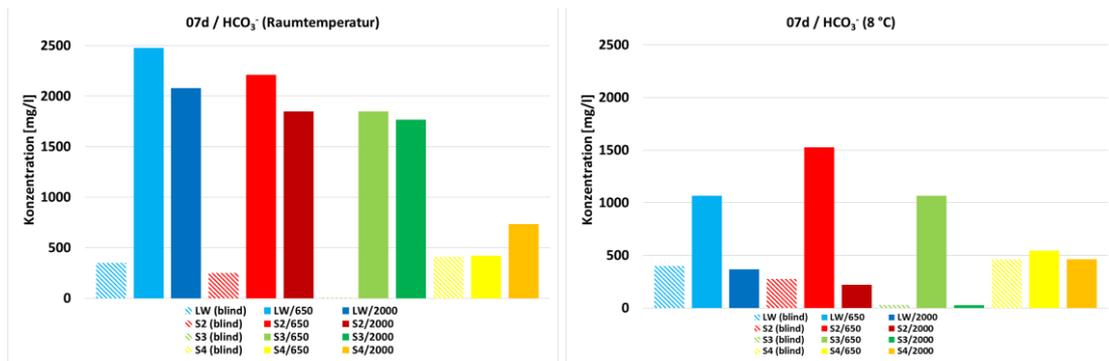


Abbildung 10-50: Vergleich des HCO₃⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (07d, Raumtemperatur und 8°C)

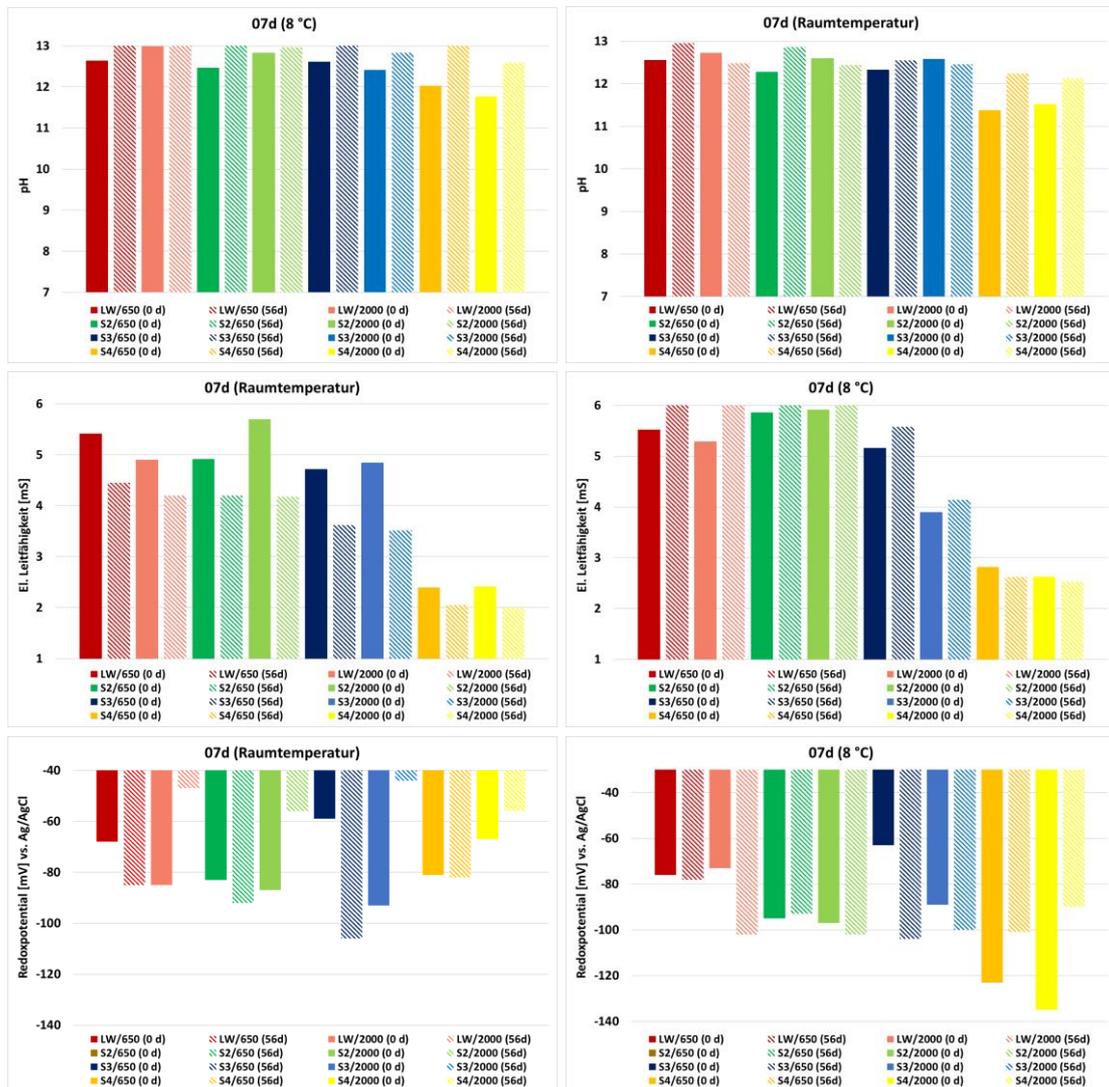


Abbildung 10-51: Vergleich der chemisch-physikalischen Parameter für Versuche bei Raumtemperatur und 8°C: pH-Wert, el. Leitfähigkeitswert und Redoxpotential zu Beginn und nach Versuchsende für 07d für die Anmischgeschwindigkeiten 650 U und 2000 U

10.5.2. 13+d

Tabelle 10-12: 13+d: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Kationenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

- : bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

13+d	650U (Raumtemp.)	650U (8°C)	2000U (Raumtemp.)	2000U (8°C)
Na⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
K⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Ca²⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Mg²⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Al³⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				

Tabelle 10-13: 13+d: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Anionenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

↑: bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↓: geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

13+d	650U (Raumtemp.)	650U (8°C)	2000U (Raumtemp.)	2000U (8°C)
Cl⁻				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↑	↑	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↑	↑	↑
SO₄²⁻				
LW	↓	↓	↓	↓
S2	↓	↓	↓	↓
S3	↓	↓	↓	↓
S4	↓	↓	↓	↓
HCO₃⁻				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↑	↑	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↓	↓	↑
CO₃²⁻				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↑	↑	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↑	↑	↑

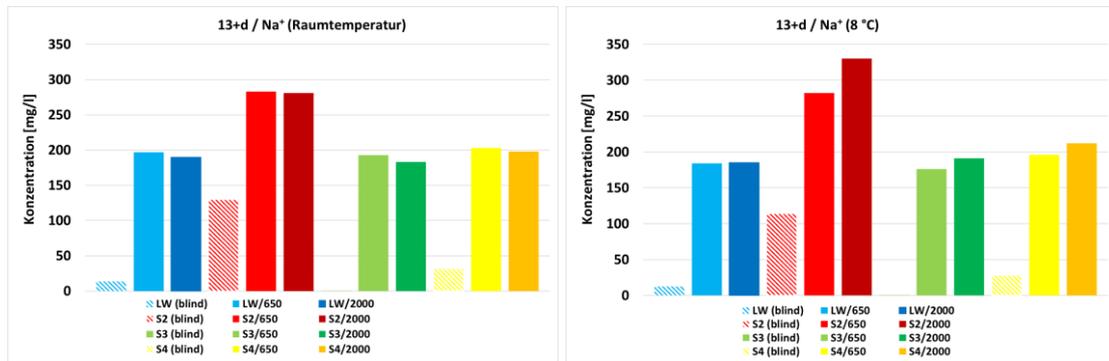


Abbildung 10-52: Vergleich des Na⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

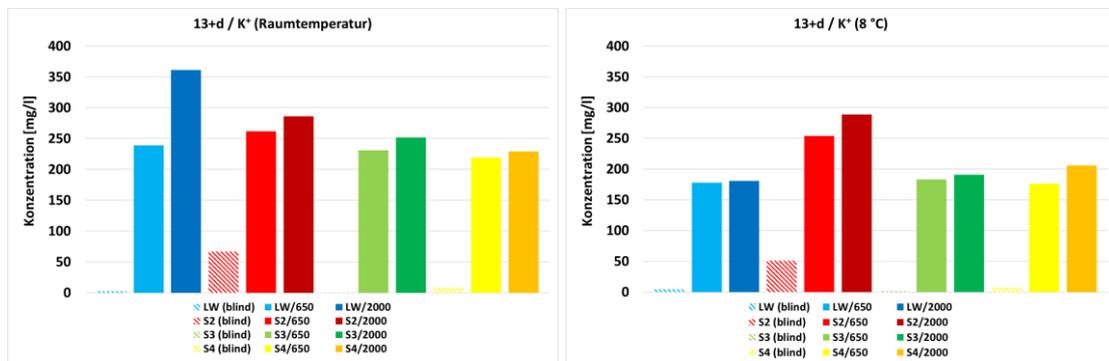


Abbildung 10-53: Vergleich des K⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

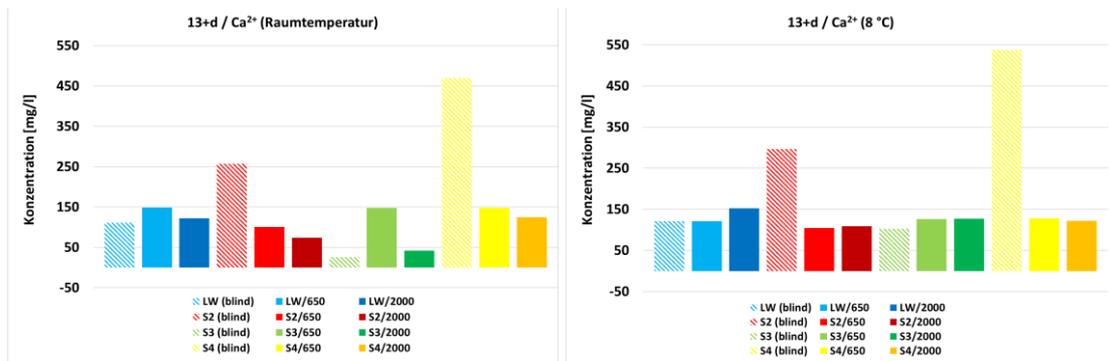


Abbildung 10-54: Vergleich des Ca²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

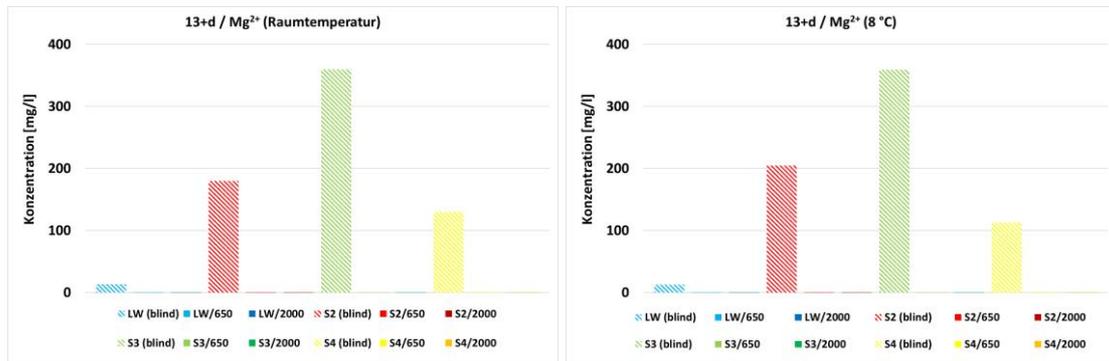


Abbildung 10-55: Vergleich des Mg²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

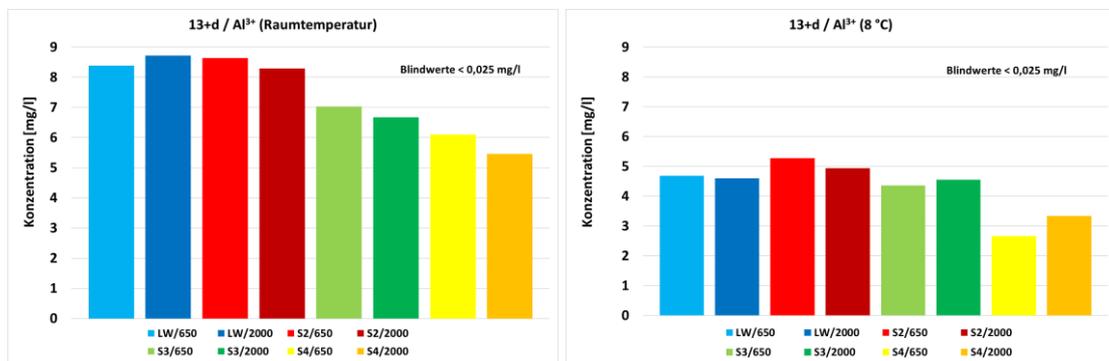


Abbildung 10-56: Al³⁺-Gehalte der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

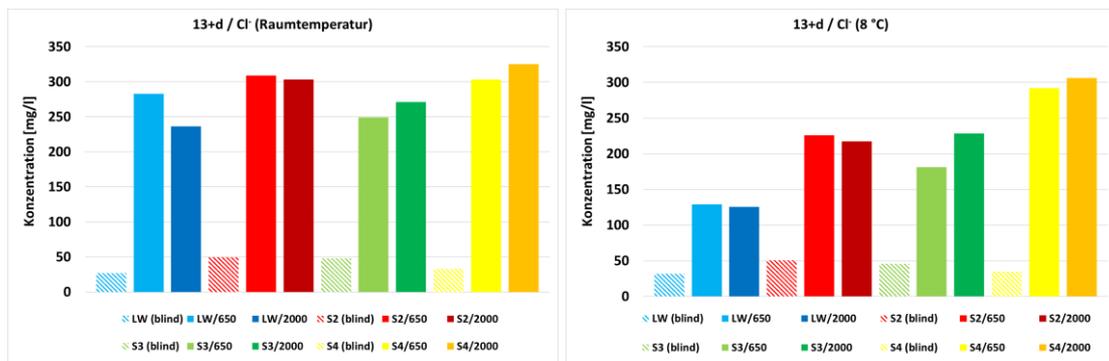


Abbildung 10-57: Vergleich des Cl⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

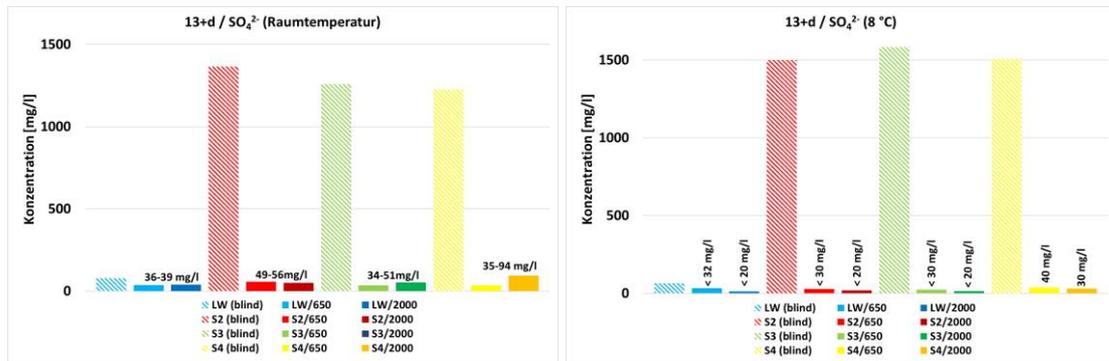


Abbildung 10-58: Vergleich des SO₄²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

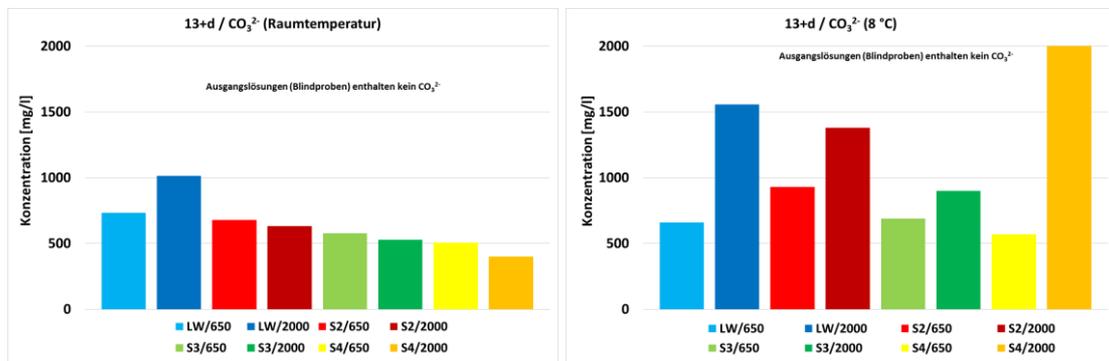


Abbildung 10-59: Vergleich des CO₃²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

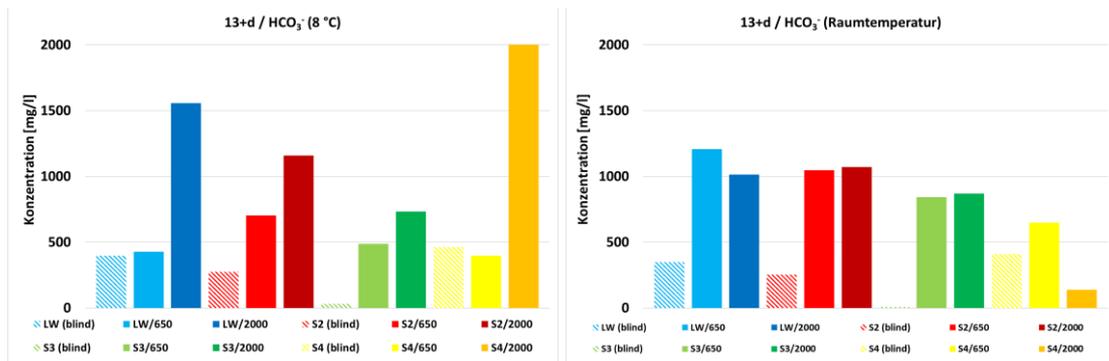


Abbildung 10-60: Vergleich des HCO₃⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (13+d, Raumtemperatur und 8°C)

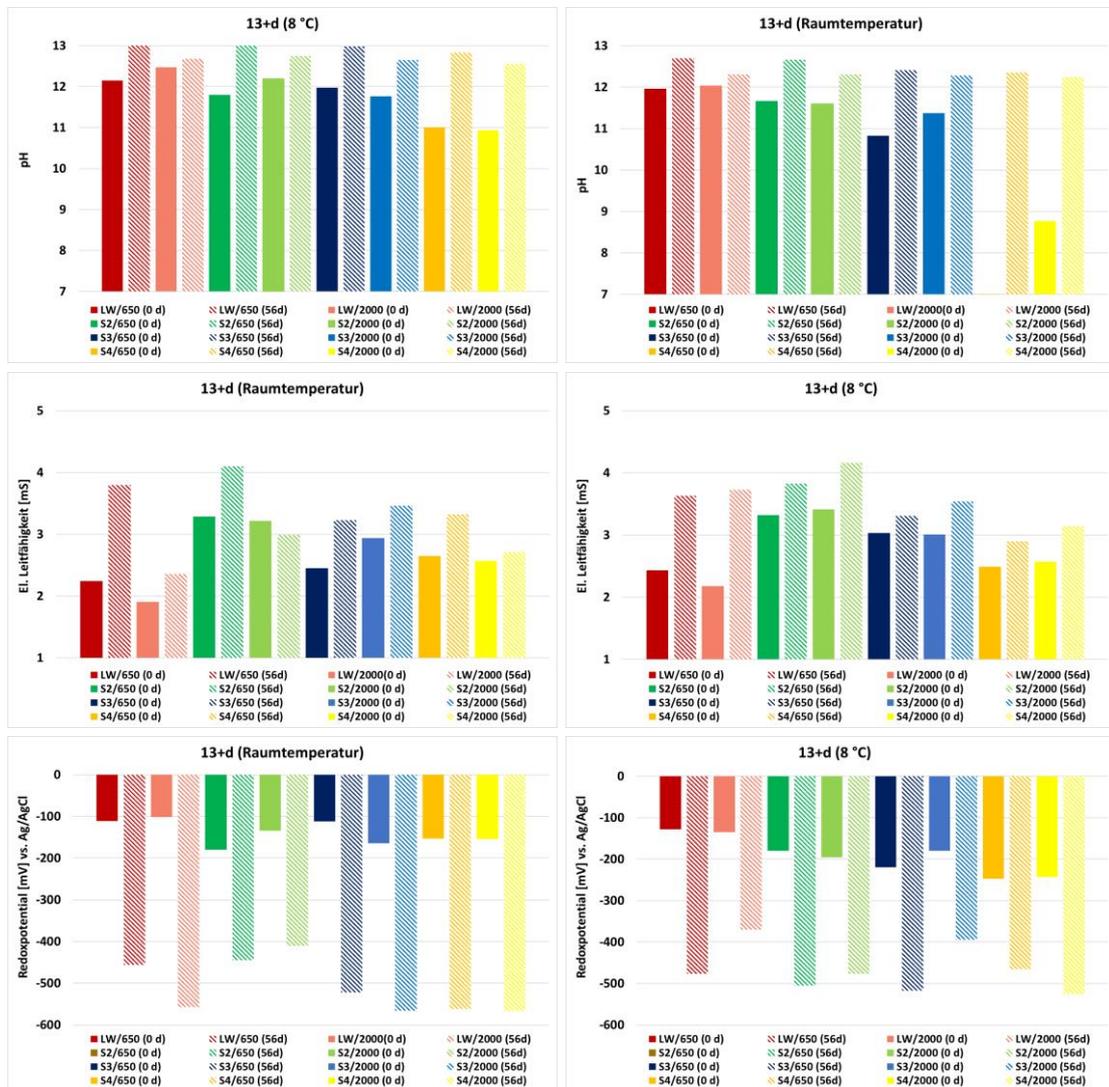


Abbildung 10-61: Vergleich der chemisch-physikalischen Parameter für Versuche bei Raumtemperatur und 8°C: pH-Wert, el. Leitfähigkeitswert und Redoxpotential zu Beginn und nach Versuchsende für 13+d für die Anmischgeschwindigkeiten 650 U und 2000 U

10.5.3. M3

Tabelle 10-14: M3: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Kationenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

: bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

: mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

: 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

: geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

M3	650U	650U	2000U	2000U
Na ⁺	(Raumtemp.)	(8°C)	(Raumtemp.)	(8°C)
LW				
S2				
S3				
S4				
K ⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Ca ²⁺				
LW				
S2			≈	
S3				
S4				
Mg ²⁺				
LW				
S2				
S3				
S4				
Al ³⁺				
LW				
S2	< 0.2 mg/l		< 0.2 mg/l	
S3				
S4				

Tabelle 10-15: M3: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Anionenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

↑: bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↓: geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

M3	650U (Raumtemp.)	650U (8°C)	2000U (Raumtemp.)	2000U (8°C)
Cl⁻				
LW	≈	↓	≈	↓
S2	↓	↓	↓	↓
S3	↓	↑	↓	↑
S4	↑	↓	↑	≈
SO₄²⁻				
LW	↓	↓	↓	↓
S2	↓	↓	↓	↓
S3	↓	↓	↓	↓
S4	↓	↓	↓	↓
HCO₃⁻				
LW	↑	↑	≈	↑
S2	≈	↑	≈	↑
S3	↑	↑	≈	↑
S4	↓	↓	≈	↓
CO₃²⁻				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↑	↑	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↑	↑	↑

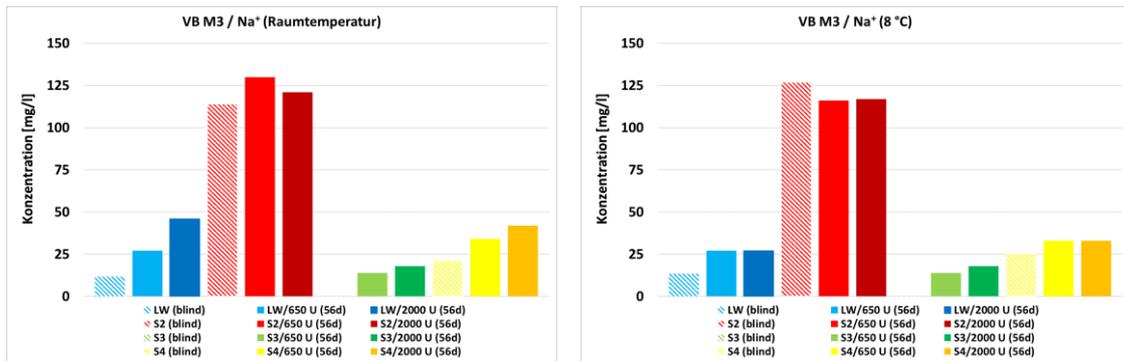


Abbildung 10-62: Vergleich des Na⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

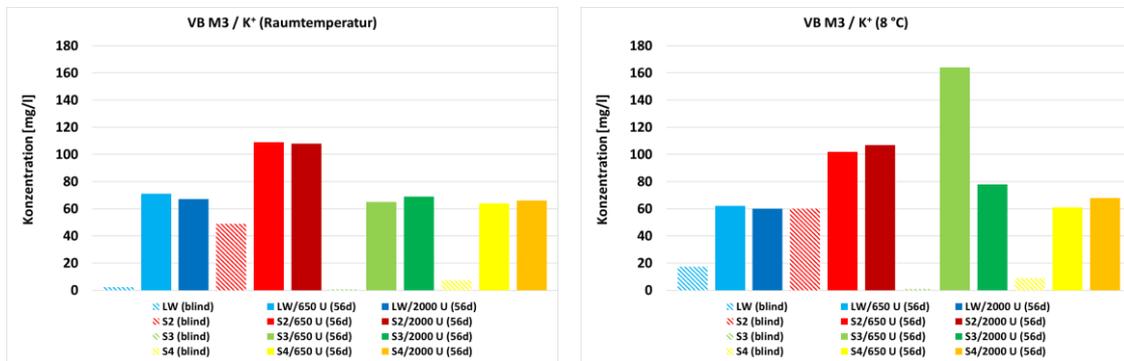


Abbildung 10-63: Vergleich des K⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

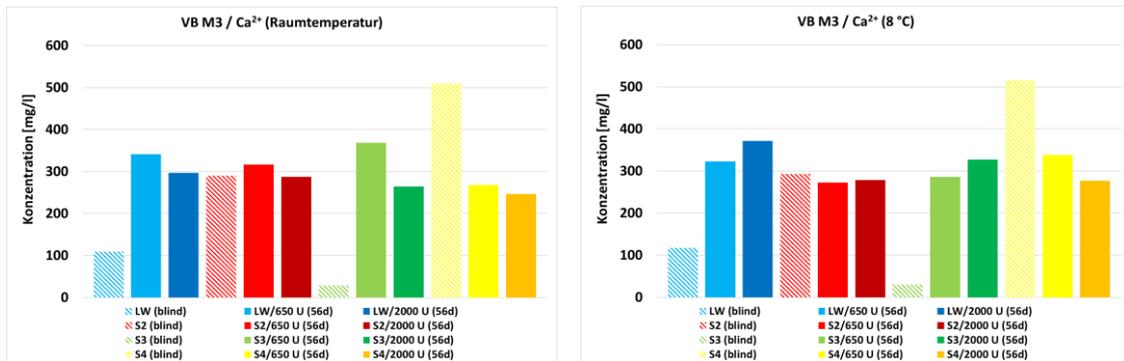


Abbildung 10-64: Vergleich des Ca²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

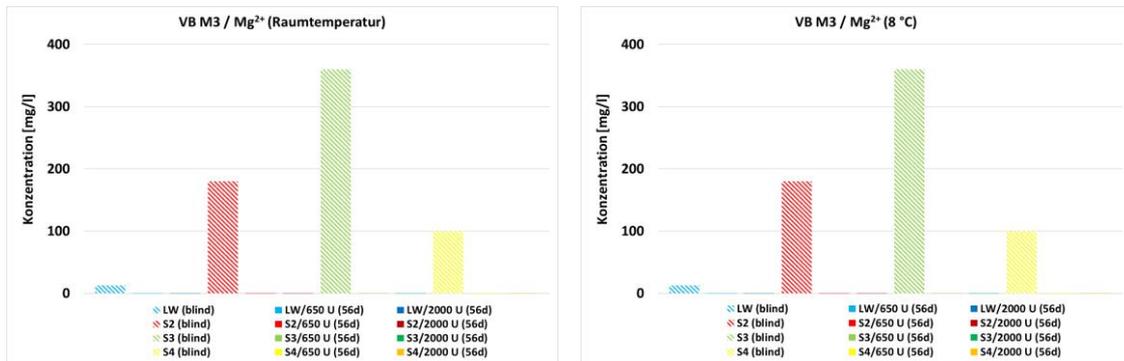


Abbildung 10-65: Vergleich des Mg²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

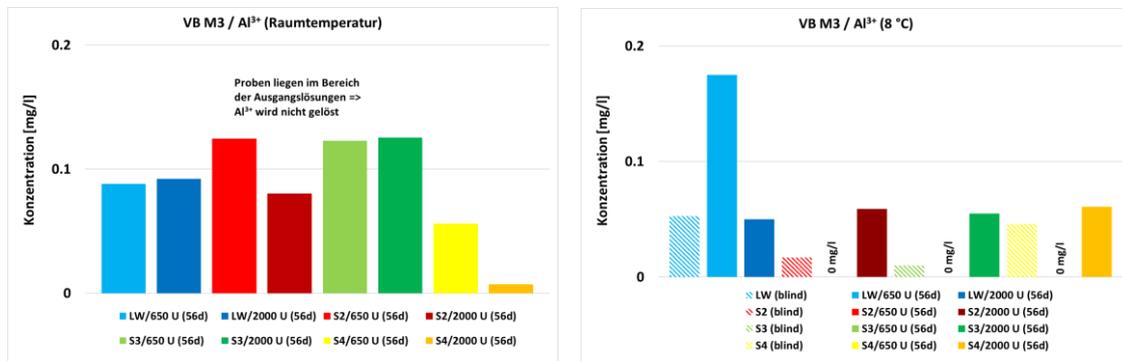


Abbildung 10-66: Vergleich des Al³⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

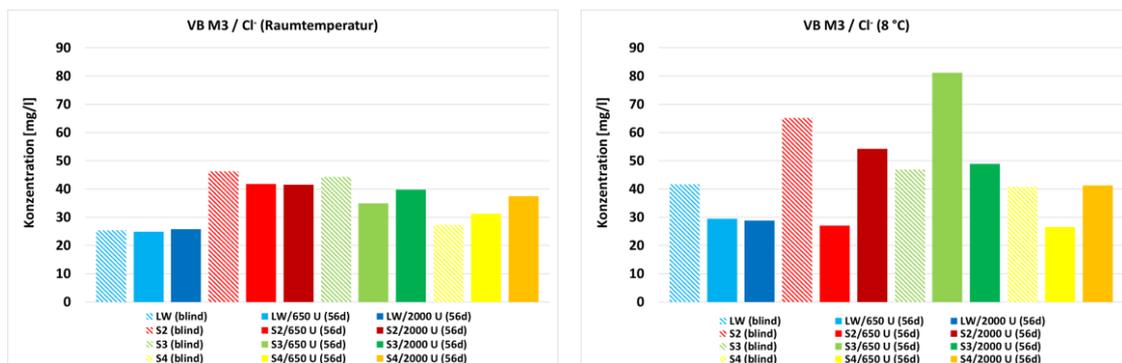


Abbildung 10-67: Vergleich des Cl⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

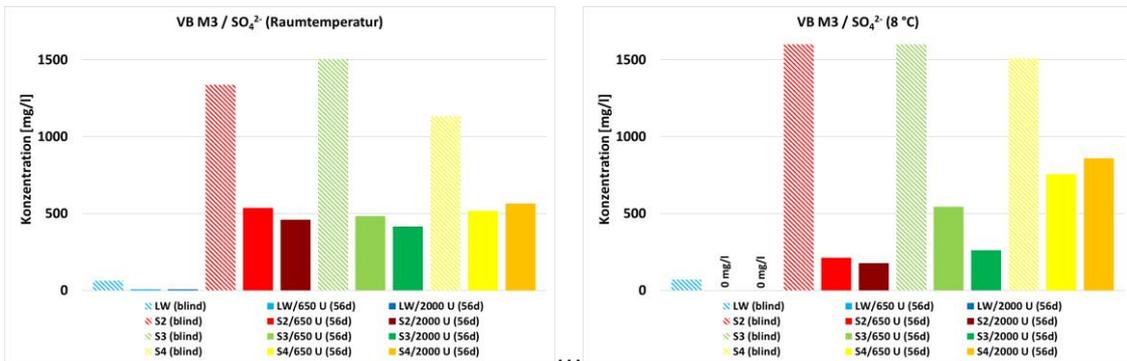


Abbildung 10-68: Vergleich des SO₄²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

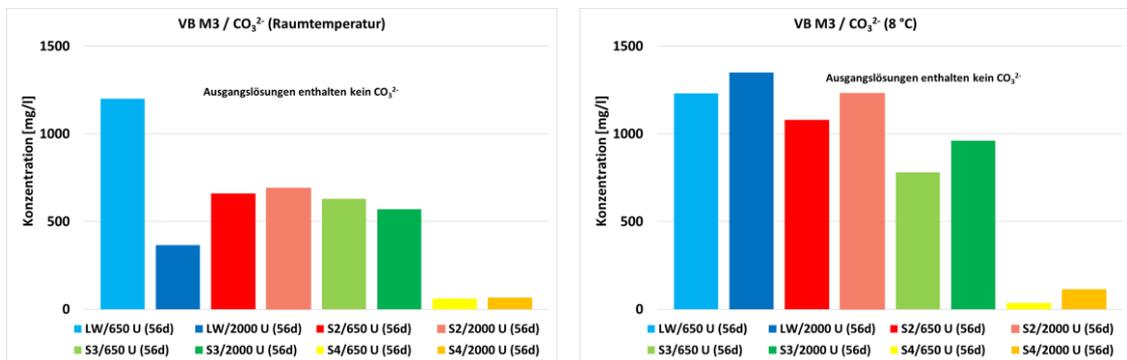


Abbildung 10-69: Vergleich des CO₃²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

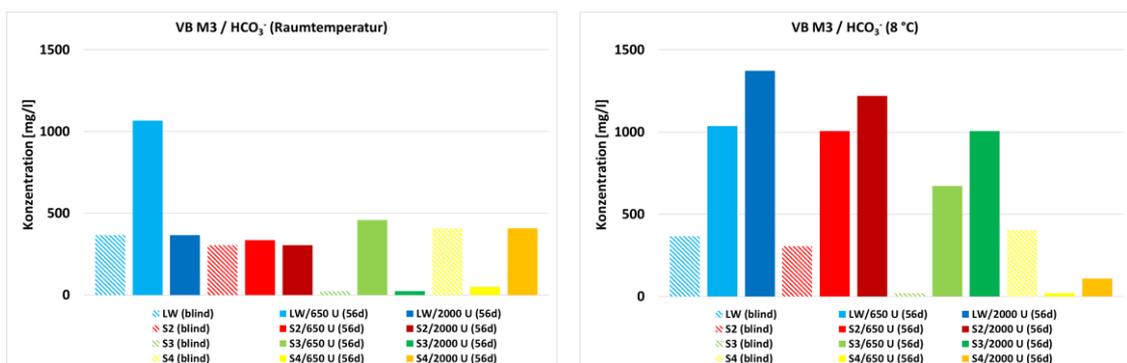


Abbildung 10-70: Vergleich des HCO₃⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M3, Raumtemperatur und 8°C)

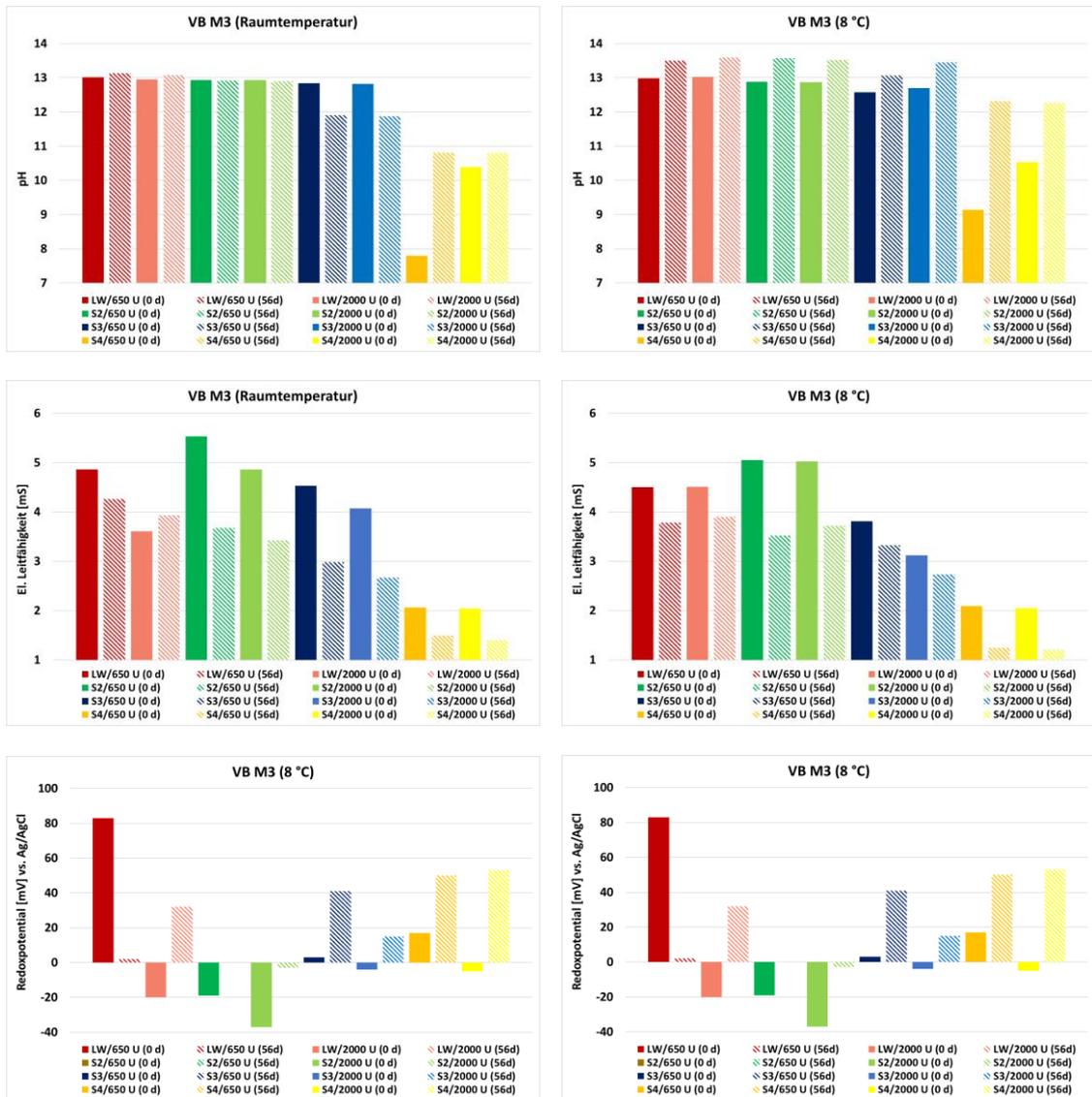


Abbildung 10-71: Vergleich der chemisch-physikalischen Parameter für Versuche bei Raumtemperatur und 8°C: pH-Wert, el. Leitfähigkeitswert und Redoxpotential zu Beginn und nach Versuchsende für VB M3 für die Anmischgeschwindigkeiten 650 U und 2000 U

10.5.4. M4

Tabelle 10-16: M4: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Kationenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

↑: bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↑: 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

↓: geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

M4	650U (Raumtemp.)	650U (8°C)	2000U (Raumtemp.)	2000U (8°C)
Na⁺				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↓	↑	↓
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↑	↑	↑
K⁺				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↑	↑	↑	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↑	↑	↑	↑
Ca²⁺				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	↓	↓	↓	↑
S3	↑	↑	↑	↑
S4	↓	↓	↓	↓
Mg²⁺				
LW	↓	↓	↓	↓
S2	↓	↓	↓	↓
S3	↓	↓	↓	↓
S4	↓	↓	↓	↓
Al³⁺				
LW	↑	↑	↑	↑
S2	≈	↓	≈	↓
S3	↑	↑	↓	↑
S4	↑	↑	↑	↑

Tabelle 10-17: M4: Übersicht der Zu- bzw. Abnahme von Anionenkonzentrationen in den jeweiligen Batchlösungen nach 56d Versuchszeit

- : bis 10-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : mehr als 10- jedoch weniger als 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : 20-fach höhere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung
- : geringere Konzentration im Vgl. zur Ausgangslösung

M4	650U (Raumtemp.)	650U (8°C)	2000U (Raumtemp.)	2000U (8°C)
Cl⁻				
LW		≈		≈
S2	≈		≈	
S3				
S4				
SO₄²⁻				
LW				
S2				
S3				
S4				
HCO₃⁻				
LW				
S2				
S3				
S4				
CO₃²⁻				
LW				
S2				
S3				
S4				

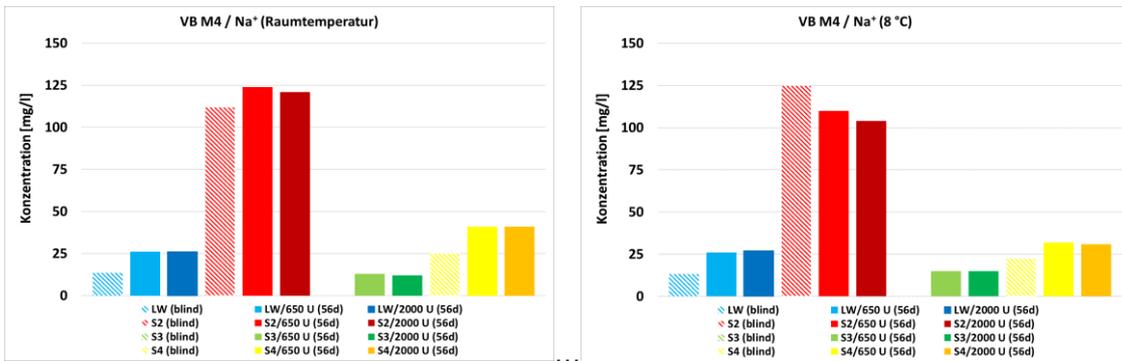


Abbildung 10-72: Vergleich des Na⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8°C)

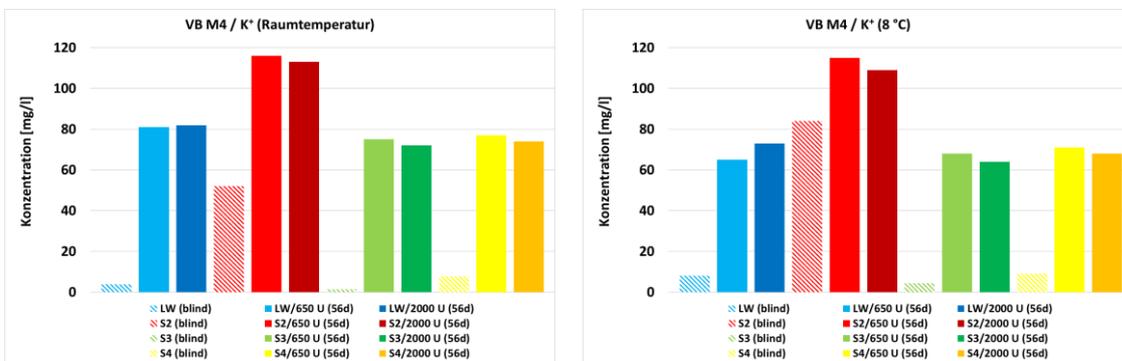


Abbildung 10-73: Vergleich des K⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8°C)

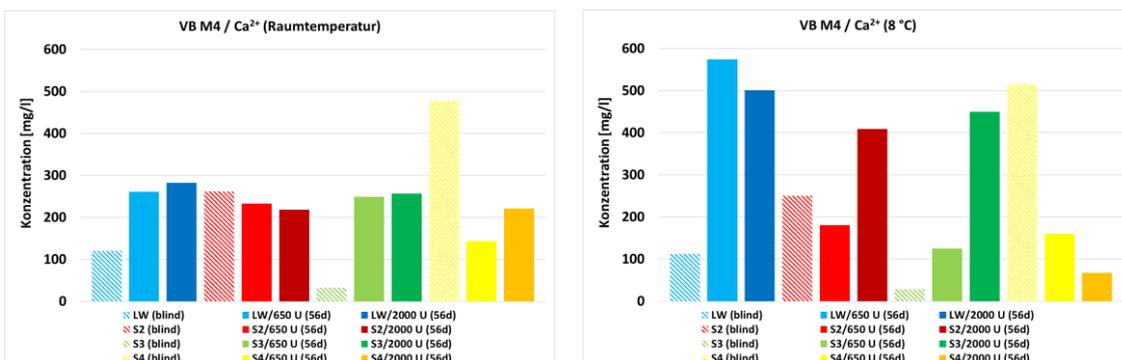


Abbildung 10-74: Vergleich des Ca²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8°C)

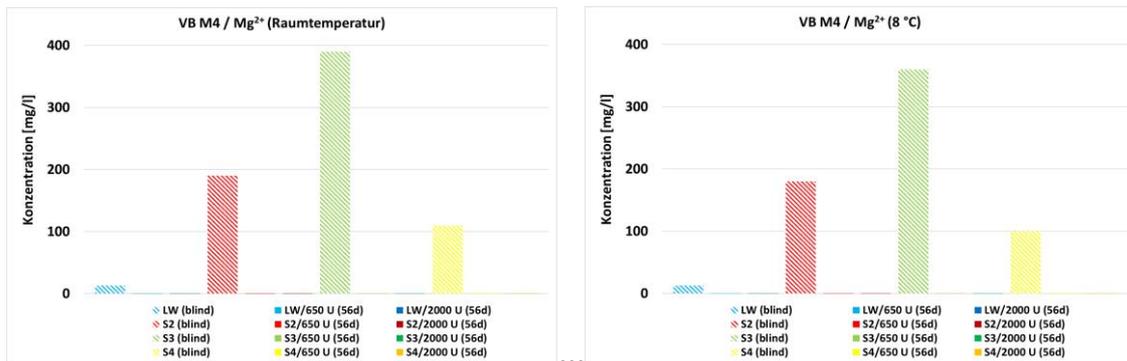


Abbildung 10-75: Vergleich des Mg²⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8 °C)

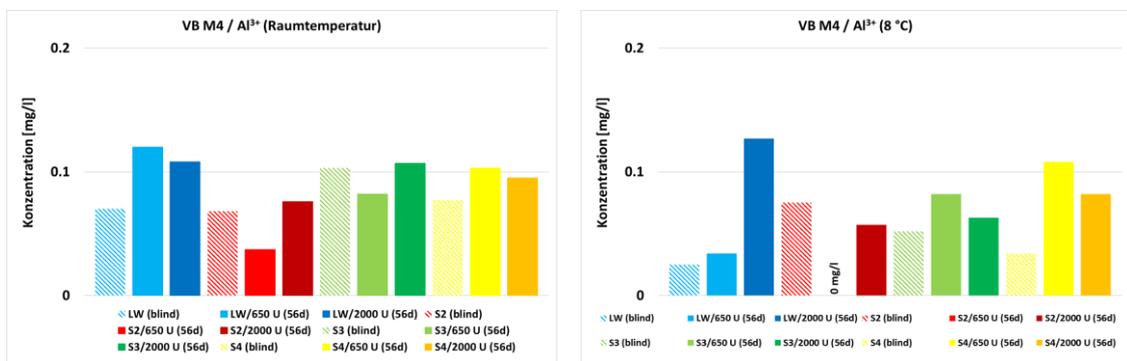


Abbildung 10-76: Vergleich des Al³⁺-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8 °C)

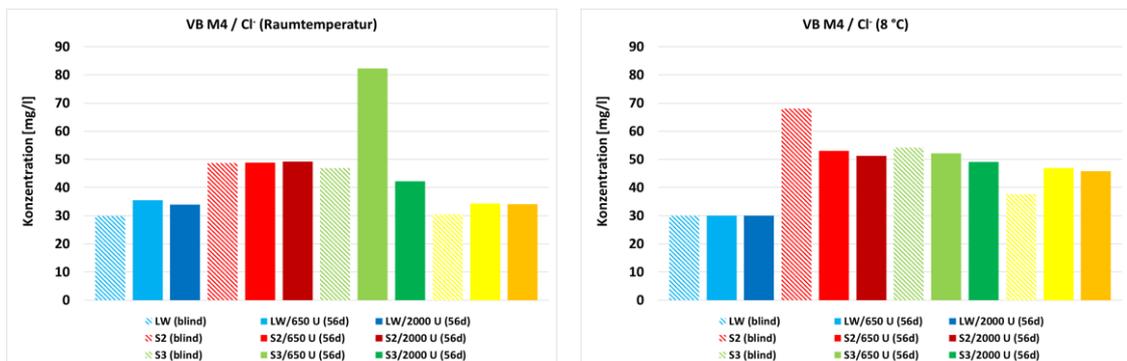


Abbildung 10-77: Vergleich des Cl⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8 °C)

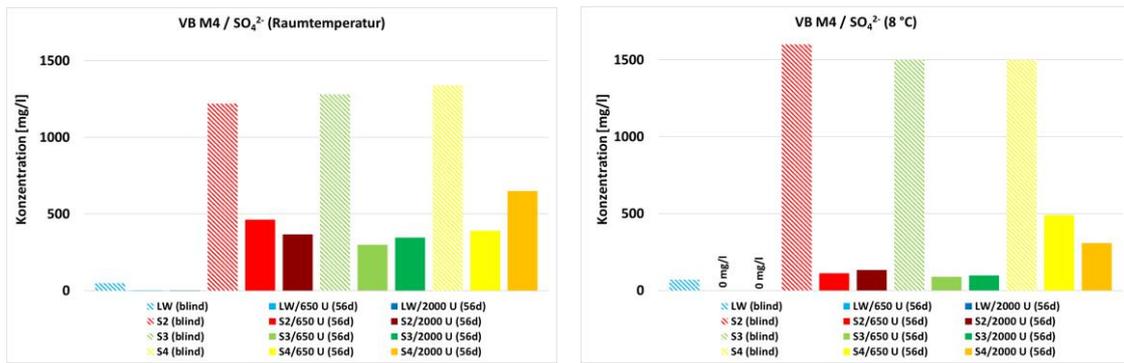


Abbildung 10-78: Vergleich des SO₄²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8°C)

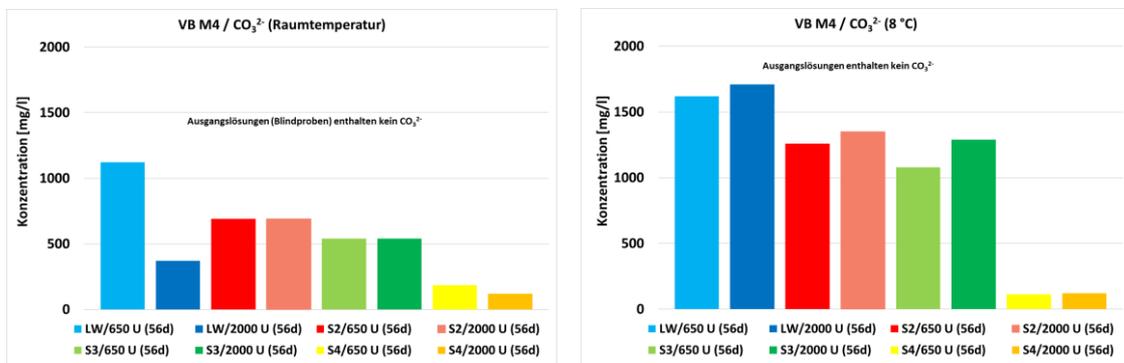


Abbildung 10-79: Vergleich des CO₃²⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8°C)

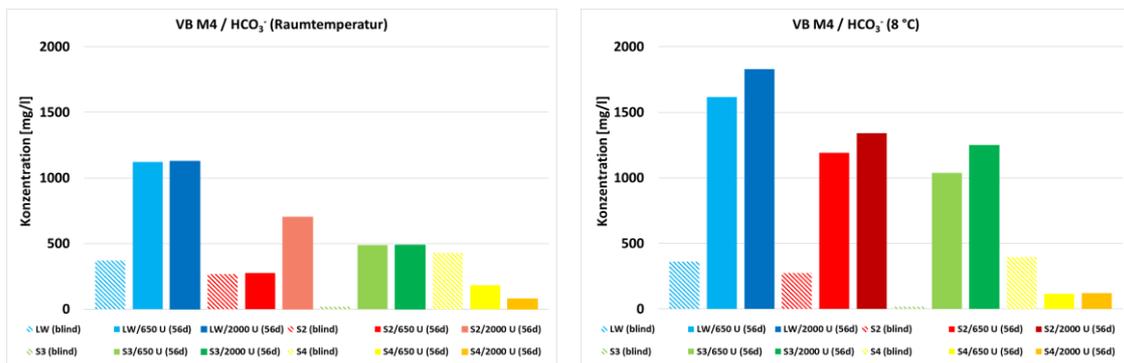


Abbildung 10-80: Vergleich des HCO₃⁻-Gehaltes der Blindproben und der jeweiligen Batchlösungen nach 56 d Reaktionszeit (VB M4, Raumtemperatur und 8°C)

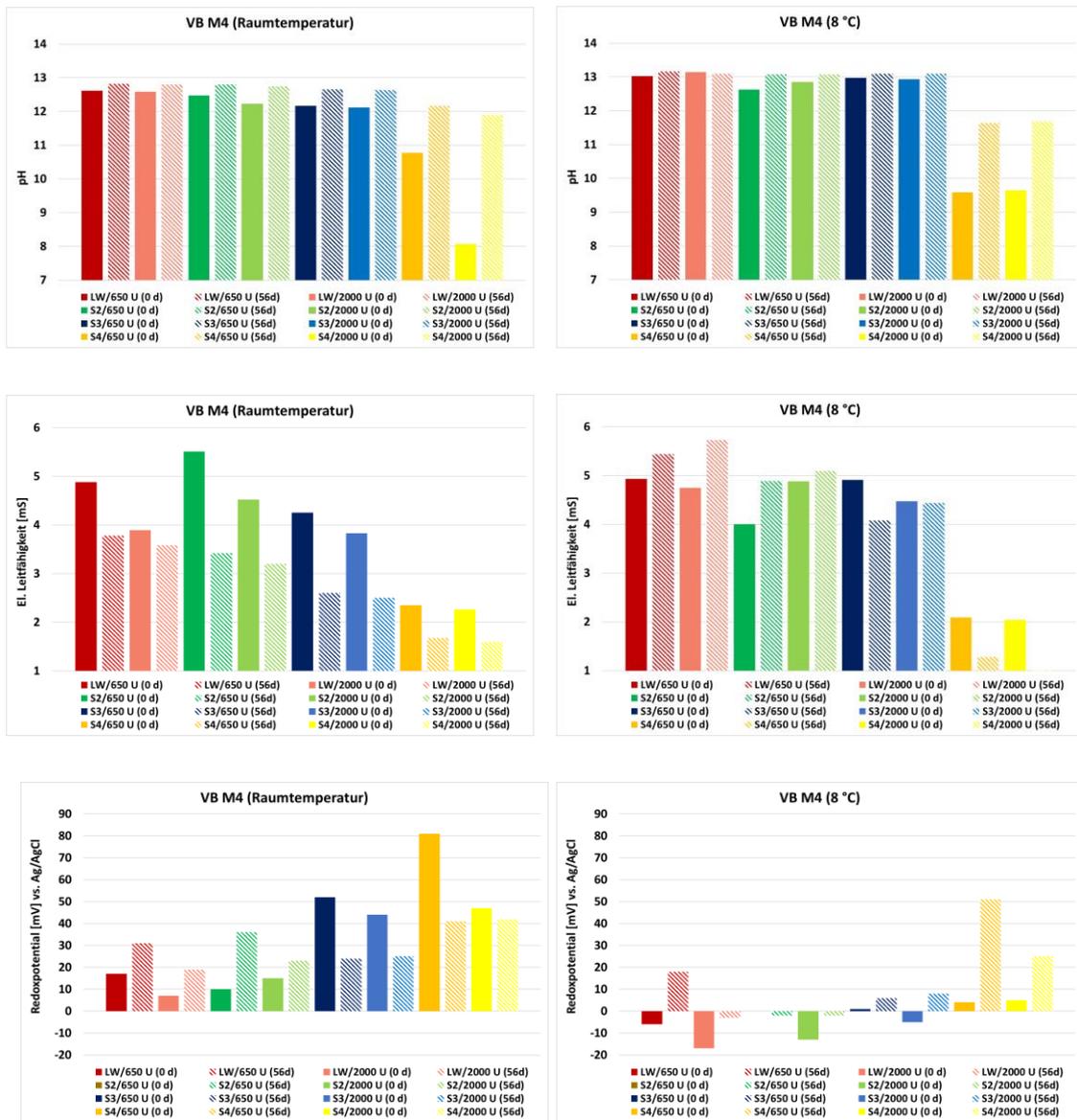


Abbildung 10-81: Vergleich der chemisch-physikalischen Parameter für Versuche bei Raumtemperatur und 8°C: pH-Wert, el. Leitfähigkeitswert und Redoxpotential zu Beginn und nach Versuchsende für VB M4 für die Anmischgeschwindigkeiten 650 U und 2000 U

10.6. Ergebnisse der Batchversuche: Daten (Anionen- und Kationenkonzentrationen, physico-chemische Parameter)

07d (Raumtemperatur) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW	1240	2476	31.5	1.29	102	37	309	0.02	1.38
S2	1119	2212	60.4	7.74	203	136	194	0.02	1.16
S3	943.2	1848	58.4	5.05	89	100	251	0.03	3.12
S4	221.9	421.1	61.2	40.21	106	96	106	0.06	0.77

Blindproben (Raumtemperatur) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW (blind)	0	349.2	26.87	78.49	13.5	2.5	111	13	0
S2 (blind)	0	251.9	49.57	1366	130	67	257	180	0.014
S3 (blind)	0	7.32	47.83	1258	0.13	0.43	25.7	360	0.035
S4 (blind)	0	411.8	32.95	1226	31.5	7.9	470	130	0.046

07d (8 °C) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW	1320	1068	41,75	0,55	83	120	450	0,009	0,89
S2	1650	1525	73,04	0,27	177	157	367	0,009	0,92
S3	1290	1068	73,56	0,36	70	109	439	0,011	0,76
S4	588	543	82,2	0,45	90	106	140	0,015	1,11

Blindproben (8 °C) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW (blind)	0	396,5	31,57	64	12,8	4,7	121	12,9	0
S2 (blind)	0	274,5	50,92	1500	114	51	296	205	0
S3 (blind)	0	30,5	45,68	1582	0,03	1,52	102,3	359	0,024
S4 (blind)	0	463,6	34,82	1509	28,4	7,3	537,5	113	0,015

Abbildung 10-82: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für 07d (650 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

07d (Raumtemperatur) 2000									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW	1062	2079	28.43	0.63	113	91	286	0.02	1.49
S2	953.4	1848	51.9	5.44	220	133	192	0.02	1.33
S3	917.1	1768	50.44	6.84	91	99	246	0.03	0.92
S4	391.7	732.2	58.89	42.28	122	75	95	0.06	2.98

Blindproben (Raumtemperatur) 2000									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW (blind)	0	299	26.47	46.2	15.2	2.5	104	13	0
S2 (blind)	0	237.6	46.79	1317	139	62	283	170	0.045
S3 (blind)	0	5.5	50.72	1456	0.54	5.8	31.5	350	0.048
S4 (blind)	0	408.3	33.09	1456	2.1	6.6	487.5	100	0.02

07d (8 °C) 2000									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW	780	579,5	24,21	2,9	82	119	517	0,021	0,94
S2	690	244	56,02	2,27	179	166	372	0,021	1,02
S3	600	335,5	55,24	2,45	65	113	596	0,034	1,08
S4	108	67,1	65,71	3,45	85	105	125	0,054	1,88

Blindproben (8 °C) 2000									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW (blind)	0	366	27,8	68	12,7	2,2	126	13,7	0
S2 (blind)	0	219,6	46,86	1636	112	48	309	260	0
S3 (blind)	0	24,4	44,63	1663	0,3	1,29	30.1	383	0,024
S4 (blind)	0	463,6	33,12	1291	28,3	7,3	489	118	0,015

Abbildung 10-83: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für 07d (2000 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

Tabelle 10-18: 07d: Gemessene Werte für pH, el. Leitfähigkeit und das Redoxpotential nach Versuchsende (Raumtemperatur (RT) und 8°C)

07d	pH (RT)	pH (8°C)	El. LF (RT) [mS]	El. LF (8°C) [mS]	Eh (RT) [mV]	Eh (8°C) [mV]
LW						
Blindprobe	7,45	7,5	0,636	0,648	239	247
650U / 0d	12,56	12,64	5,42	5,52	-68	-76
650U / 56d	12,95	13,11	4,45	6,3	-85	-78
2000U / 0d	12,73	12,99	4,9	5,29	-85	-73
2000U / 56d	12,48	13	4,2	6,53	-47	-102
S2						
Blindprobe	7,29	7,58	2,51	2,52	232	254
650U / 0d	12,28	12,47	4,92	5,86	-83	-95
650U / 56d	12,86	13,19	4,2	6,3	-92	-93
2000U / 0d	12,59	12,82	5,7	5,92	-87	-97
2000U / 56d	12,44	12,96	4,18	6,1	-56	-102
S3						
Blindprobe	6,25	7,44	2,14	2,13	284	212
650U / 0d	12,33	12,61	4,72	5,16	-59	-63
650U / 56d	12,55	13,21	6,32	5,58	-106	-104
2000U / 0d	12,58	12,41	4,85	3,9	-93	-89
2000U / 56d	12,46	12,83	3,52	4,14	-44	-100
S4						
Blindprobe	5,34	5,45	2,42	2,44	266	322
650U / 0d	11,38	12,03	2,4	2,82	-81	-123
650U / 56d	12,24	13	2,05	2,62	-82	-101
2000U / 0d	11,52	11,77	2,42	2,63	-67	-135
2000U / 56d	12,12	12,59	1,99	2,53	-56	-90

13+d (Raumtemperatur) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW	733.5	1208	283	36.02	197	239	149	0.02	8.39
S2	678.3	1046	309	56.45	283	262	101	0.01	8.64
S3	576.3	841.2	249	34.4	193	231	148	0.02	7.03
S4	507.6	648.4	303	35.48	203	219	148	0.02	6.1

Blindproben (Raumtemperatur) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW (blind)	0	349.2	26.87	78.49	13.5	2.5	111	13	0
S2 (blind)	0	251.9	49.57	1366	130	67	257	180	0.014
S3 (blind)	0	7.32	47.83	1258	0.13	0.43	25.7	360	0.035
S4 (blind)	0	411.8	32.95	1226	31.5	7.9	470	130	0.046

13+d (8 °C) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW	660	427	129	31,64	184	178	121	0,087	4,68
S2	930	701,5	226	27,82	282	254	104	0,006	5,27
S3	690	488	181	22,18	176	183	126	0,006	4,36
S4	570	396,5	292	37,45	196	176	128	0,018	2,66

Blindproben (8 °C) 650									
	CO ₃ ²⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Al ³⁺ [mg/l]
LW (blind)	0	396,5	31,57	65	12,8	4,7	121	12,9	0
S2 (blind)	0	274,5	50,92	1500	114	51	296	205	0
S3 (blind)	0	30,5	45,68	1582	0,03	1,52	102,3	359	0,024
S4 (blind)	0	463,6	34,82	1509	28,4	7,3	537,5	113	0,015

Abbildung 10-84: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für 13+d (650 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

13+d (Raumtemperatur) 2000									
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	596.1	1015	236.4	38.6	190	361	122	0.02	8.72
S2	631.2	1072	303.2	49.37	281	286	74	0.02	8.29
S3	527.7	868.3	271.1	51.27	183	252	42	0.01	6.67
S4	399	138.5	325.1	94.3	198	229	125	0.02	5.46

Blindproben (Raumtemperatur) 2000									
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	299	26.47	46.2	15.2	2.5	104	13	0
S2 (blind)	0	237.6	46.79	1317	139	62	283	170	0.045
S3 (blind)	0	5.5	50.72	1456	0.54	5.8	31.5	350	0.048
S4 (blind)	0	408.3	33.09	1456	2.1	6.6	487.5	100	0.02

13+d (8 °C) 2000									
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1860	1556	125,39	12,81	185	181	152	0,023	4,6
S2	1380	1159	217,28	19,3	330	289	109	0,02	4,94
S3	900	732	228,4	13,1	191	191	127	0,025	4,55
S4	3000	2898	306,28	29,1	212	206	122	0,053	3,34

Blindproben (8 °C) 2000									
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	366	27,8	67,72	12,7	2,2	126	13,7	0
S2 (blind)	0	219,6	46,86	1636	112	48	309	260	0
S3 (blind)	0	24,4	44,63	1663	0,3	1,29	30,1	383	0,024
S4 (blind)	0	463,6	33,12	1291	28,3	7,3	489	118	0,015

Abbildung 10-85: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für 13+d (2000 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

Tabelle 10-19: 13+d: Gemessene Werte für pH, el. Leitfähigkeit und das Redoxpotential nach Versuchsende (Raumtemperatur (RT) und 8°C)

13+d	pH (RT)	pH (8°C)	El. LF (RT) [mS]	El. LF (8°C) [mS]	Eh (RT) [mV]	Eh (8°C) [mV]
LW						
Blindprobe	7,45	7,47	0,636	0,639	239	260
650U / 0d	11,96	12,15	2,24	2,43	-111	-128
650U / 56d	12,7	13,08	3,8	3,63	-456	-477
2000U / 0d	12,04	12,47	1,90	2,18	-102	-125
2000U / 56d	12,31	12,68	2,36	3,73	-557	-370
S2						
Blindprobe	7,29	7,34	2,51	2,48	232	260
650U / 0d	11,67	11,8	3,29	3,32	-180	-180
650U / 56d	12,66	13,08	4,1	3,83	-445	-505
2000U / 0d	11,6	12,19	3,22	3,41	-134	-195
2000U / 56d	12,31	12,74	2,99	4,16	-410	-477
S3						
Blindprobe	6,25	7,74	2,14	2,13	284	299
650U / 0d	10,83	11,97	2,46	3,03	-112	-220
650U / 56d	12,41	12,98	3,23	3,31	-522	-517
2000U / 0d	11,37	11,76	2,94	3,01	-164	-180
2000U / 56d	12,28	12,65	3,46	3,54	-566	-394
S4						
Blindprobe	5,34	5,42	2,42	2,41	266	265
650U / 0d	6,68	11	2,65	2,49	-153	-247
650U / 56d	12,35	12,83	3,32	2,9	-562	-465
2000U / 0d	8,77	10,93	2,57	2,57	-154	-243
2000U / 56d	12,25	12,55	2,71	3,15	-567	-526

M3 (Raumtemperatur)				650 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1200	1067	24.86	6.168	27	71	341	0.01	0.088
S2	660	335.5	41.76	537.4	130	109	316	0.09	0.125
S3	630	457.5	34.94	483.6	14	65	368	0.18	0.123
S4	60	48.8	31.25	518.7	34	64	268	0.43	0.056

Blindproben (Raumtemperatur)				650 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	366	25.4	62.62	11.8	2.4	109	13	0.568
S2 (blind)	0	305	46.16	1336	114	49	290	180	0.119
S3 (blind)	0	24.4	44.32	1505	0.03	0.68	28.9	360	0.081
S4 (blind)	0	408.7	27.23	1131	21.3	7.2	510	100	0.079

M3 (8 °C)				650 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1230	1037	29.4	0	27	62	322.5	0.01	0.175
S2	1080	1007	27.05	213	116	102	272	0.09	0
S3	780	671	81.14	543	14	164	286	0.13	0
S4	36	18.3	26.55	756	33	61	338	0.53	0

Blindproben (8 °C)				650 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	366	41.6	69.32	13.4	17.2	117	13	0.053
S2 (blind)	0	305	65.13	1648	127	60	293	180	0.017
S3 (blind)	0	18.3	46.9	1670	0.24	0.89	30.3	360	0.01
S4 (blind)	0	402.6	40.7	1511	25.4	8.8	515	100	0.046

Abbildung 10-86: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für VBM3 (650 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

M3 (Raumtemperatur)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	990	793	25.71	7.57	46	67	297	0.01	0.092
S2	690	518.5	41.47	460.3	121	108	287	0.13	0.08
S3	570	488	39.77	415.9	18	69	264	0.24	0.125
S4	66	30.5	37.5	565.4	42	66	246	0.36	0.007

Blindproben (Raumtemperatur)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	366	25.4	62.62	11.8	2.4	109	13	0.568
S2 (blind)	0	305	46.16	1336	114	49	290	180	0.119
S3 (blind)	0	24.4	44.32	1505	0.03	0.68	28.9	360	0.081
S4 (blind)	0	408.7	27.23	1131	21.3	7.2	510	100	0.079

M3 (8 °C)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1350	1373	28.78	0	27	60	371	0.01	0.05
S2	1230	1220	54.22	178	117	107	278	0.06	0.059
S3	960	1007	48.88	261	18	78	327	0.11	0.055
S4	114	109.8	41.31	858	33	68	277	0.46	0.061

Blindproben (8 °C)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	366	41.6	69.32	13.4	17.2	117	13	0.053
S2 (blind)	0	305	65.13	1648	127	60	293	180	0.017
S3 (blind)	0	18.3	46.9	1670	0.24	0.89	30.3	360	0.01
S4 (blind)	0	402.6	40.7	1511	25.4	8.8	515	100	0.046

Abbildung 10-87: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für VB M3 (2000 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

Tabelle 10-20: M3: Gemessene Werte für pH, el. Leitfähigkeit und das Redoxpotential nach Versuchsende (Raumtemperatur (RT) und 8°C)

M3	pH (RT)	pH (8°C)	El. LF (RT) [mS]	El. LF (8°C) [mS]	Eh (RT) [mV]	Eh (8°C) [mV]
LW						
Blindprobe	7,41	7,36	0,617	0,647	278	239
650U / 0d	13,01	12,98	4,86	4,5	-5	83
650U / 56d	13,14	13,50	4,26	3,78	22	2
2000U / 0d	12,95	13,02	3,61	4,51	-8	-20
2000U / 56d	13,07	13,59	3,93	3,90	19	32
S2						
Blindprobe	7,47	7,49	2,45	2,47	250	235
650U / 0d	12,93	12,88	5,53	5,05	-8	-19
650U / 56d	12,92	13,57	3,68	3,52	21	0
2000U / 0d	12,92	12,86	4,86	5,02	-8	-37
2000U / 56d	12,90	13,52	3,42	3,72	23	-3
S3						
Blindprobe	6,07	6,44	2,10	2,11	246	238
650U / 0d	12,84	12,58	4,53	3,81	10	3
650U / 56d	11,90	13,06	2,98	3,32	46	41
2000U / 0d	12,82	12,70	4,07	3,12	5	-4
2000U / 56d	11,87	13,45	2,67	2,73	34	15
S4						
Blindprobe	5,18	5,19	2,37	2,37	268	277
650U / 0d	7,8	9,14	2,06	2,09	1	17
650U / 56d	10,81	12,31	1,49	1,24	74	50
2000U / 0d	10,39	10,53	2,04	2,05	-7	-5
2000U / 56d	10,81	12,26	1,4	1,20	71	53

M4 (Raumtemperatur)				650 U					
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1122	1122	35.43	2.4	26	81	261	0.02	0.12
S2	690	274.5	48.88	463	124	116	233	0.13	0.037
S3	540	488	82.35	300	13	75	249	0.16	0.082
S4	186	183	34.34	390	41	77	143	0.24	0.103

Blindproben (Raumtemperatur)				650 U					
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	372.1	29.85	49	13.5	3.8	120	13	0.07
S2 (blind)	0	268.4	48.74	1220	112	52	262	190	0.068
S3 (blind)	0	18.3	46.92	1280	0	1.36	32.4	390	0.103
S4 (blind)	0	427	30.53	1340	25.3	7.8	477.5	110	0.077

M4 (8 °C)				650 U					
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1620	1617	29.99	0	26	65	574	0.01	0.034
S2	1260	1190	52.97	111	110	115	180	0.19	0
S3	1080	1037	52.11	88	15	68	125	0.06	0.082
S4	114	115.9	46.89	489	32	71	160	0.76	0.108

Blindproben (8 °C)				650 U					
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	359.9	30.02	68.75	13.3	8	112	13	0.025
S2 (blind)	0	274.5	67.99	1784	125	84	250	180	0.075
S3 (blind)	0	18.3	54.21	1500	0.23	4.4	28.3	360	0.052
S4 (blind)	0	396.5	37.59	1500	22.6	9.1	515	100	0.034

Abbildung 10-88: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für VB M4 (650 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

M4 (Raumtemperatur)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1140	1129	33.89	2.8	26	82	282	0.02	0.108
S2	690	701.5	49.16	368	121	113	218	0.14	0.076
S3	540	488	42.16	345	12	72	257	0.21	0.107
S4	120	79.3	34.03	650	41	74	221	0.3	0.095

Blindproben (Raumtemperatur)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	372.1	29.85	49	13.5	3.8	120	13	0.07
S2 (blind)	0	268.4	48.74	1220	112	52	262	190	0.068
S3 (blind)	0	18.3	46.92	1280	0	1.36	32.4	390	0.103
S4 (blind)	0	427	30.53	1340	25.3	7.8	477.5	110	0.077

M4 (8 °C)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW	1710	1830	30.02	0	27	73	501	0.03	0.127
S2	1350	1342	51.22	132	104	109	409	0.14	0.057
S3	1290	1251	49.13	97	15	64	450	0.06	0.063
S4	120	122	45.79	307	31	68	67	0.71	0.082

Blindproben (8 °C)				2000 U					
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LW (blind)	0	359.9	30.02	68.75	13.3	8	112	13	0.025
S2 (blind)	0	274.5	67.99	1784	125	84	250	180	0.075
S3 (blind)	0	18.3	54.21	1500	0.23	4.4	28.3	360	0.052
S4 (blind)	0	396.5	37.59	1500	22.6	9.1	515	100	0.034

Abbildung 10-89: Batchversuche – Anionen- und Kationenkonzentrationen für VB M4 (2000 U) nach einer Reaktionszeit von 56 d mit der entsprechenden Reaktionslösung bei Raumtemperatur und 8°C sowie der mitgeschüttelten Blindproben

Tabelle 10-21: M4: Gemessene Werte für pH, el. Leitfähigkeit und das Redoxpotential (Raumtemperatur (RT) und 8°C)

M4	pH (RT)	pH (8°C)	El. LF (RT) [mS]	El. LF (8°C) [mS]	Eh (RT) [mV]	Eh (8°C) [mV]
LW						
Blindprobe	7,38	7,42	0,678	0,647	216	240
650U / 0d	12,61	13,02	4,88	4,93	17	-6
650U / 56d	12,82	13,17	3,78	5,44	31	18
2000U / 0d	12,58	13,14	3,89	4,75	7	-17
2000U / 56d	12,80	13,09	3,58	5,73	19	-3
S2						
Blindprobe	7,26	7,34	2,38	2,38	267	235
650U / 0d	12,34	12,63	4,88	4,00	23	0
650U / 56d	12,80	13,07	3,78	4,89	36	-2
2000U / 0d	12,22	12,84	3,89	4,88	30	-13
2000U / 56d	12,75	13,07	3,58	5,09	23	-2
S3						
Blindprobe	7,52	7,87	2,22	2,12	305	217
650U / 0d	12,17	12,97	4,25	4,91	52	1
650U / 56d	12,66	13,09	2,60	4,08	24	6
2000U / 0d	12,12	12,93	3,83	4,47	44	-5
2000U / 56d	12,63	13,09	2,50	4,44	25	8
S4						
Blindprobe	5,55	5,25	2,36	2,36	235	278
650U / 0d	10,77	9,58	2,35	2,09	81	4
650U / 56d	12,17	11,64	1,68	1,28	41	51
2000U / 0d	8,07	9,65	2,26	2,04	47	5
2000U / 56d	11,90	11,68	1,60	0,85	42	25

10.7. Ergebnisse der Umströmungsversuche zur Untersuchung der Stabilität unter zementaggressiven Wässern

10.7.1. Vorortparameter der Suspensionen

Tabelle 10-22: Vorortparameter der Suspension des Umströmungsversuchs 2

	[Einheit]	13+d	13+d	13+d	13+d
Mischgeschwindigkeit	[U/min]	650	2000	650	2000
Dichte Araeometer	[g/cm ³]	1,96	1,92	1,44	1,34
Dichte Waage	[g/cm ³]	1,92	1,96	1,41	1,34
Temperatur	[°C]	22,3	23,6	22,0	22,1
Marshzeit	[s]	67	73	41	46
Restlaufzeit	[s]	62	57	33	41
Capillary Suction Time	[s]	488	914	472	963
Filterpresse Zeit	[s]	297	450	430	450
Filterpresse Volumen	[ml]	91	78	112	78
Absetzmaß 1 h	[%]	1,6	0	4,0	0
Absetzmaß 2 h	[%]	5,6	0,8	5,6	0
Absetzmaß 24 h	[%]	8,0	0,8	6,4	0,8

Tabelle 10-23: Vorortparameter der Suspension des Umströmungsversuchs 3

	[Einheit]	M3	M3	M4	M4
Mischgeschwindigkeit	[U/min]	650	2000	650	2000
Dichte Araeometer	[g/cm ³]	2,00	2,00	2,00	1,99
Dichte Waage	[g/cm ³]	2,00	2,00	1,90	1,99
Temperatur	[°C]	21,7	23,0	21,9	22,9
Marshzeit	[s]	106	85	288	127
Restlaufzeit	[s]	108	81	Zu zäh	111
Capillary Suction Time	[s]	734	762	>2000	1759
Absetzmaß 1 h	[%]	0	0	0	0
Absetzmaß 2 h	[%]	0	0,2	0	0
Absetzmaß 24 h	[%]	0	0,2	0	0

10.7.2. Visuelle Begutachtung der Versuchsprismen (Initial (I) und nach Ausbau (A))

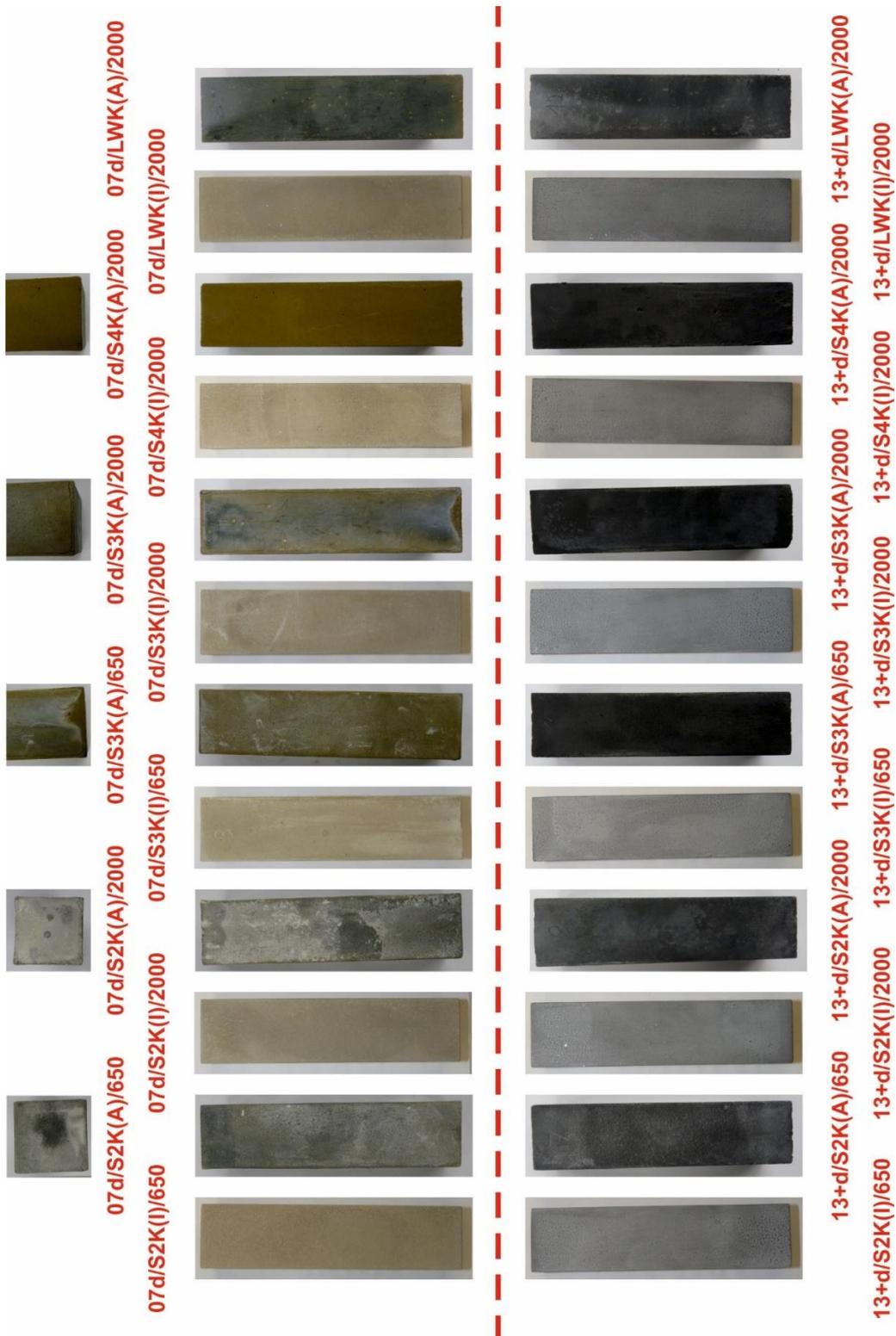


Abbildung 10-90: Bilder der Versuchsprismen der Verfüllbaustoffe 07d und 13+d im Versuch 1 bei Raumtemperatur mit XXX/XXX(I)XXX vor Versuchsbeginn und XXX/XXX(A)XXX bei Versuchsende

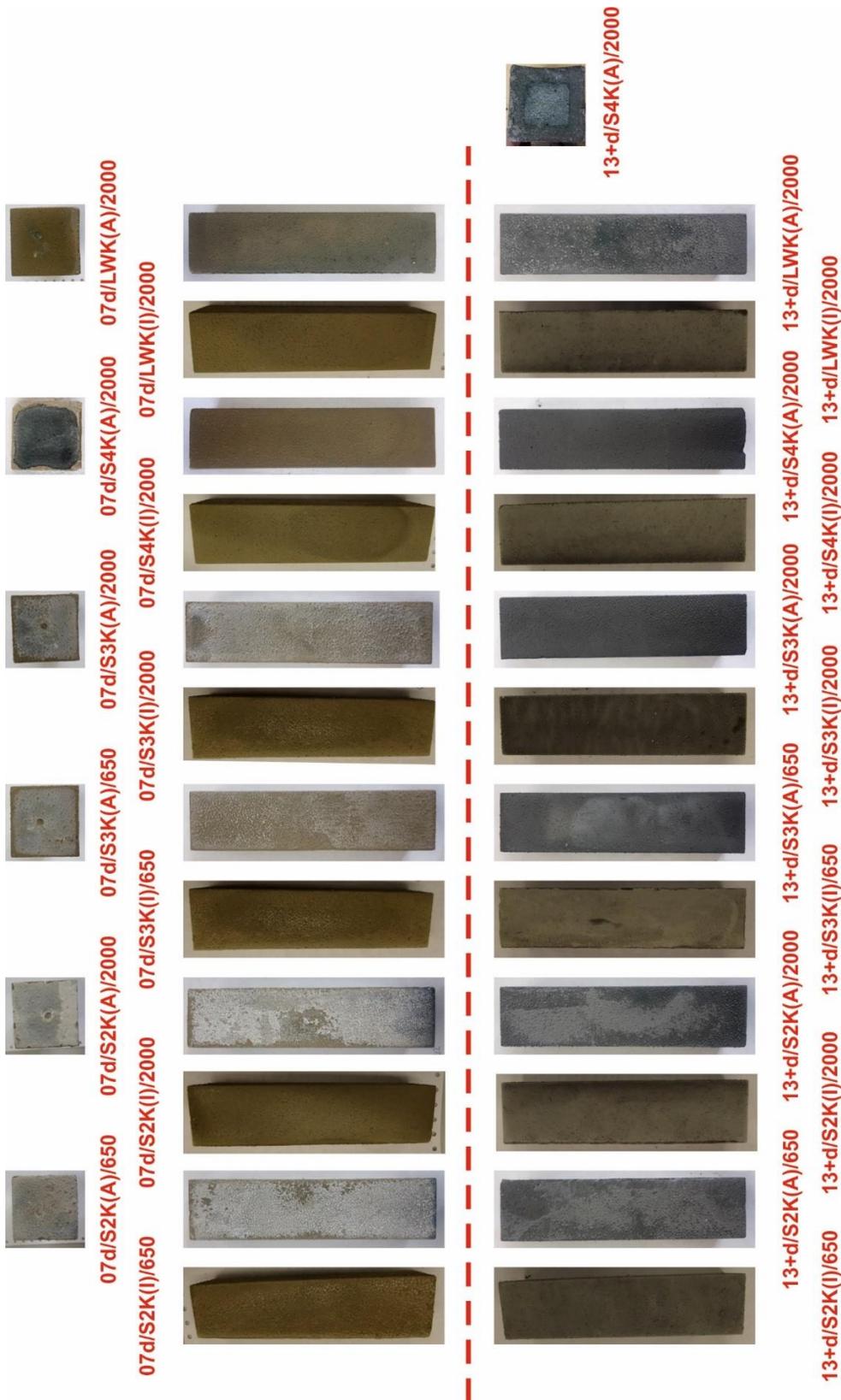


Abbildung 10-91: Bilder der Versuchsprismen der Verfüllbaustoffe 07d und 13+d im Versuch 2 bei ca. 8 °C mit XXX/XXX(I)XXX vor Versuchsbeginn und XXX/XXX(A)XXX bei Versuchsende

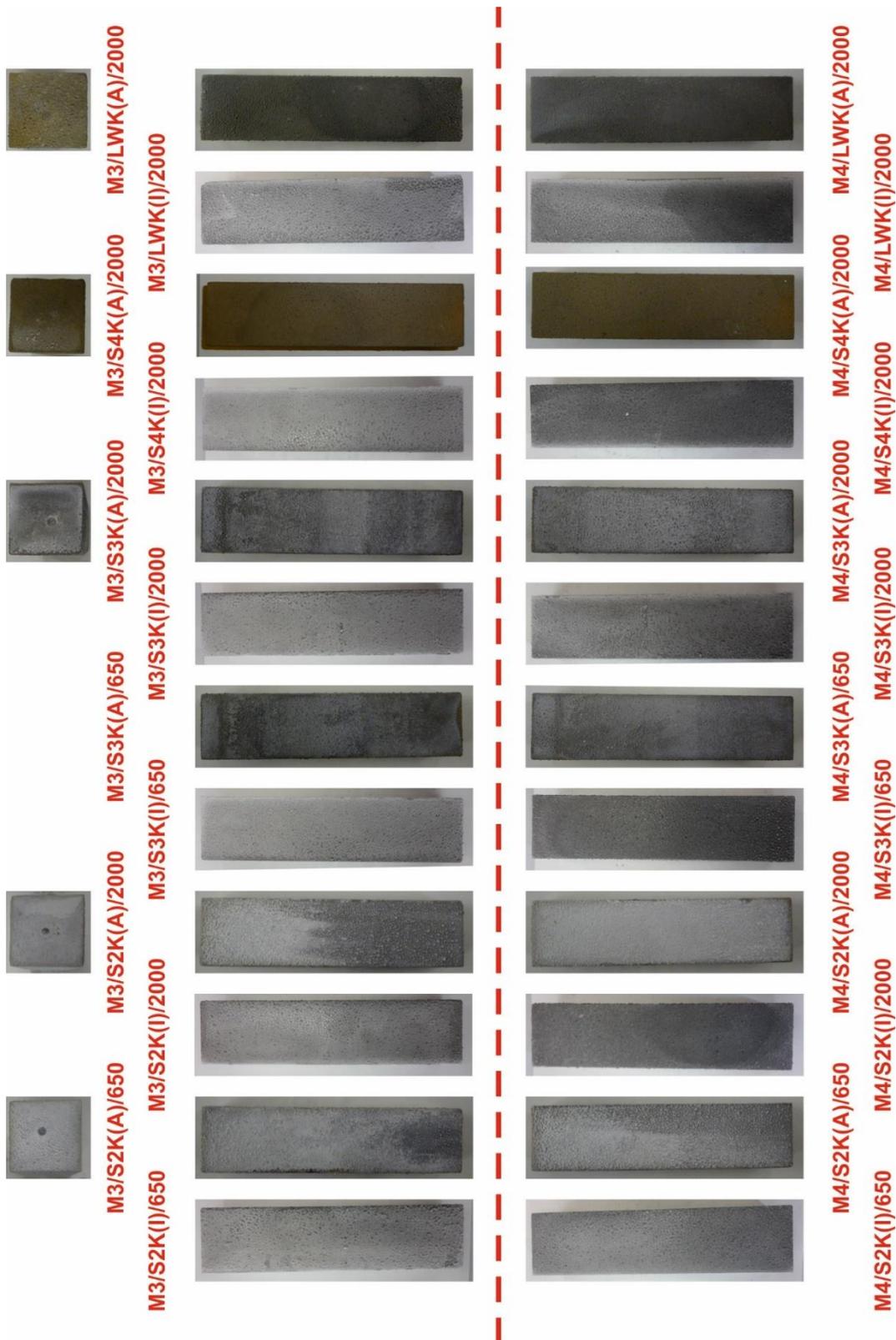


Abbildung 10-92: Bilder der Versuchsprismen der Verfüllbaustoffe M3 und M4 im Versuch 3 bei Raumtemperatur mit XXX/XXX(I)XXX vor Versuchsbeginn und XXX/XXX(A)XXX bei Versuchsende

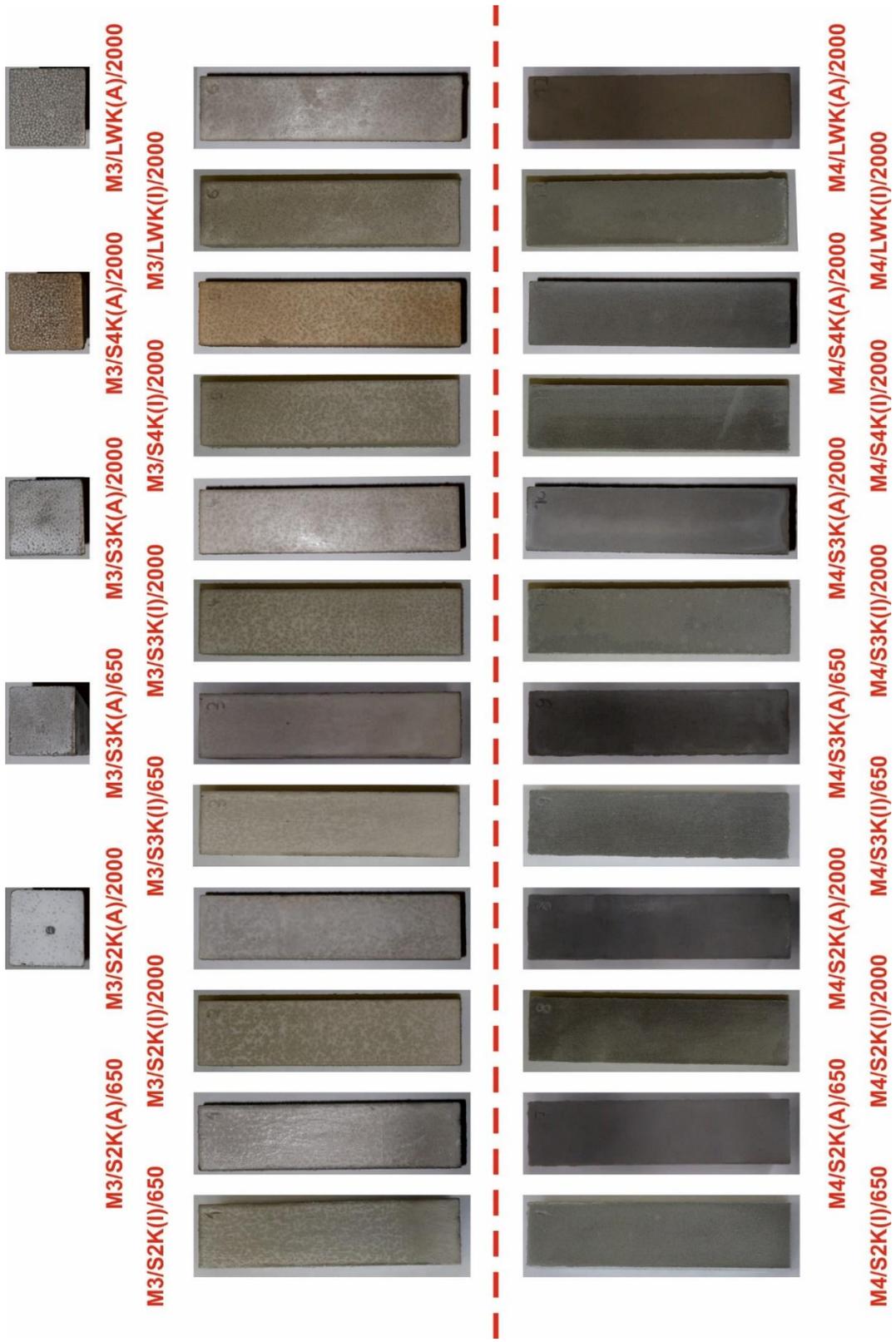


Abbildung 10-93: Bilder der Versuchsprismen der Verfüllbaustoffe M3 und M4 im Versuch 1 bei ca. 8 °C mit XXX/XXX(I)XXX vor Versuchsbeginn und XXX/XXX(A)XXX bei Versuchsende

10.7.3. pH-Wert der Reaktionswässer

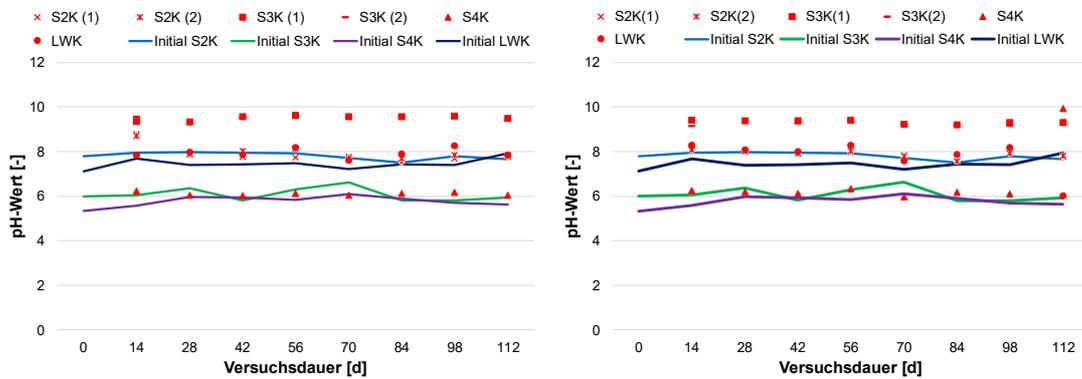


Abbildung 10-94: Entwicklung des pH-Werts der Reaktionswässer im Versuch 1 bei Raumtemperatur (links Verfüllbaustoff 07d, rechts 13+d)

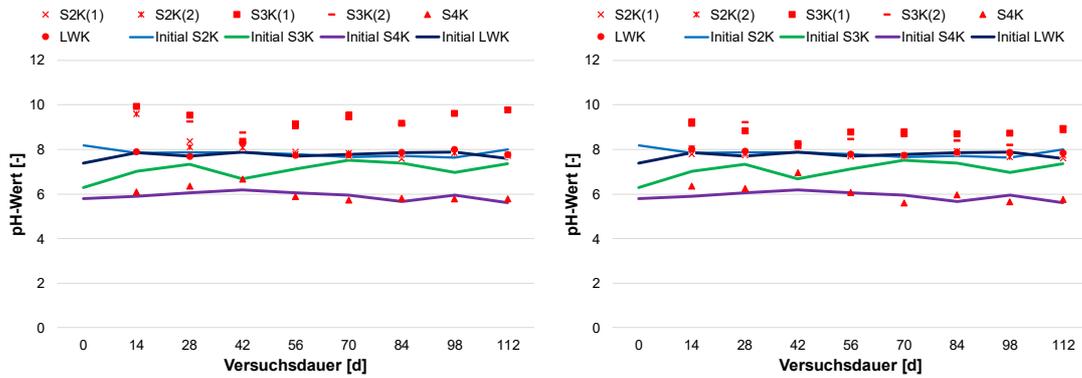


Abbildung 10-95: Entwicklung des pH-Werts der Reaktionswässer im Versuch 2 bei ca. 8 °C (links Verfüllbaustoff 07d, rechts 13+d)

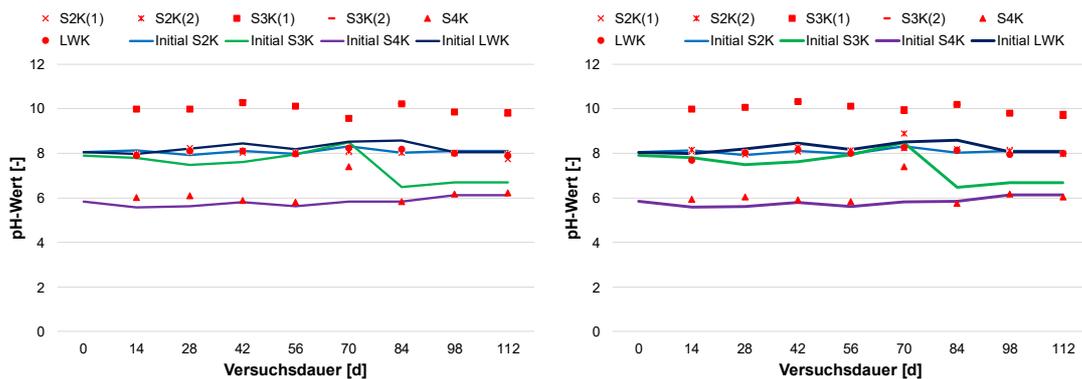


Abbildung 10-96: Entwicklung des pH-Werts der Reaktionswässer im Versuch 3 bei Raumtemperatur (links Verfüllbaustoff M3, rechts M4)

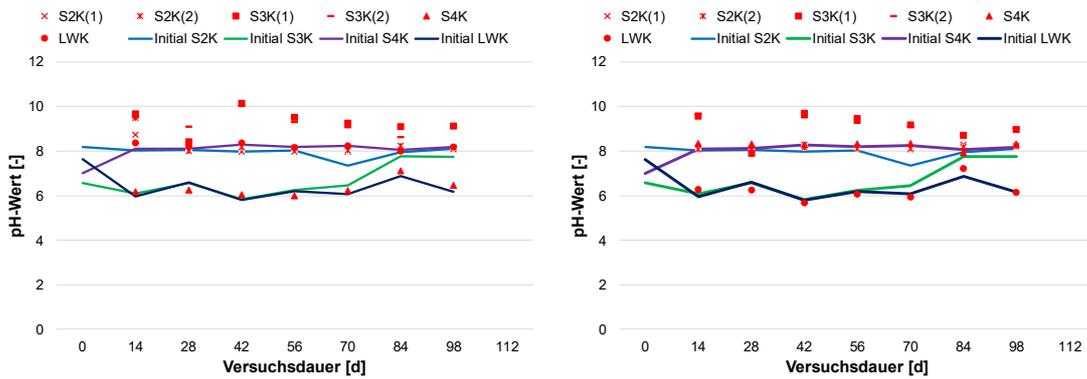


Abbildung 10-97: Entwicklung des pH-Werts der Reaktionswässer im Versuch 4 bei ca. 8 °C (links Verfüllbaustoff M3, rechts M4)

10.7.4. Redoxpotential der Reaktionswässer

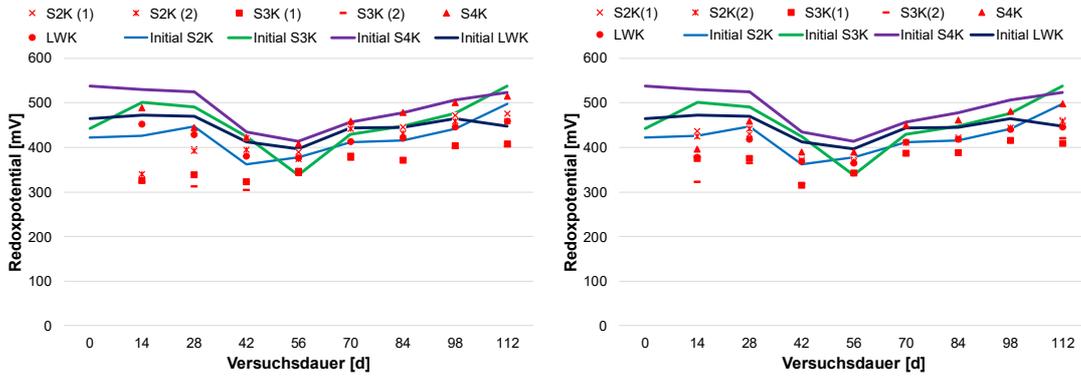


Abbildung 10-98: Entwicklung des Redoxpotentials der Reaktionswässer im Versuch 1 bei Raumtemperatur (links Verfüllbaustoff 07d, rechts 13+d)

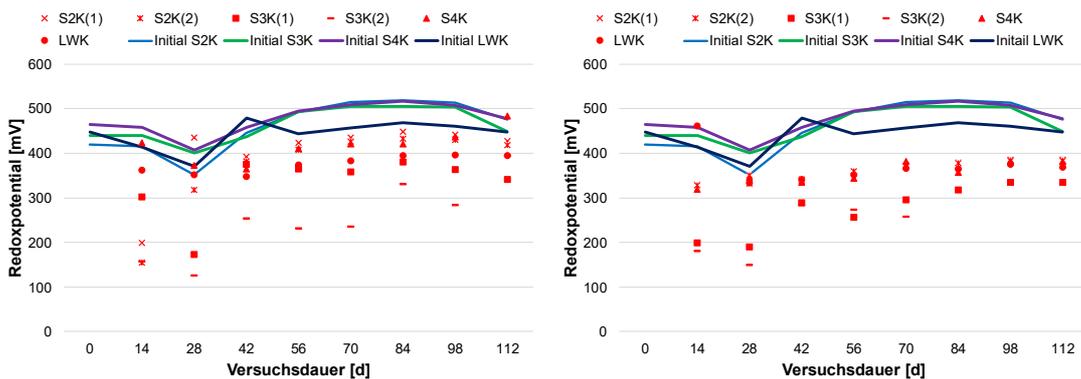


Abbildung 10-99: Entwicklung des Redoxpotentials der Reaktionswässer im Versuch 2 bei ca. 8 °C (links Verfüllbaustoff 07d, rechts 13+d)

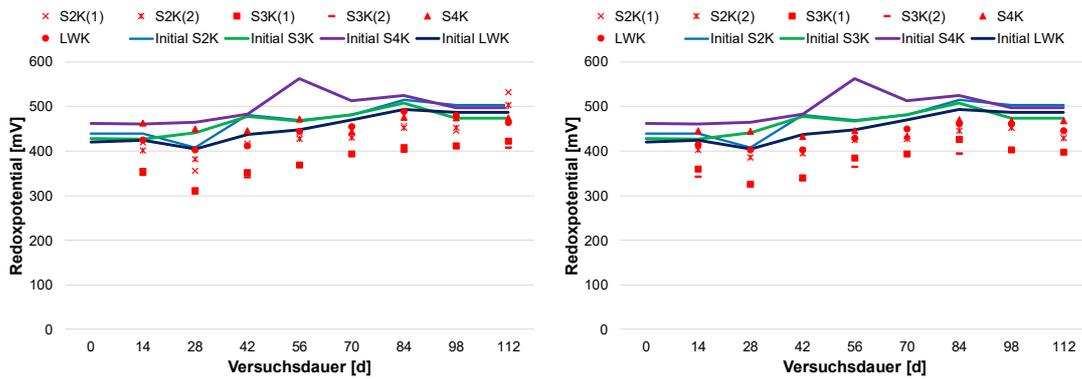


Abbildung 10-100: Entwicklung des Redoxpotentials der Reaktionswässer im Versuch 3 bei Raumtemperatur (links Verfüllbaustoff M3, rechts M4)

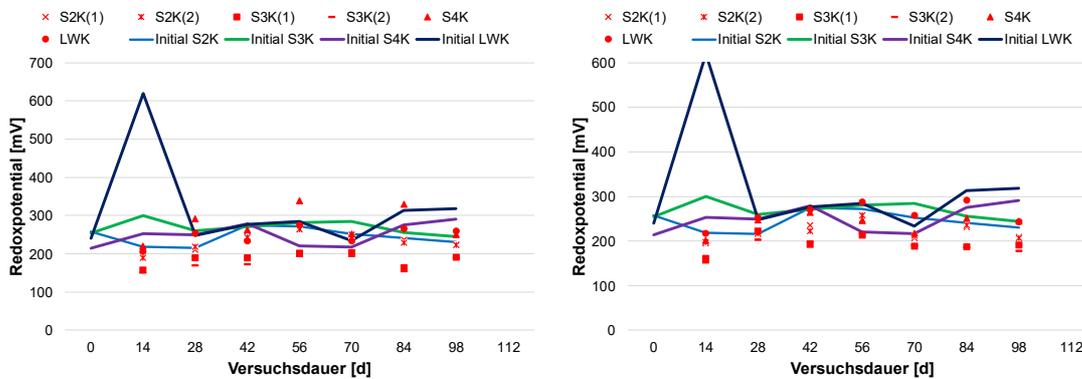


Abbildung 10-101: Entwicklung des Redoxpotentials der Reaktionswässer im Versuch 4 bei ca. 8 °C (links Verfüllbaustoff M3, rechts M4)

10.7.5. Elektrische Leitfähigkeit der Reaktionswässer

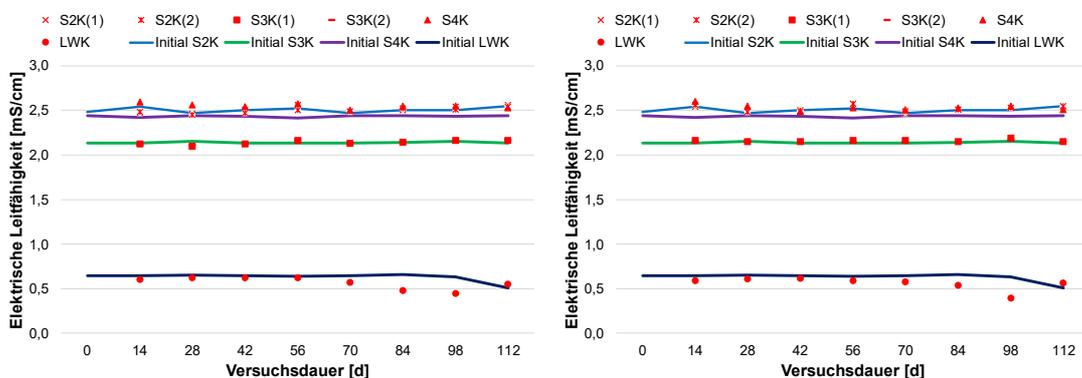


Abbildung 10-102: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit der Reaktionswässer im Versuch 1 bei Raumtemperatur (links Verfüllbaustoff 07d, rechts 13+d)

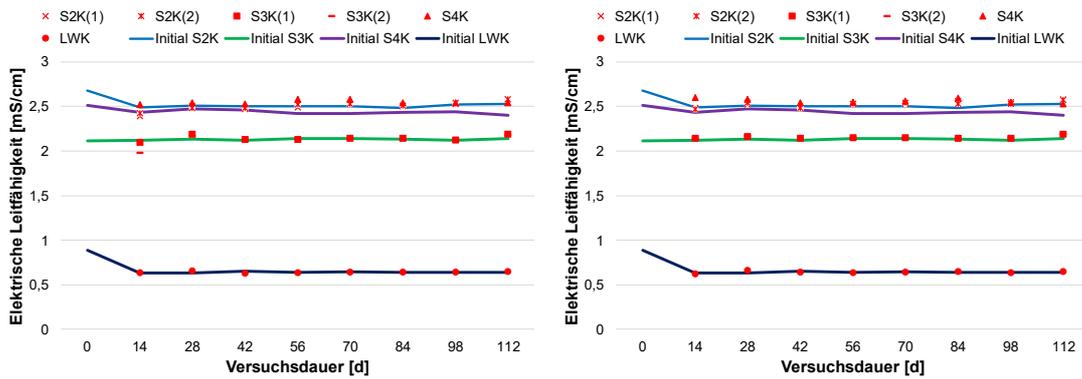


Abbildung 10-103: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit der Reaktionswässer im Versuch 2 bei ca. 8 °C (links Verfüllbaustoff 07d, rechts 13+d)

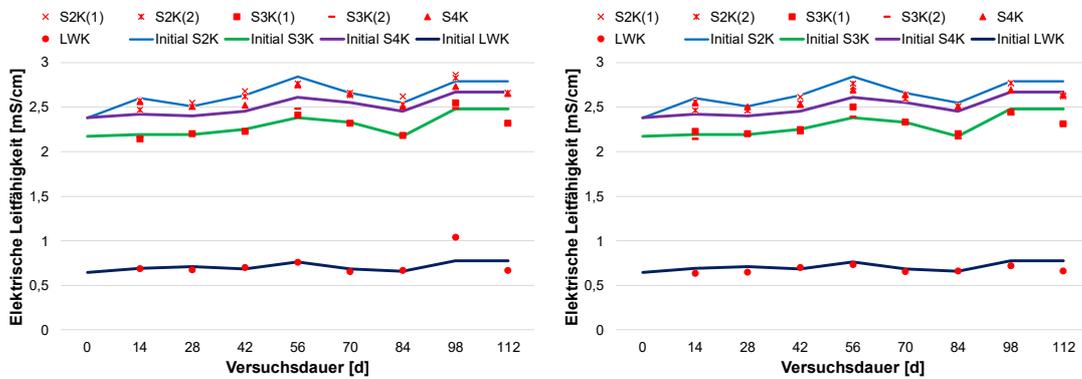


Abbildung 10-104: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit der Reaktionswässer im Versuch 3 bei Raumtemperatur (links Verfüllbaustoff M3, rechts M4)

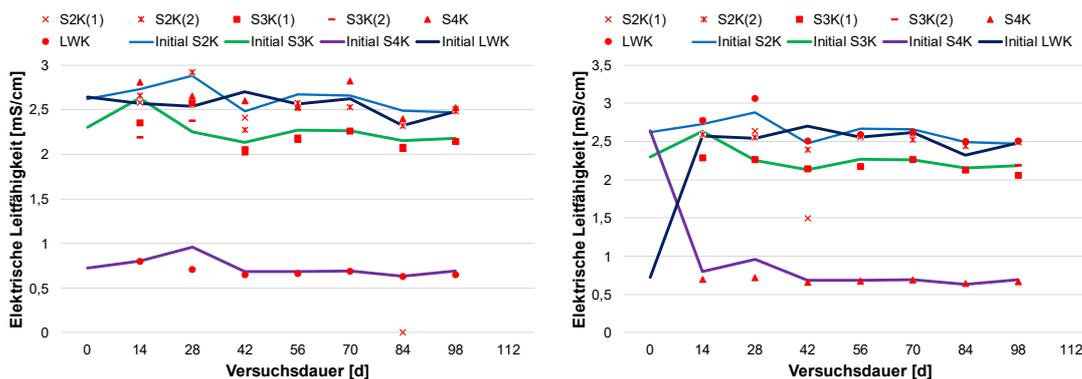


Abbildung 10-105: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit der Reaktionswässer im Versuch 4 bei ca. 8 °C (links Verfüllbaustoff M3, rechts M4)

10.7.6. Wasserchemismus im Eluat der Umströmungsversuche

10.7.6.1. Versuch 1

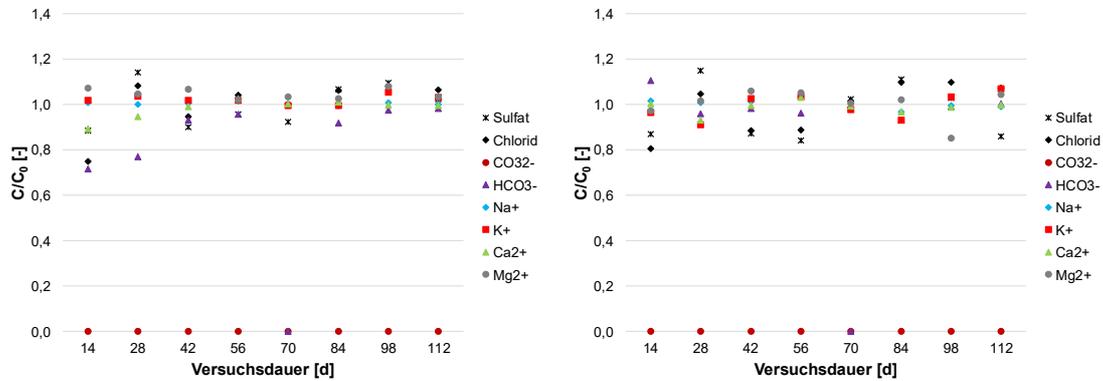


Abbildung 10-106: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 1 (links 07dot/650/S2K; rechts 13+dot/650/S2K)

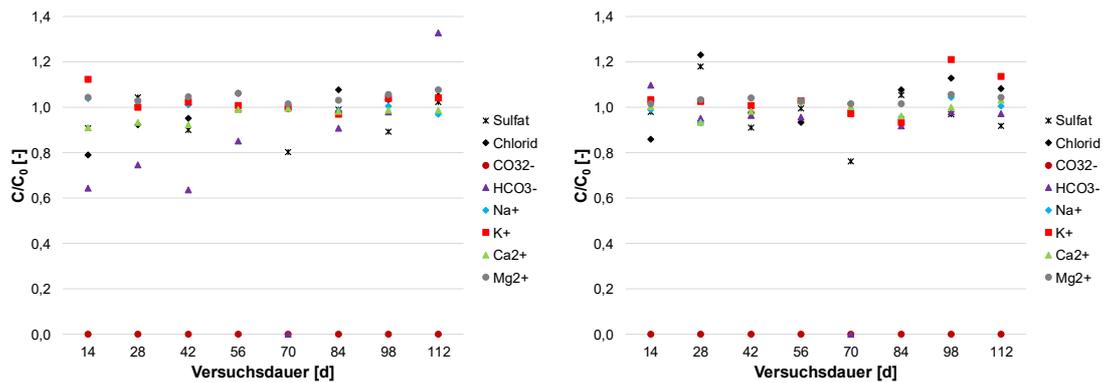


Abbildung 10-107: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 1 (links 07dot/2000/S2K; rechts 13+dot/2000/S2K)

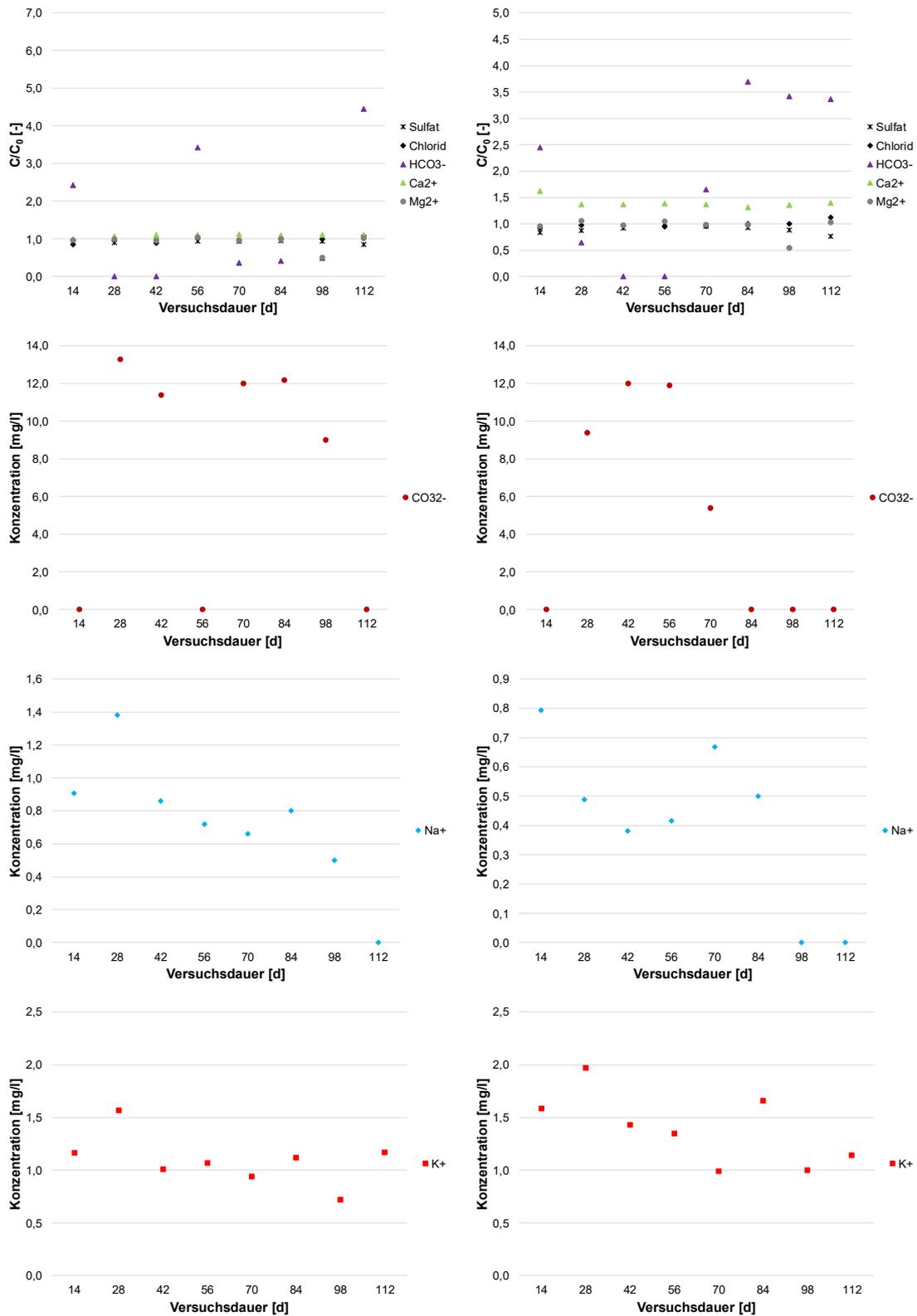


Abbildung 10-108: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 1; (links 07dot/650/S3K; rechts 13+dot/650/S3K)

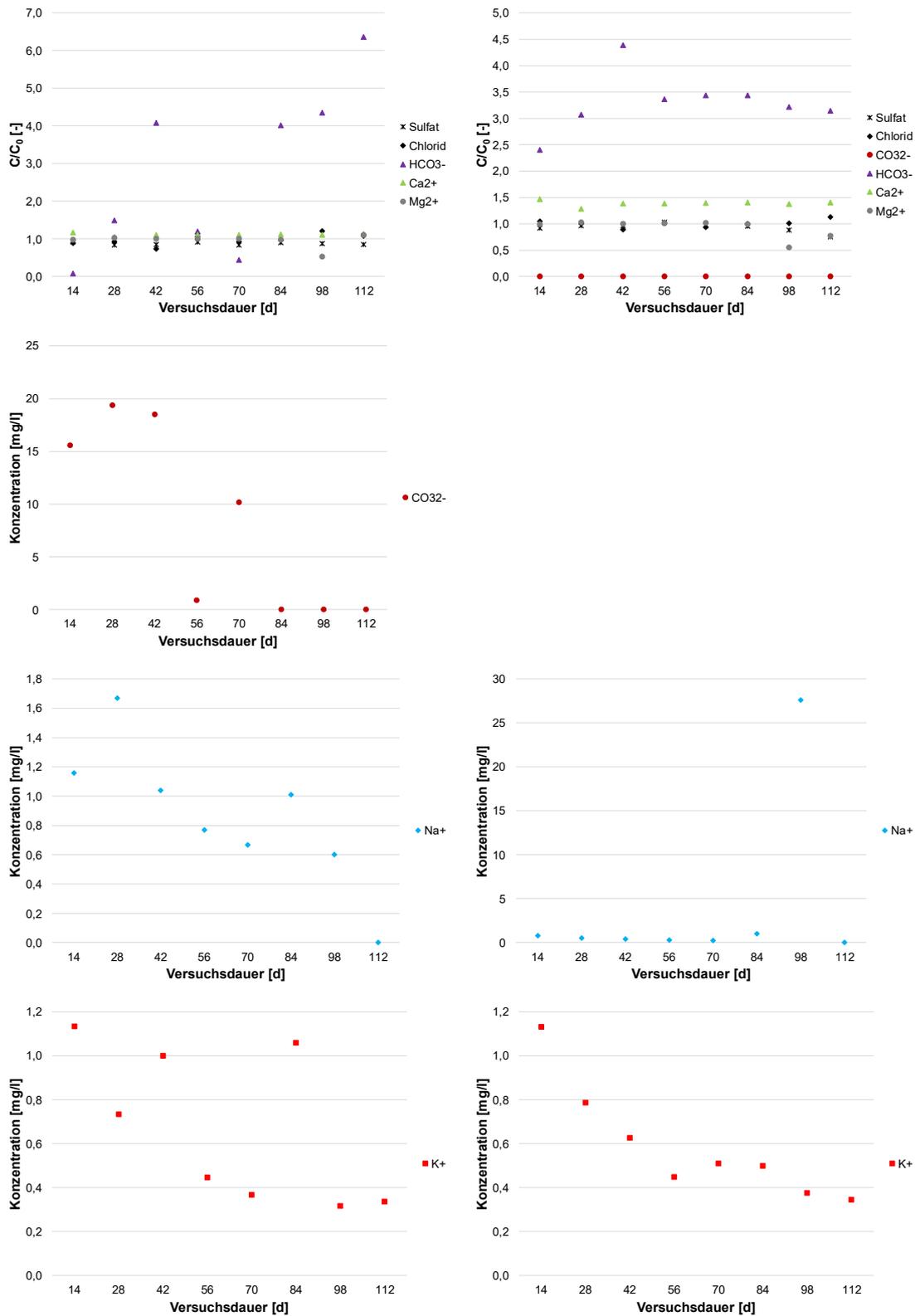


Abbildung 10-109: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 1 (links 07dot/2000/S3K; rechts 13+dot/2000/S3K)

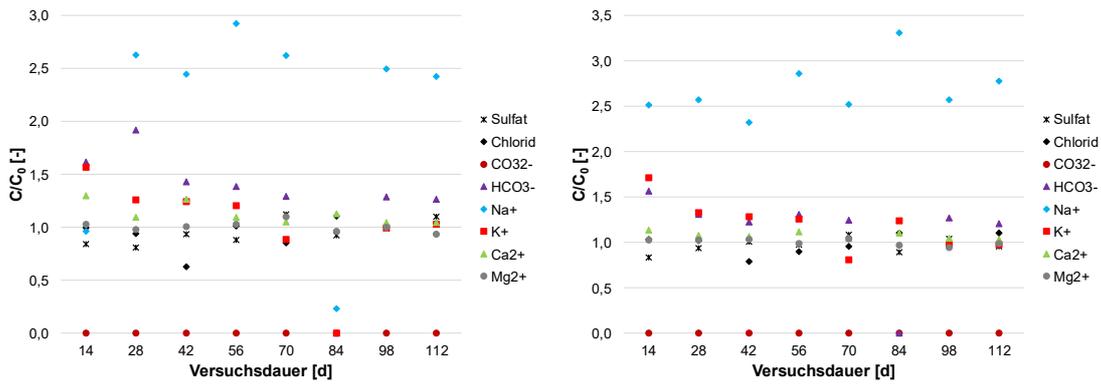


Abbildung 10-110: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 1 (links 07dot/2000/EK; rechts 13+dot/2000/EK)

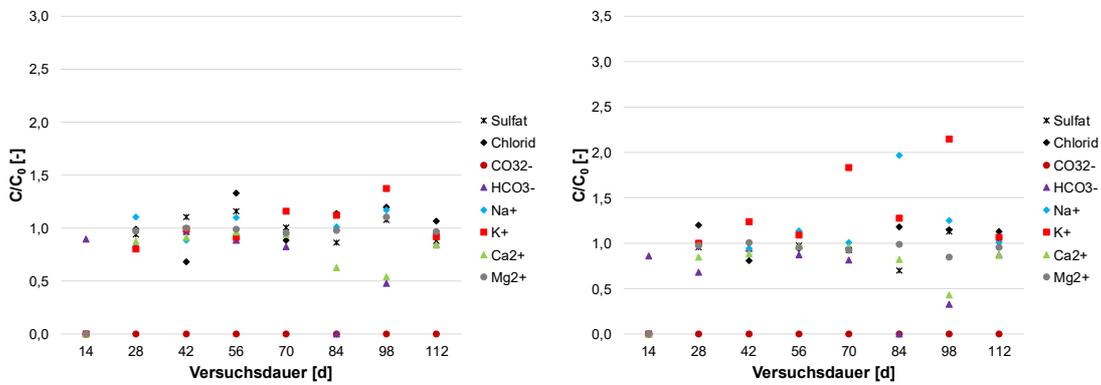


Abbildung 10-111: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 1 (links 07dot/2000/LWK; rechts 13+dot/2000/LWK)

10.7.6.2. Versuch 2

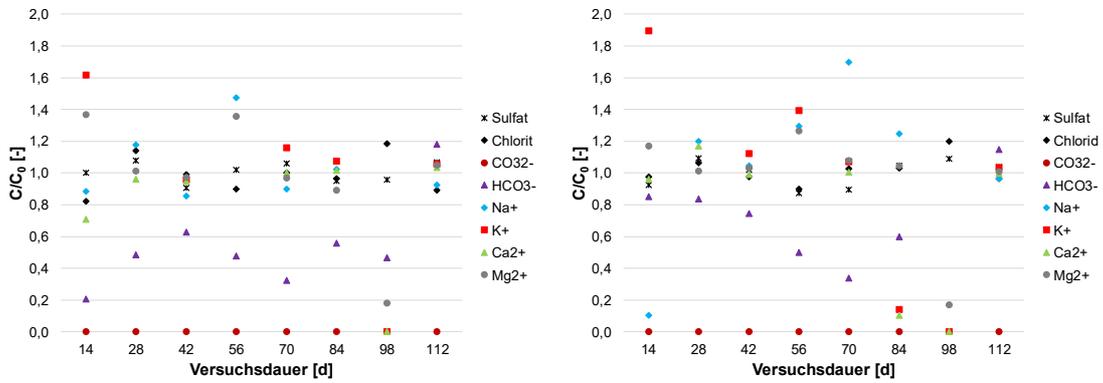


Abbildung 10-112: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 2 (links 07dot/650/S2K; rechts 13dot/650/S2K)

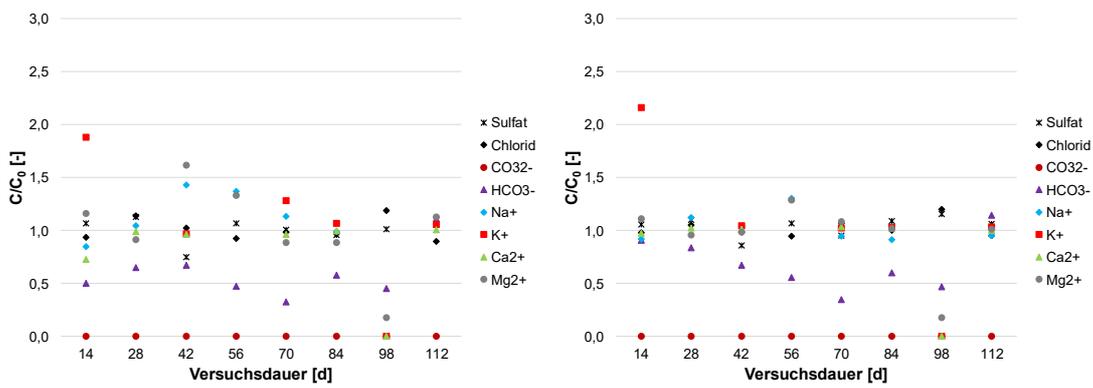


Abbildung 10-113: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 2 (links 07dot/2000/S2K; rechts 13dot/2000/S2K)

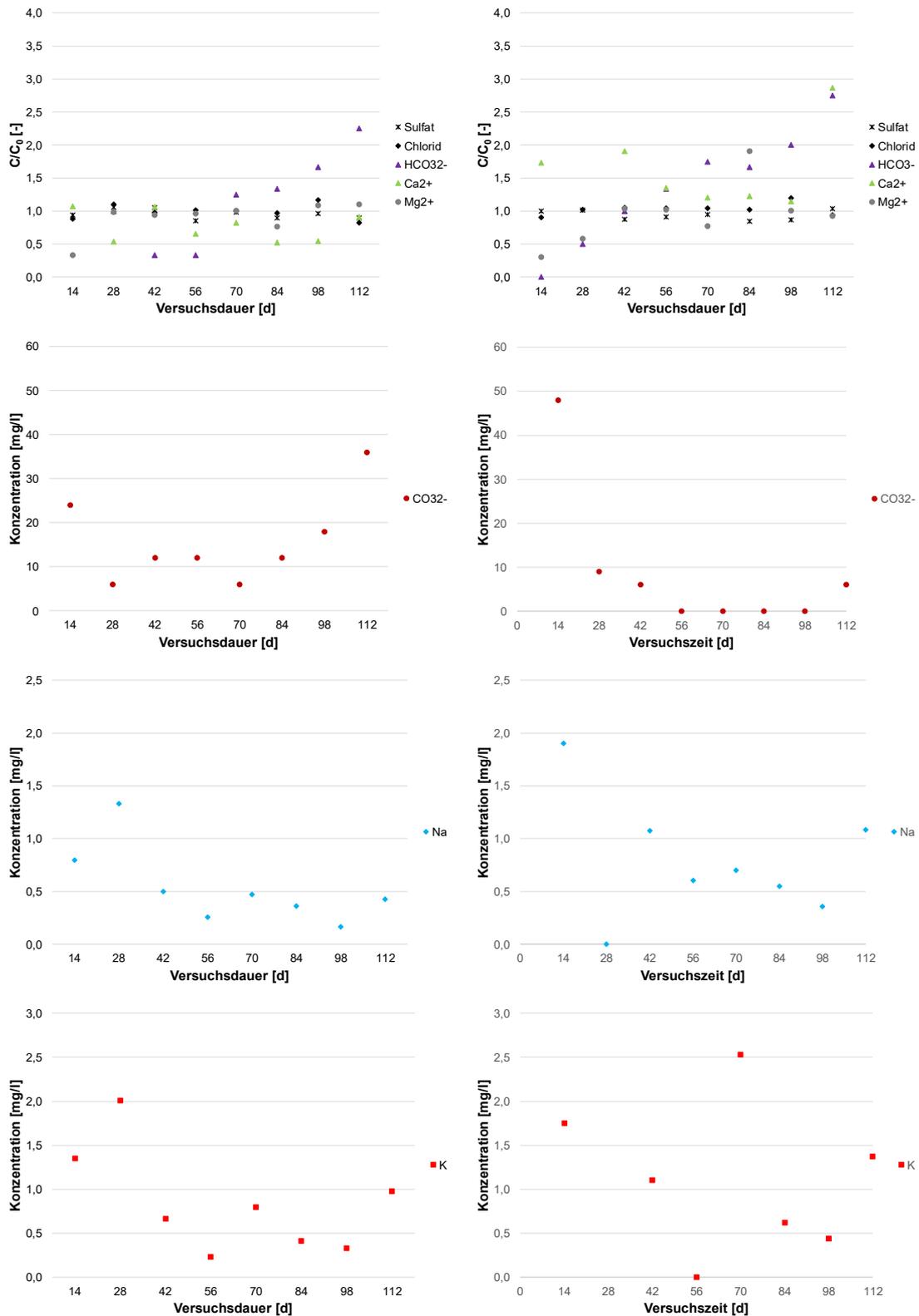


Abbildung 10-114: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 2 (links 07dot/650/S3K; rechts 13+dot/650/S3K)

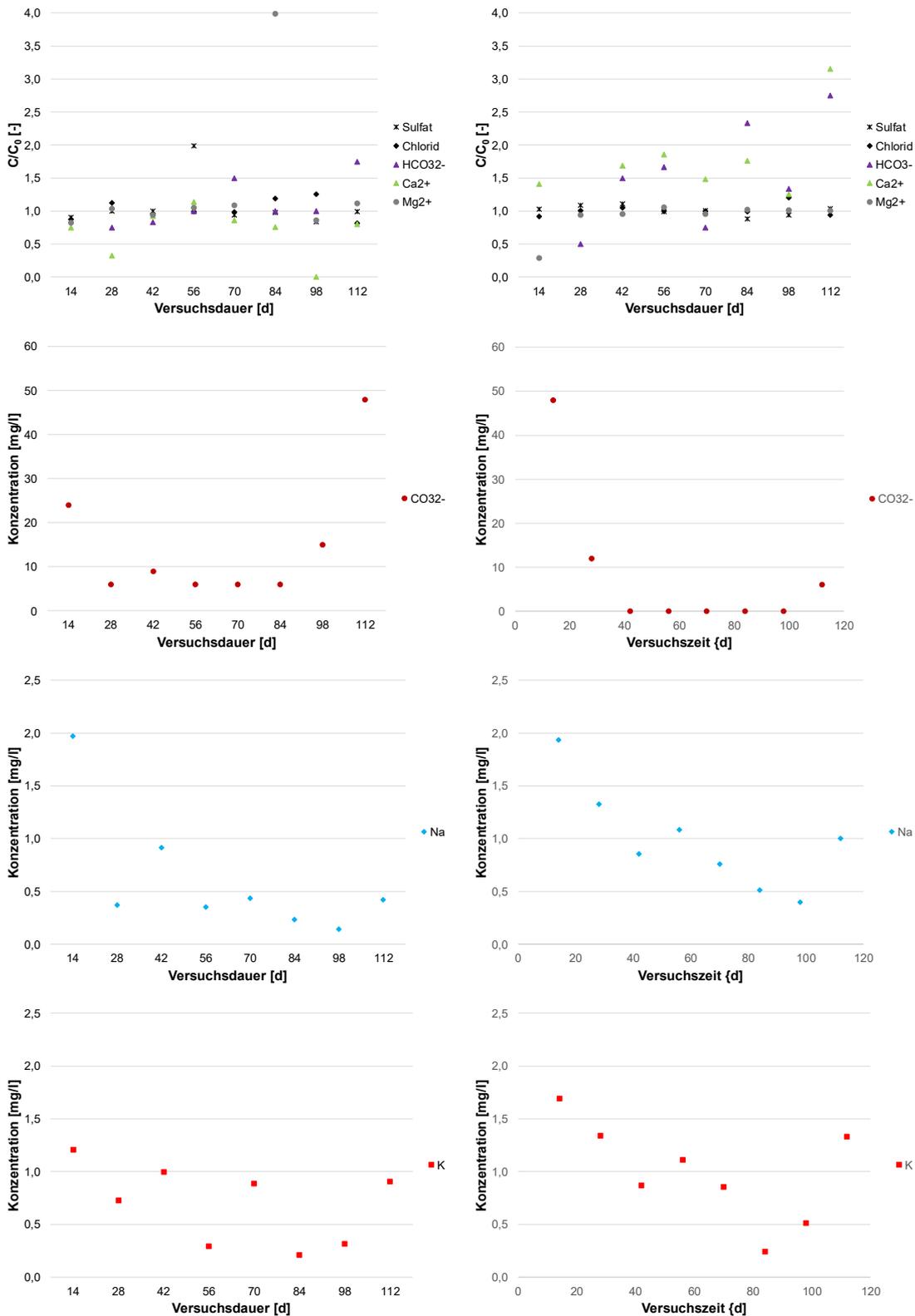


Abbildung 10-115: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 2 (links 07dot/2000/S3K; rechts 13dot/2000/S3K)

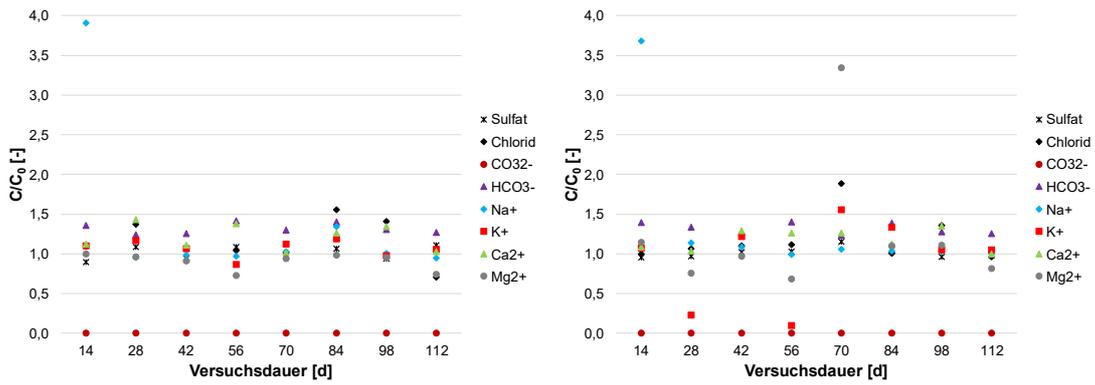


Abbildung 10-116: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 2 (links 07dot/2000/EK; rechts 13+dot/2000/EK)

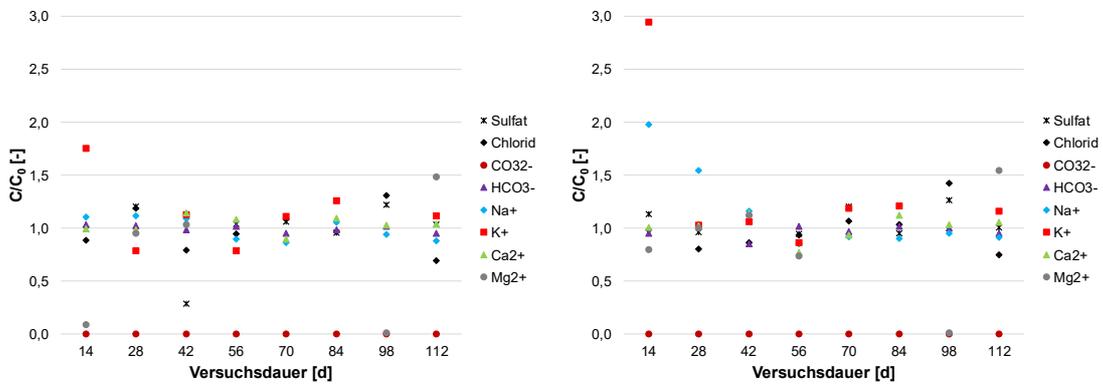


Abbildung 10-117: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 2 (links 07dot/2000/LWK; rechts 13+dot/2000/LWK)

10.7.6.3. Versuch 3

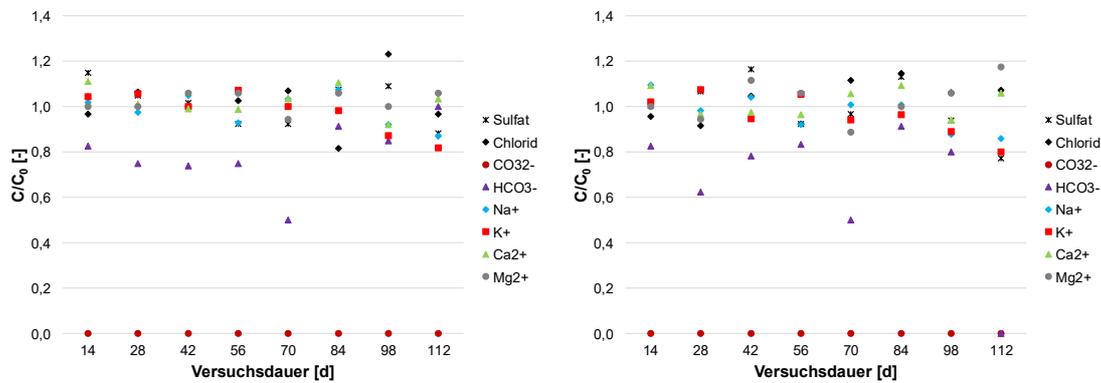


Abbildung 10-118: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 3 (links M3/650/S2K; rechts M4/650/S2K)

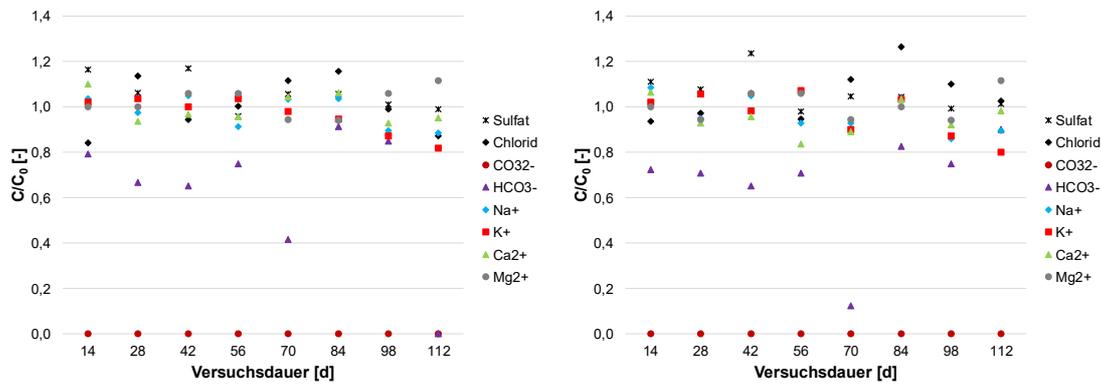


Abbildung 10-119: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 3 (links M3/2000/S2K; rechts M4/2000/S2K)

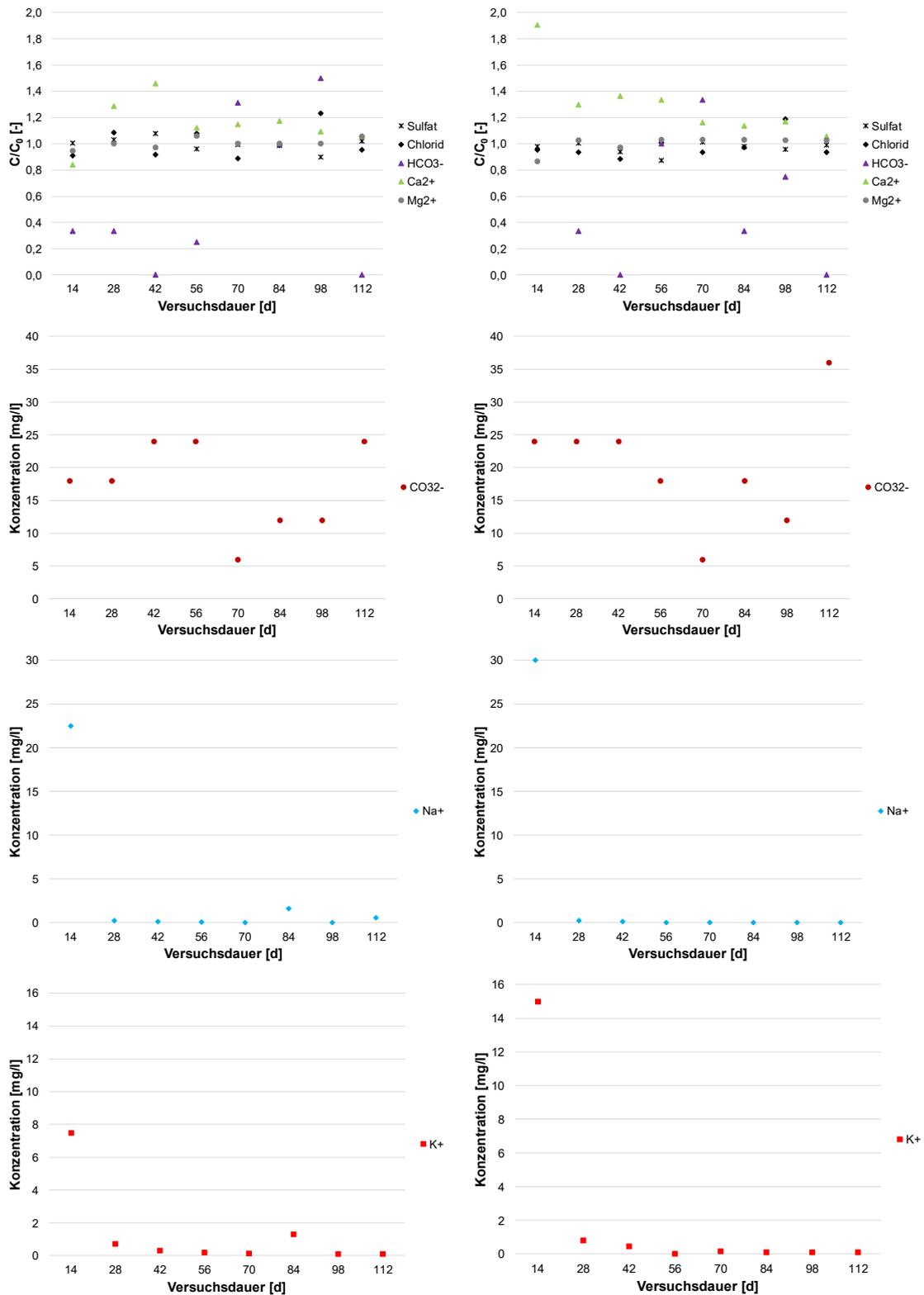


Abbildung 10-120: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 3 (links M3/650/S3K; rechts M4/650/S3K)

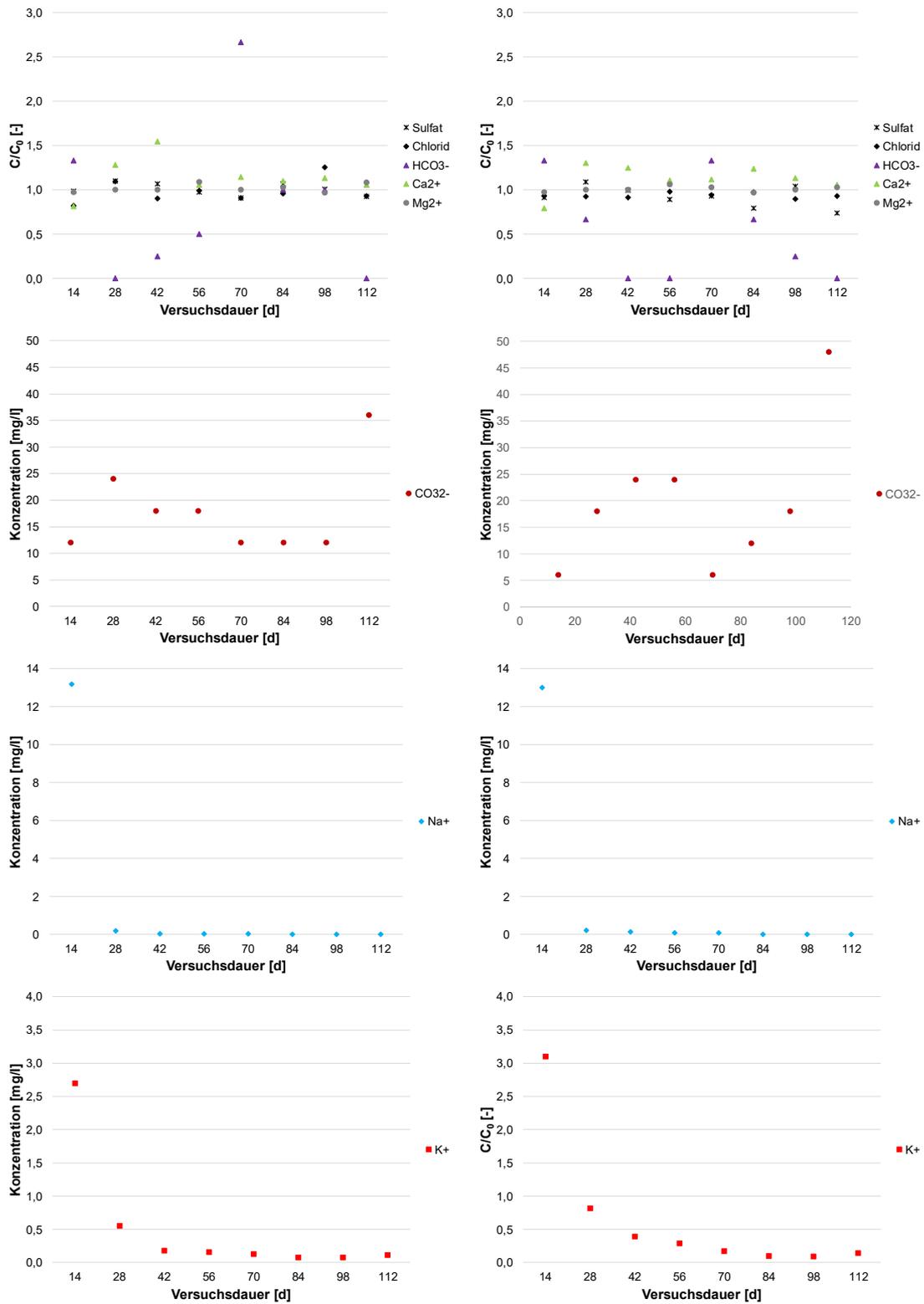


Abbildung 10-121: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 3 (links M3/2000/S3K; rechts M4/2000/S3K)

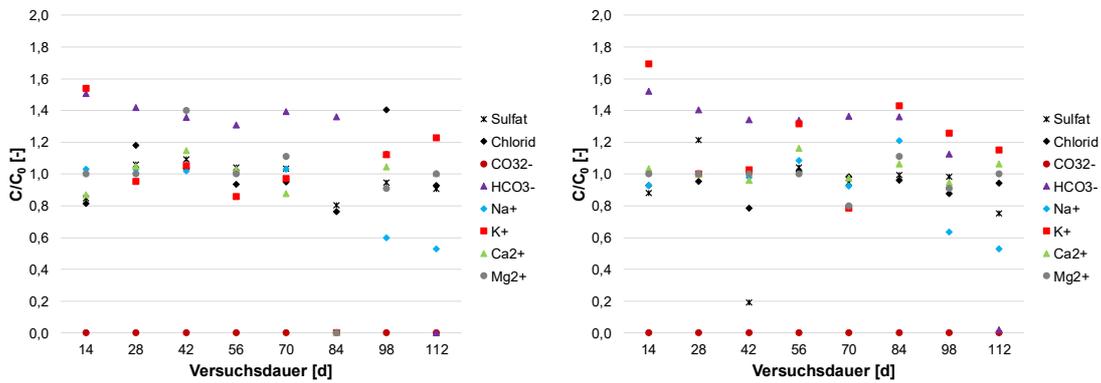


Abbildung 10-122: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 3 (links M3/2000/EK; rechts M4/2000/EK)

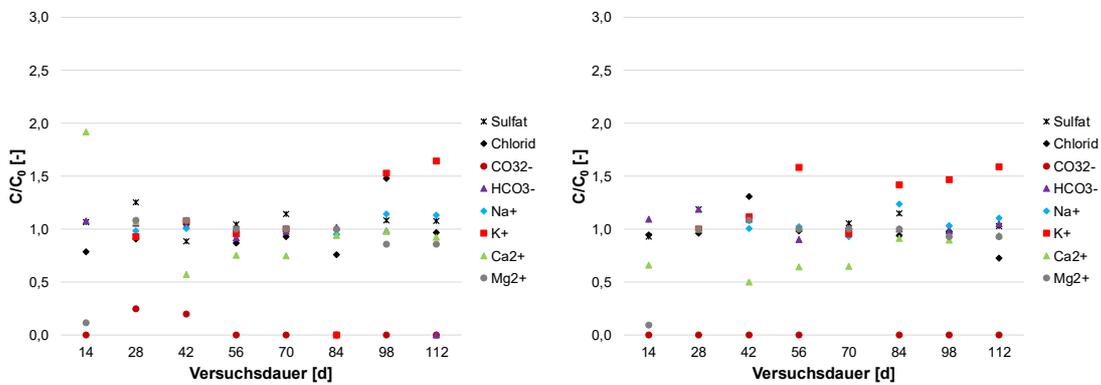


Abbildung 10-123: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 3 (links M3/2000/LWK; rechts M4/2000/LWK)

10.7.6.4. Versuch 4

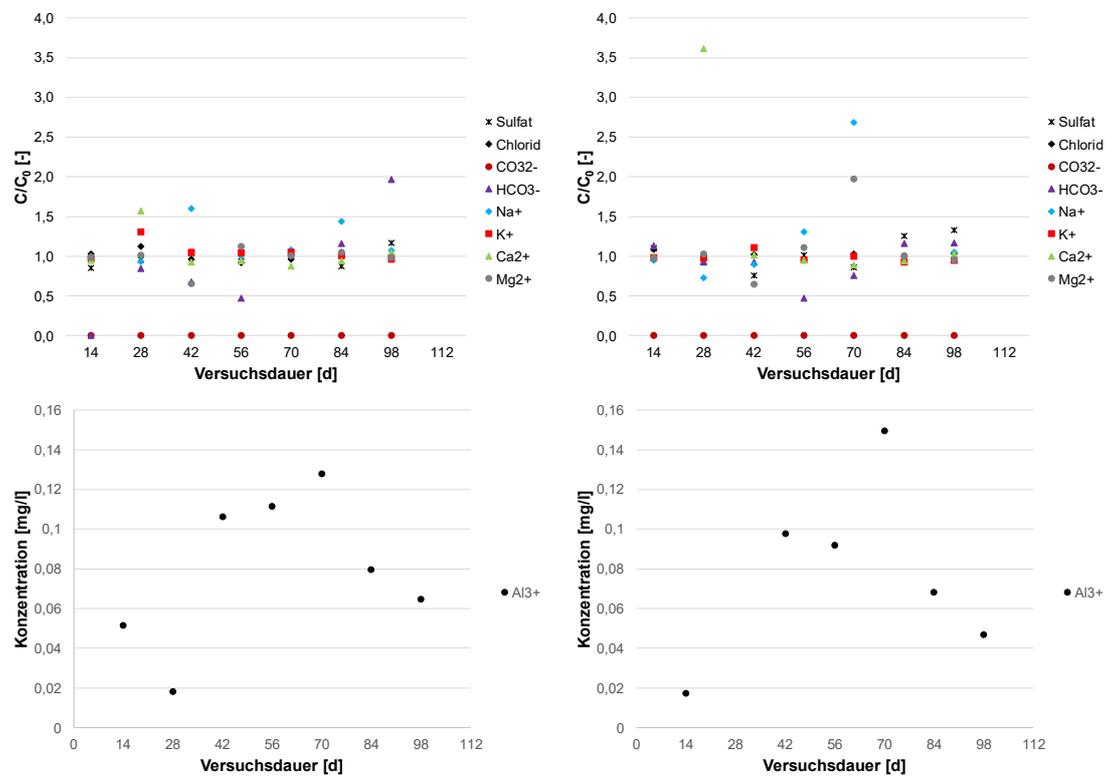


Abbildung 10-124: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 4 (links M3/650/S2K; rechts M4/650/S2K)

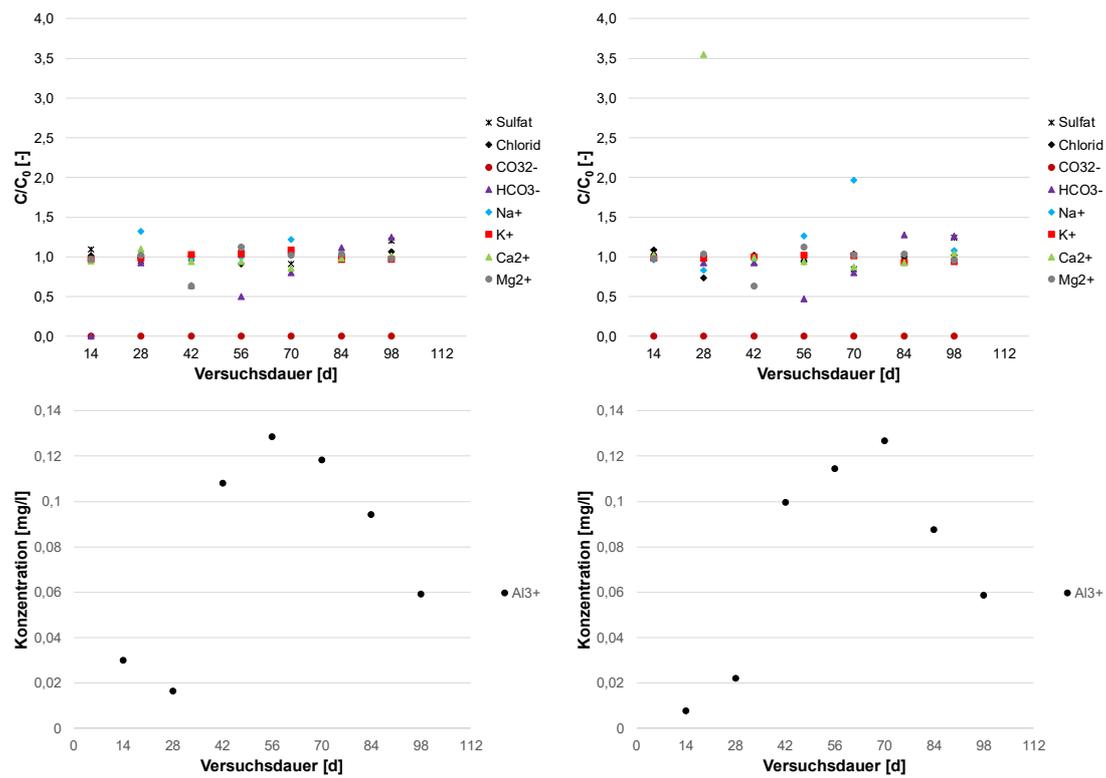
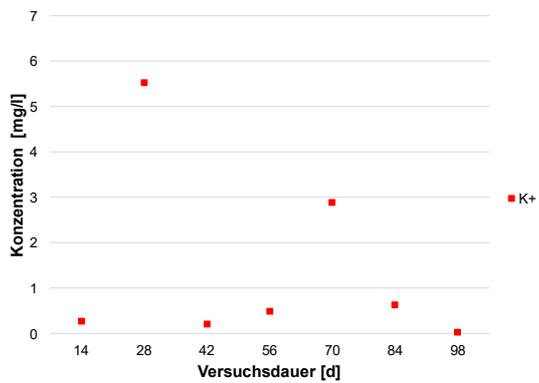
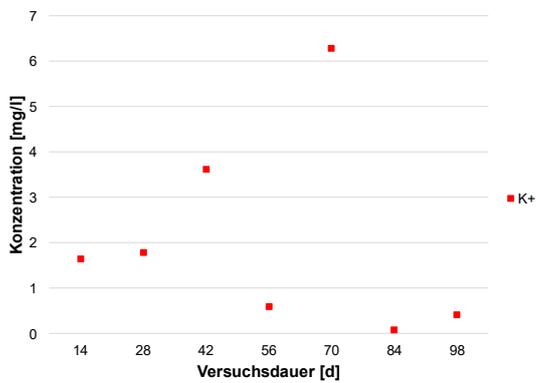
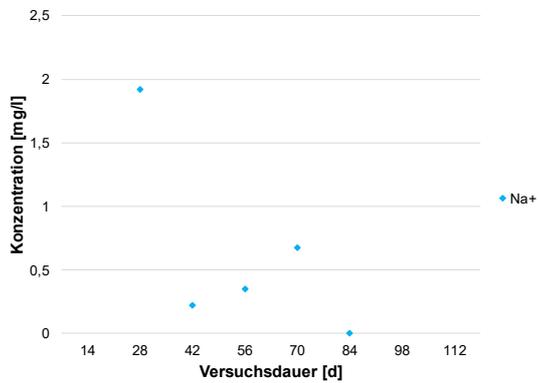
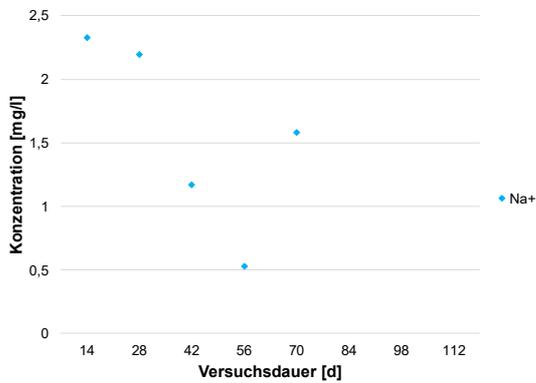
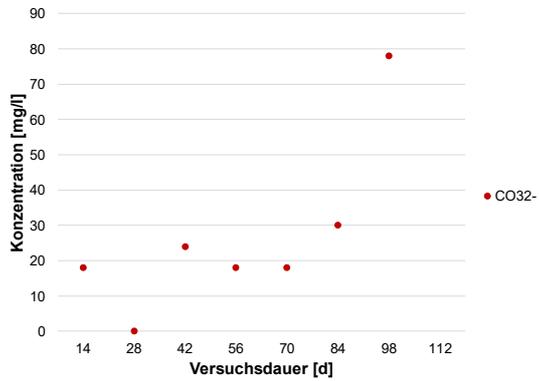
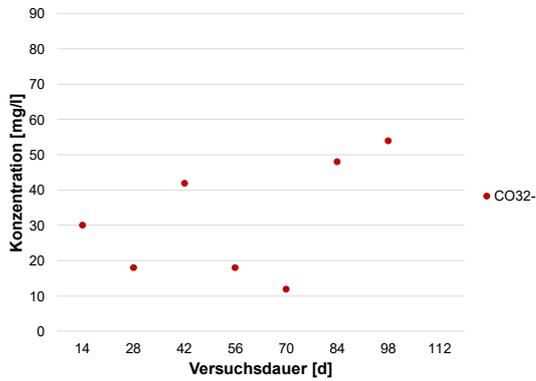
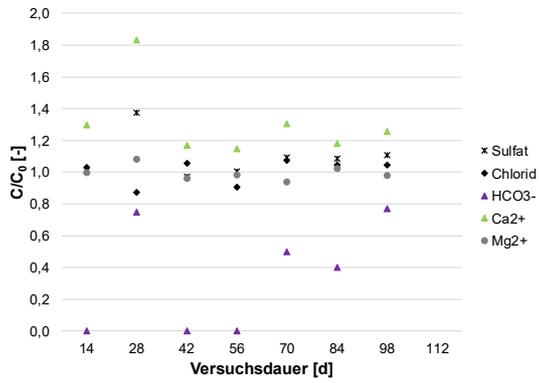
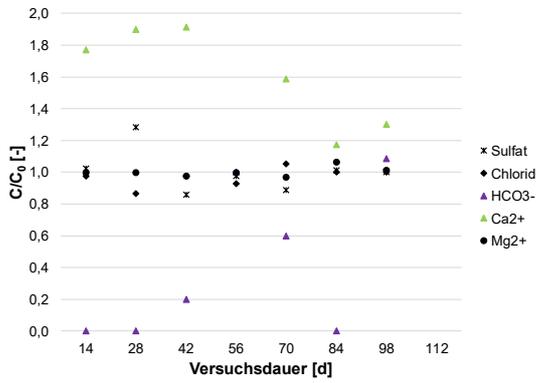


Abbildung 10-125: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 4 (links M3/2000/S2K; rechts M4/2000/S2K)



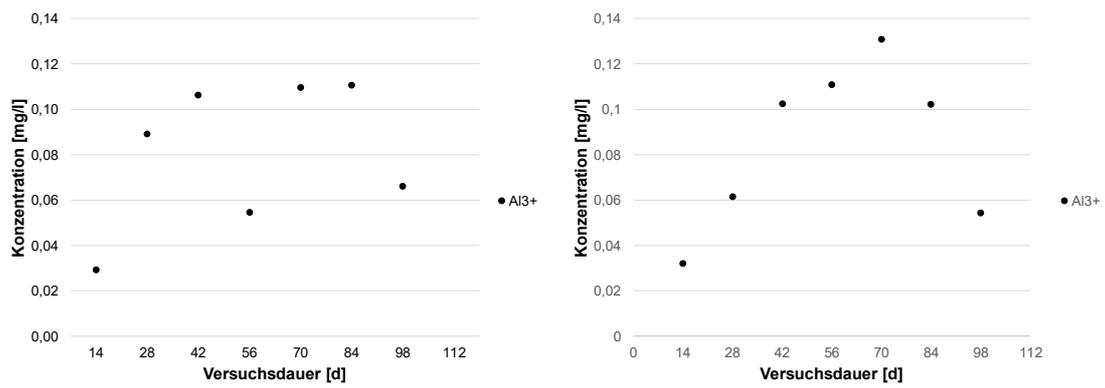
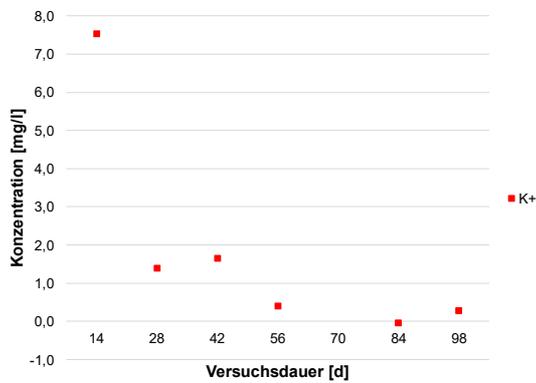
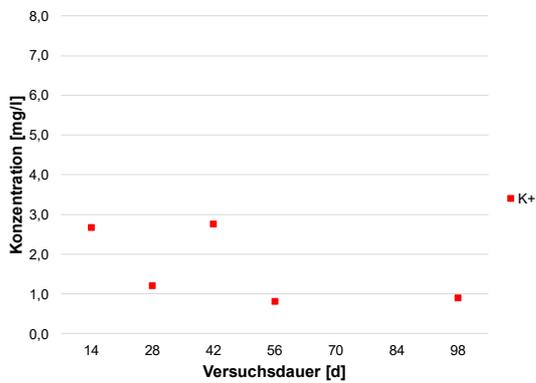
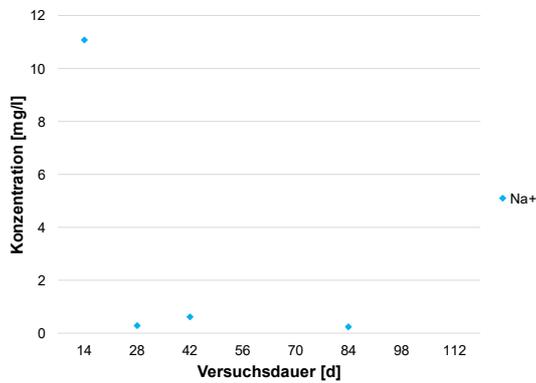
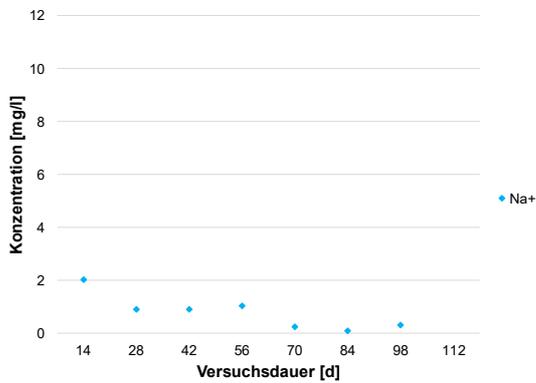
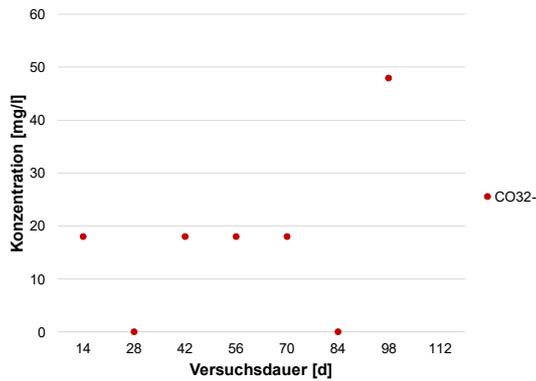
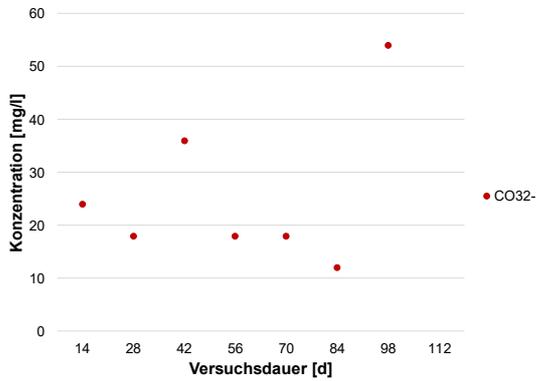
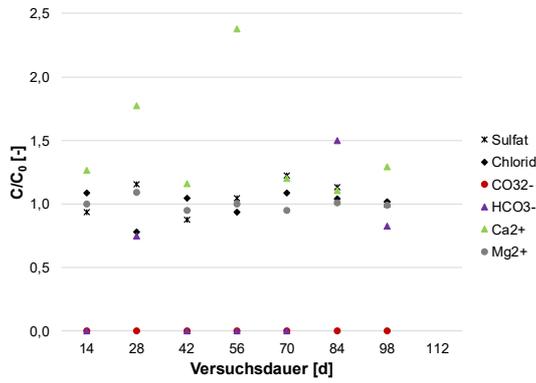
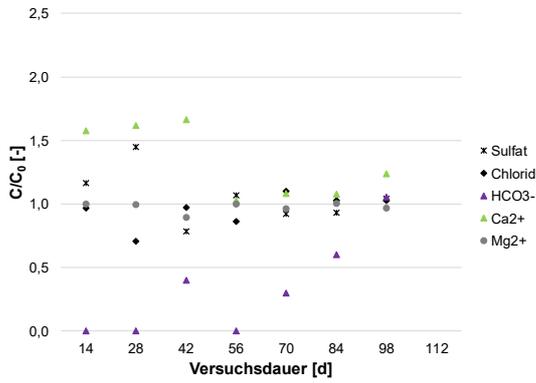


Abbildung 10-126: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 4(links M3/650/S3K; rechts M4/650/S3K)



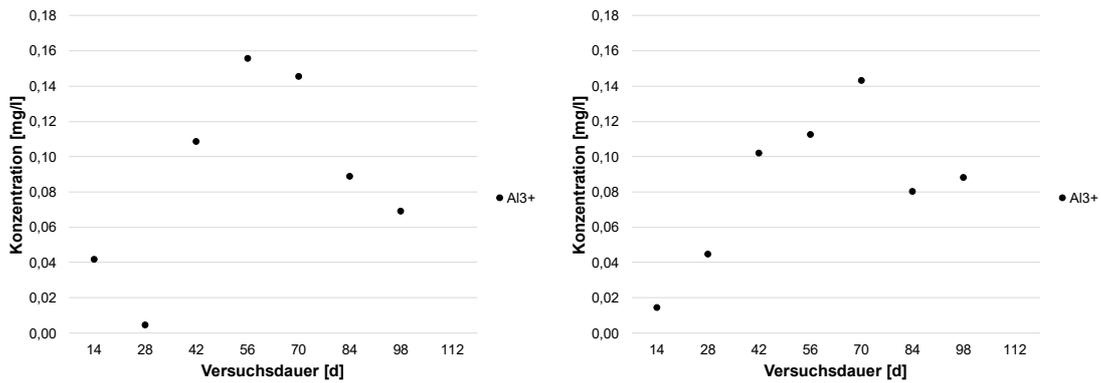


Abbildung 10-127: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 4 (links M3/2000/S3K; rechts M4/2000/S3K)

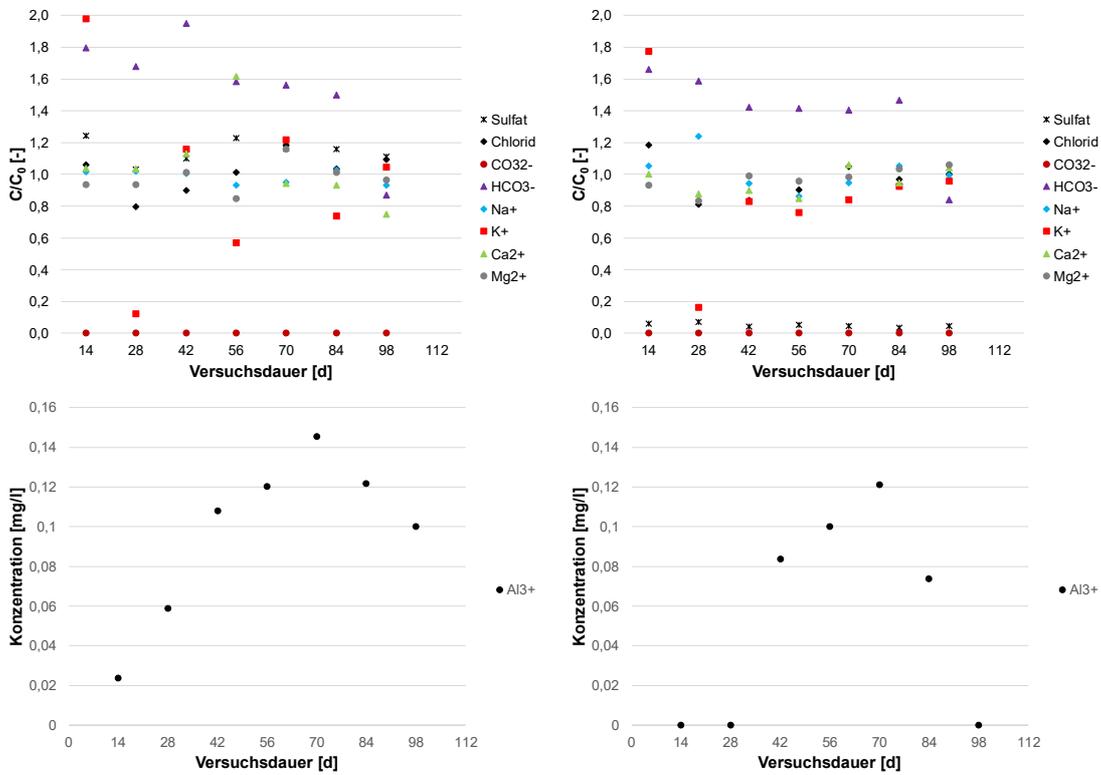


Abbildung 10-128: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 4 (links M3/2000/EK; rechts M4/2000/EK)

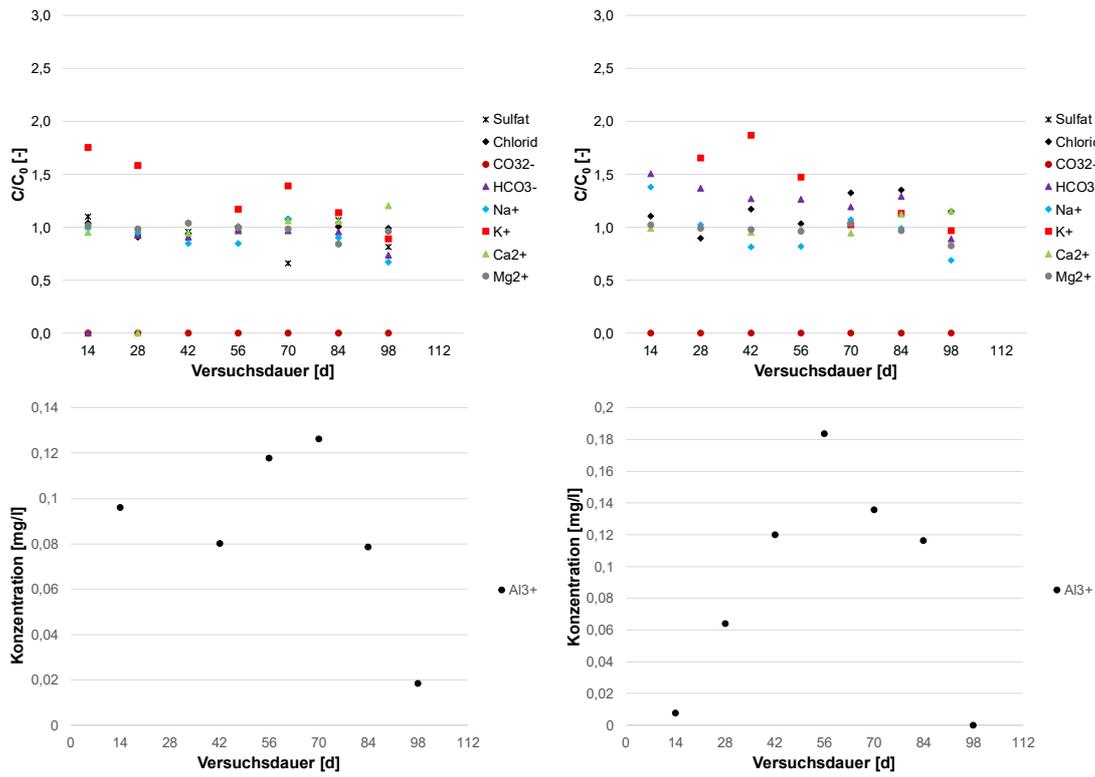


Abbildung 10-129: Entwicklung der Ionenkonzentration in der Reaktionslösung des Versuchs 4 (links M3/2000/LWK; rechts M4/2000/LWK)

10.7.7. Mineralogie bei Versuchsprismen aus den Umströmungsversuchen

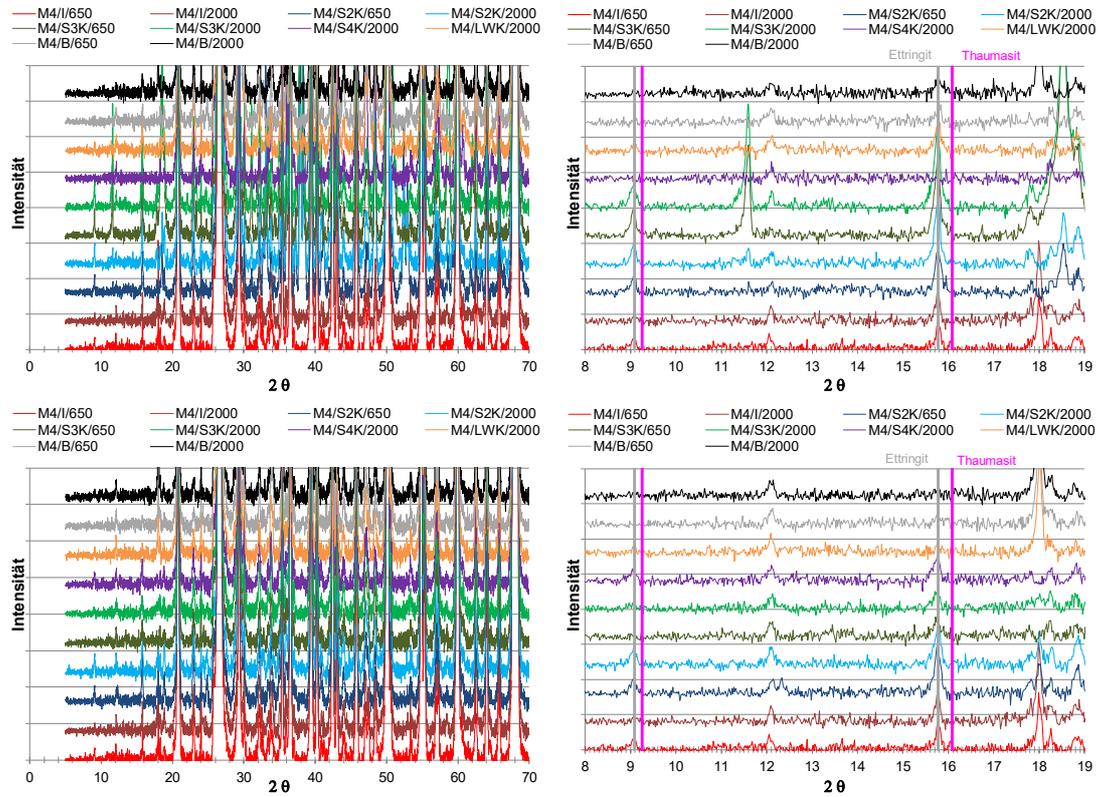


Abbildung 10-130: Mineralogische Zusammensetzung des Verfüllbaustoffs M4 im Versuch 3 bei Raumtemperatur, Probe von Außenfläche des Probenkörpers (oben) und Probe von Mitte des Probenkörpers (unten)

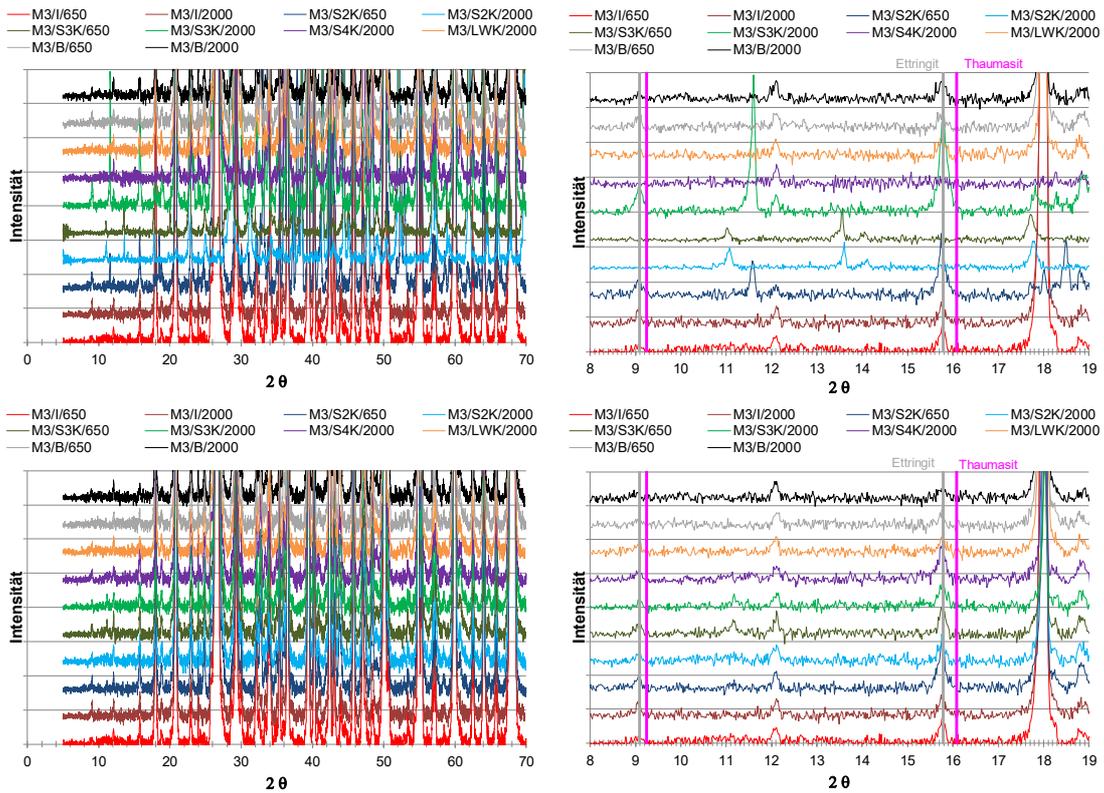


Abbildung 10-131: Mineralogische Zusammensetzung der Verfüllbaustoffe M3 im Versuch 4 bei ca. 8 °C, Probe von Außenfläche des Probenkörpers (oben) und Probe von Mitte des Probenkörpers (unten)

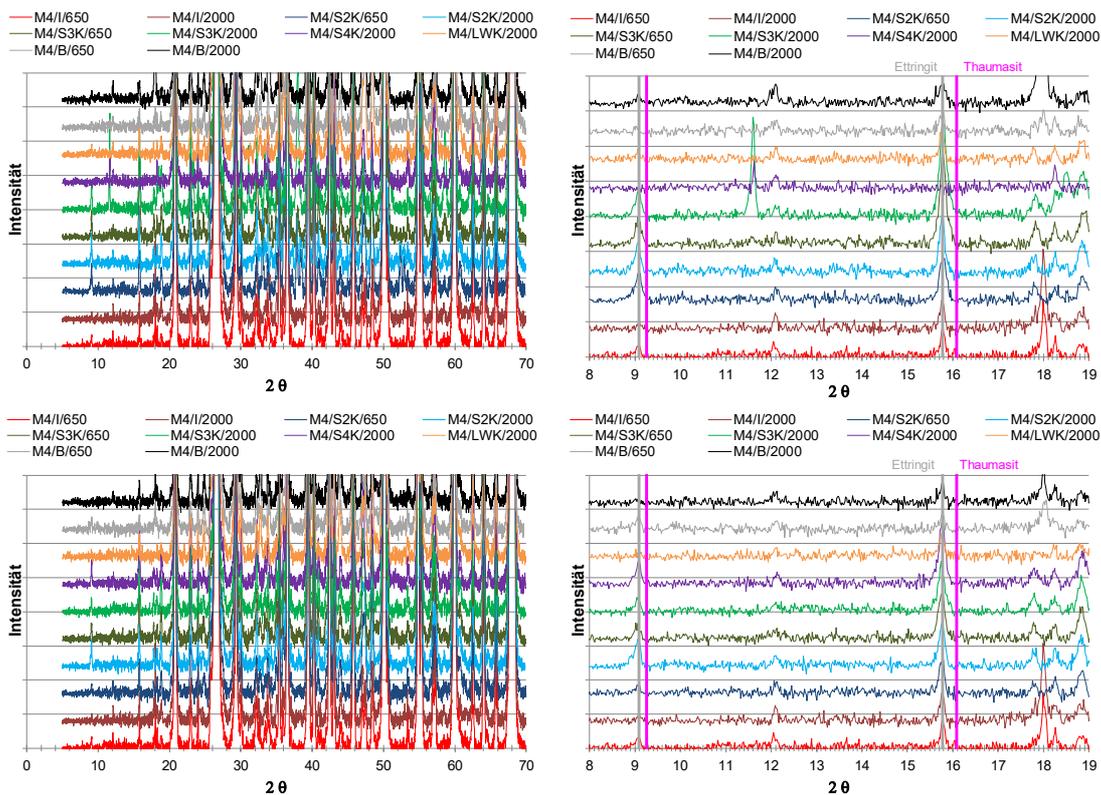


Abbildung 10-132: Mineralogische Zusammensetzung der Verfüllbaustoffe M4 im Versuch 4 bei ca. 8 °C, Probe von Außenfläche des Probenkörpers (oben) und Probe von Mitte des Probenkörpers (unten)

10.7.8. Porenöffnungsverteilung der Probekörper aus den Umströmungsversuchen

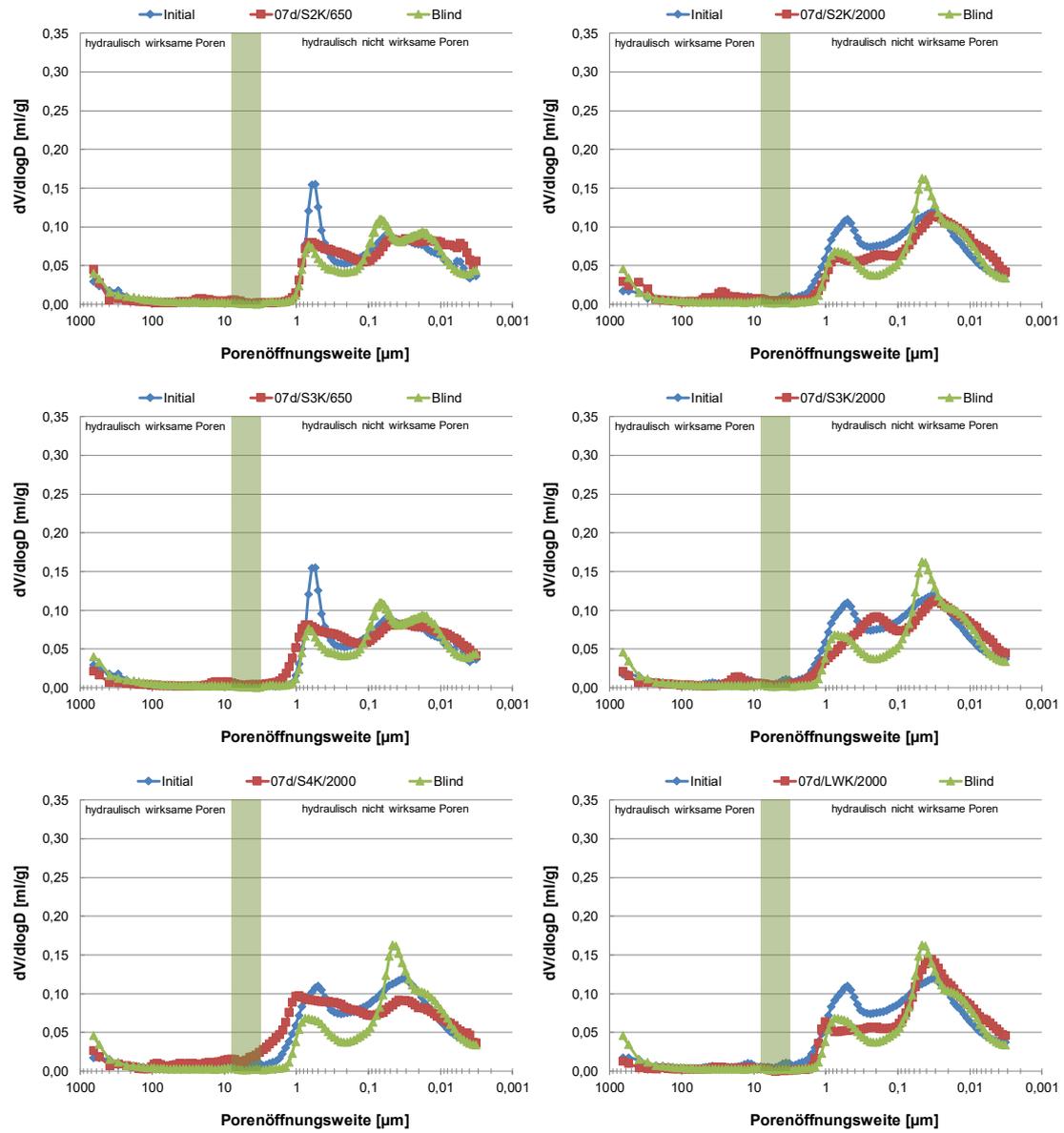


Abbildung 10-133: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs 07d bei ca. 8 °C

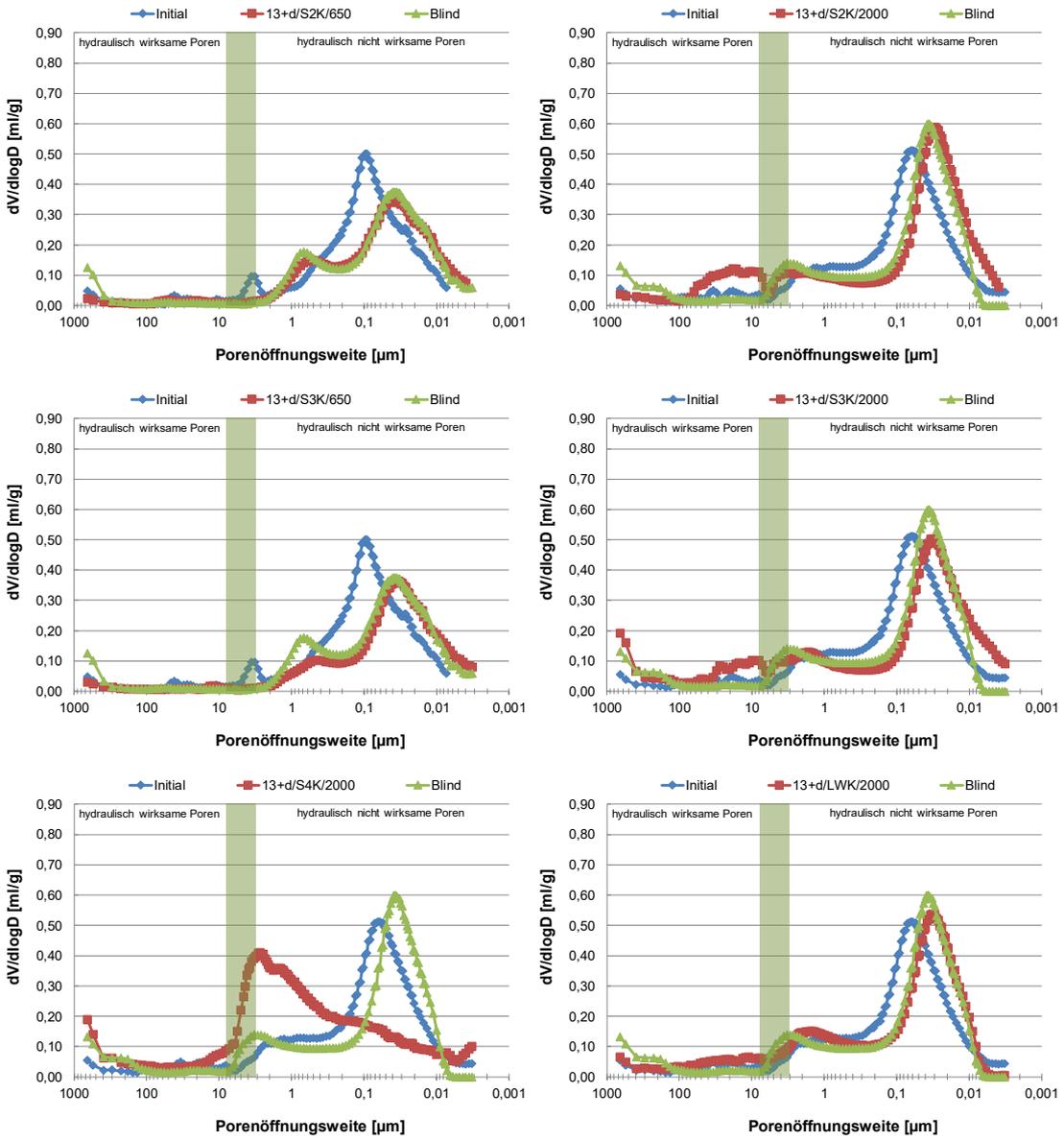


Abbildung 10-134: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs 13+d bei ca. 8 °C

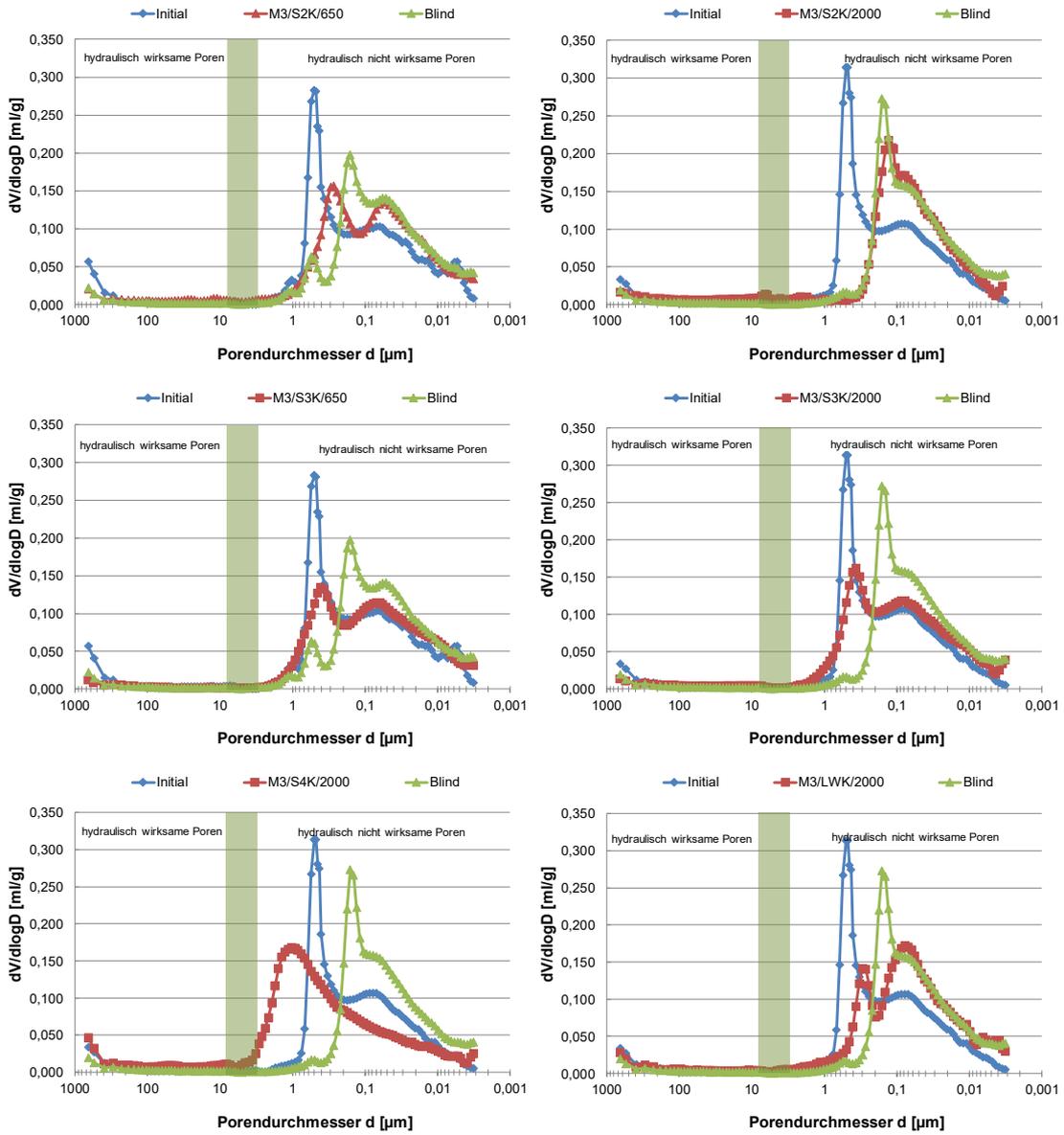


Abbildung 10-135: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs M3 bei Raumtemperatur

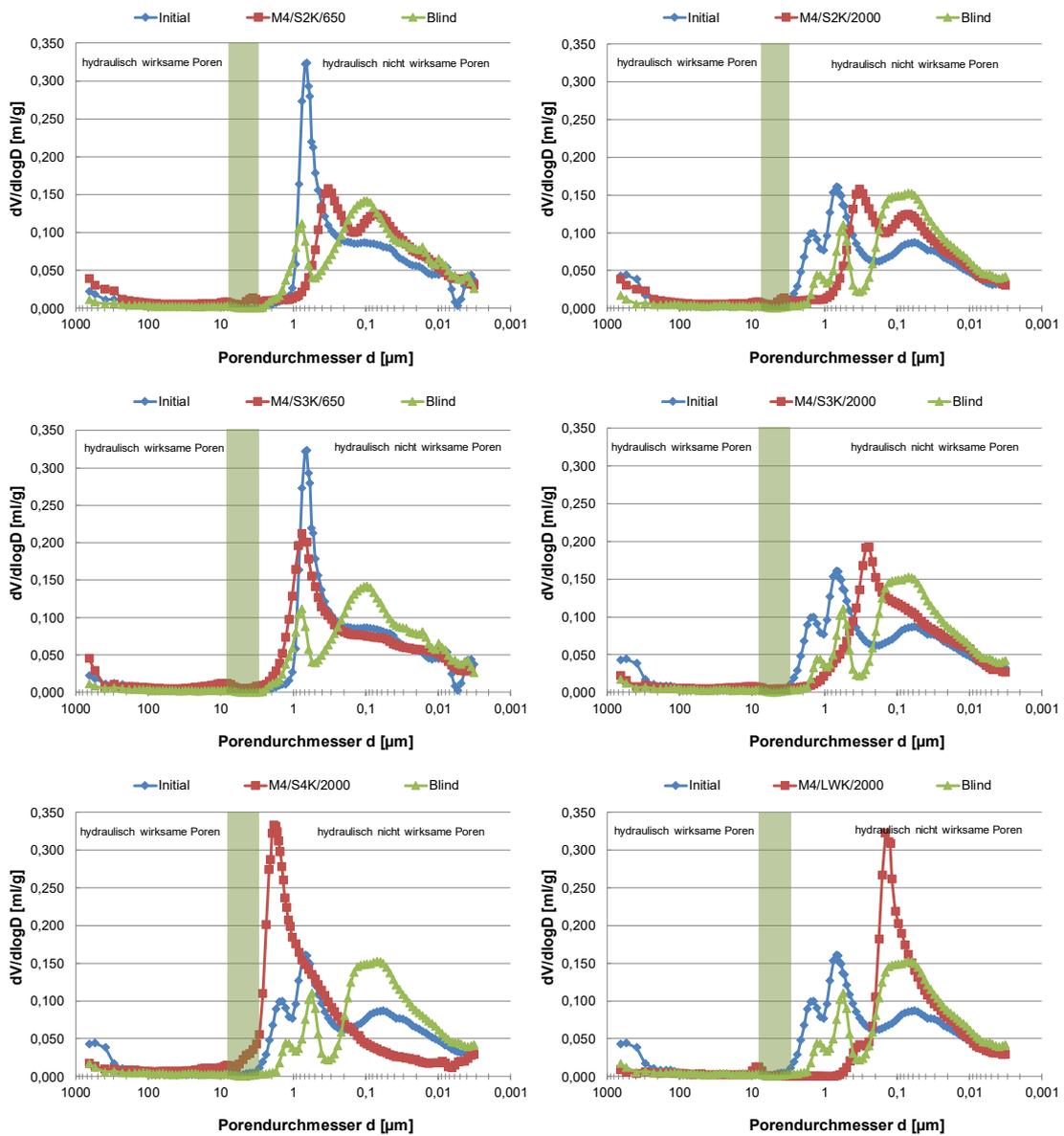


Abbildung 10-136: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs M4 bei Raumtemperatur

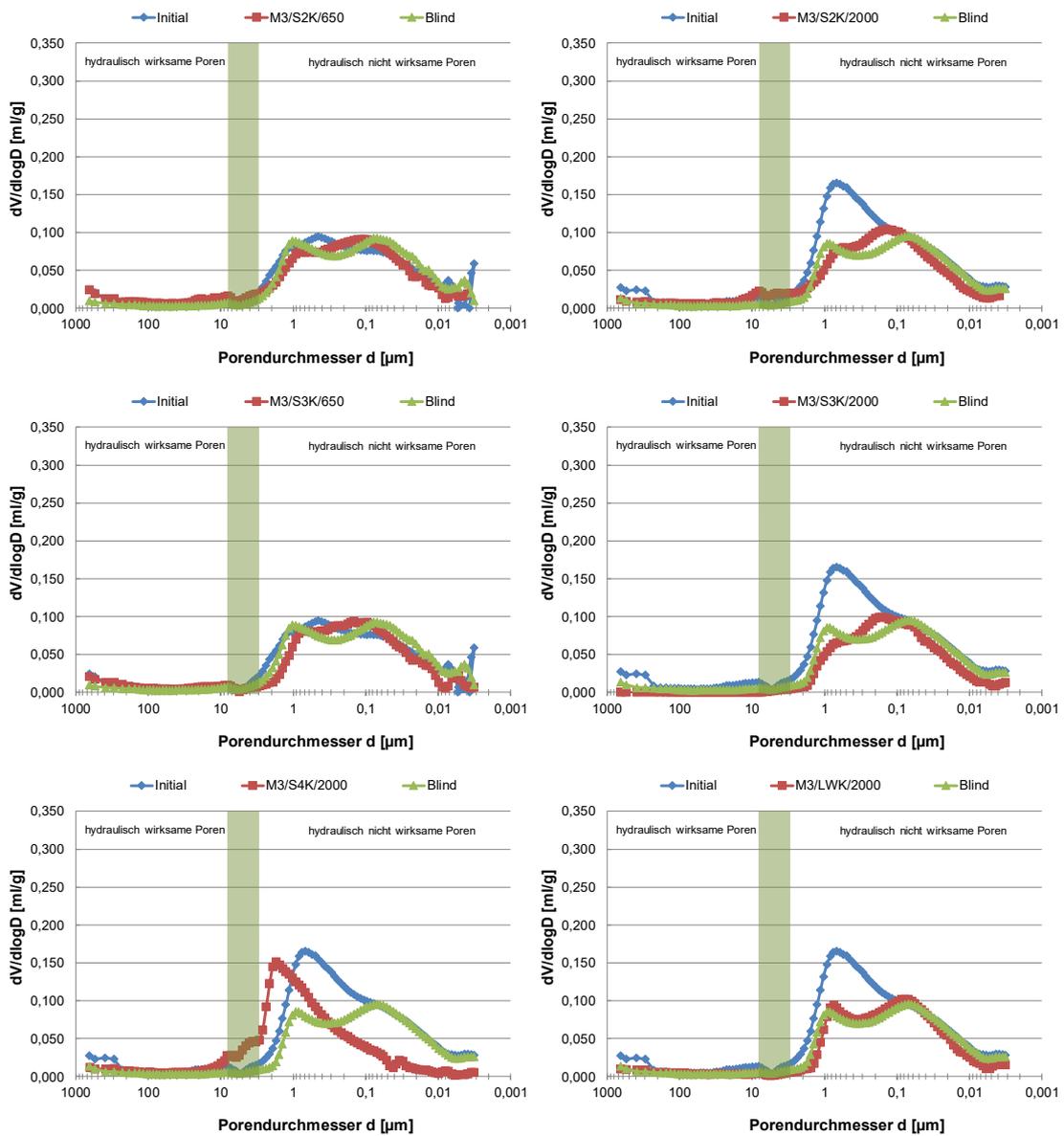


Abbildung 10-137: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs M3 bei ca. 8 °C

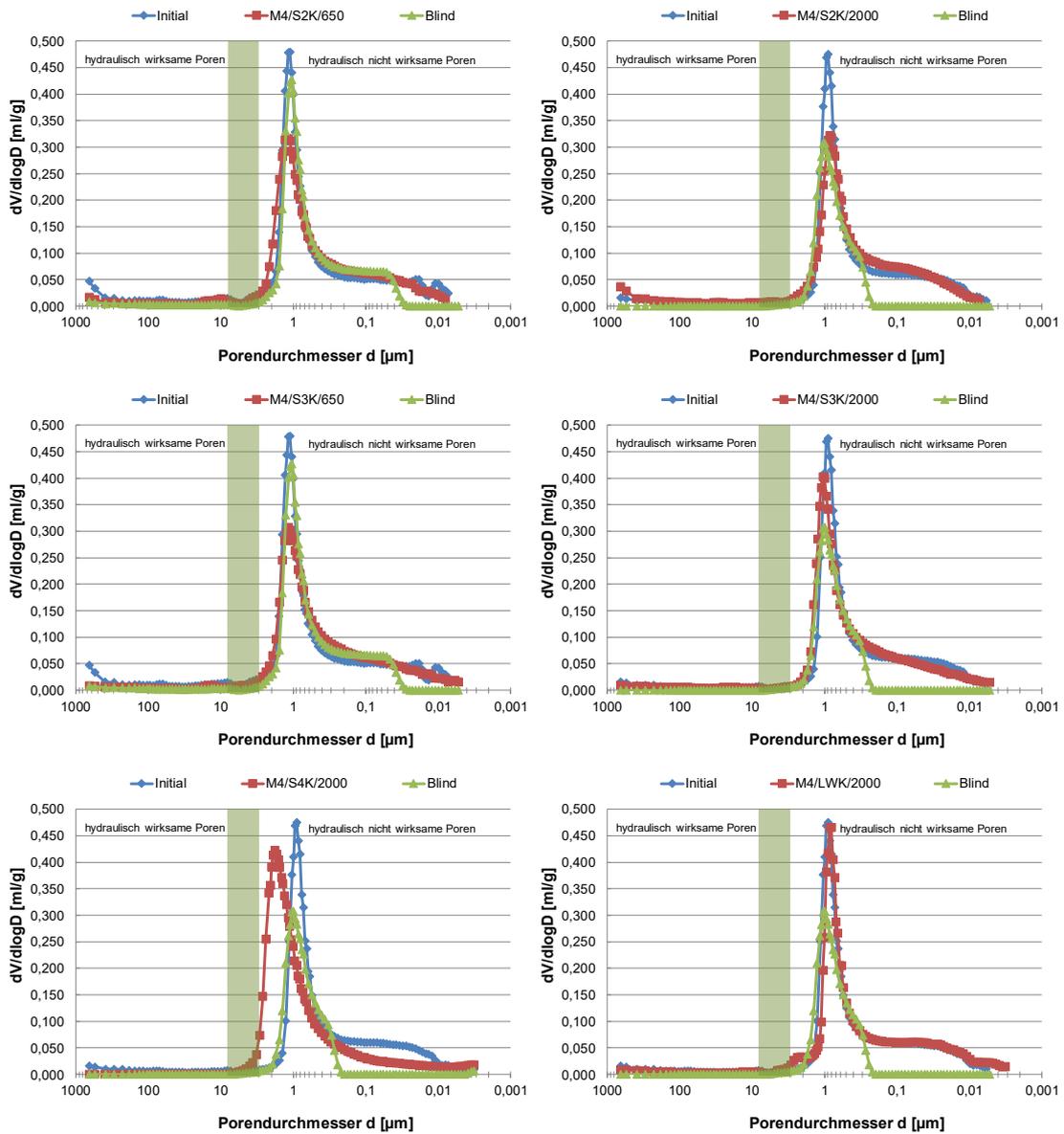


Abbildung 10-138: Porenöffnungsverteilung des Verfüllbaustoffs M4 bei ca. 8 °C

10.7.9. Relative Gewichtsveränderung der Versuchsprismen

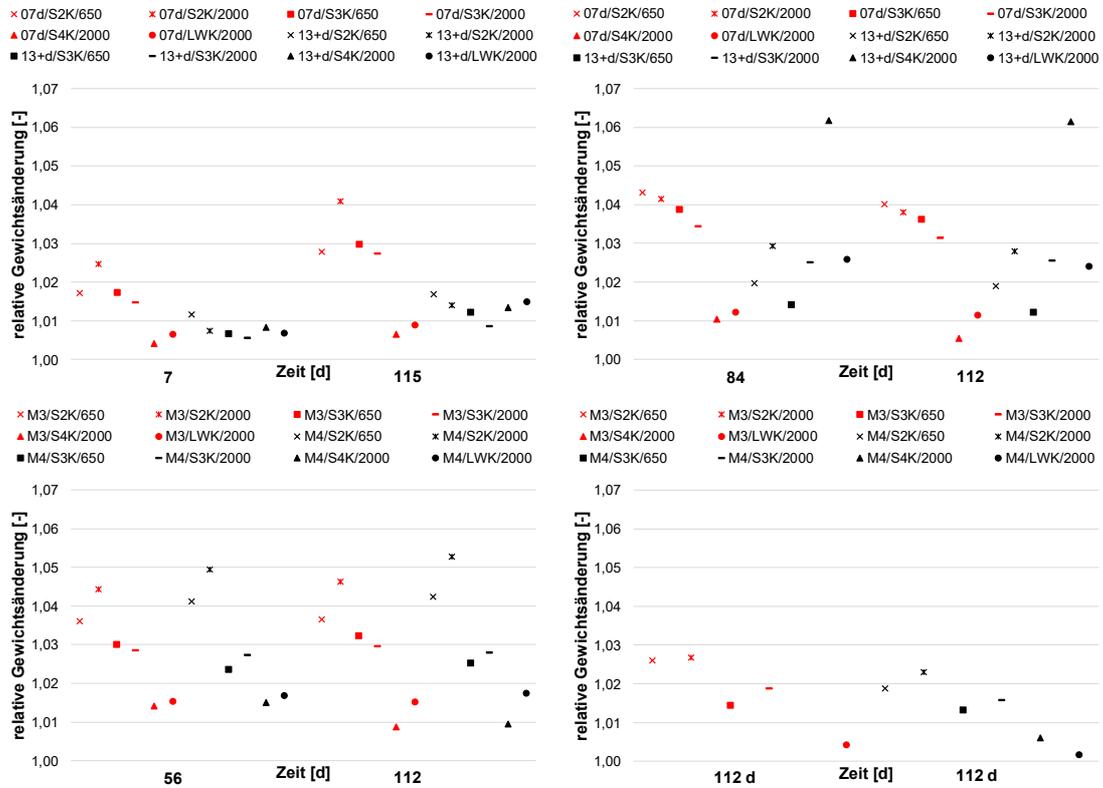


Abbildung 10-139: Relative Gewichtsänderung der Versuchsprismen (links oben und unten bei Raumtemperatur; rechts oben und unten bei ca. 8 °C)

10.7.10. Durchströmte Wassermenge in Versuch 4

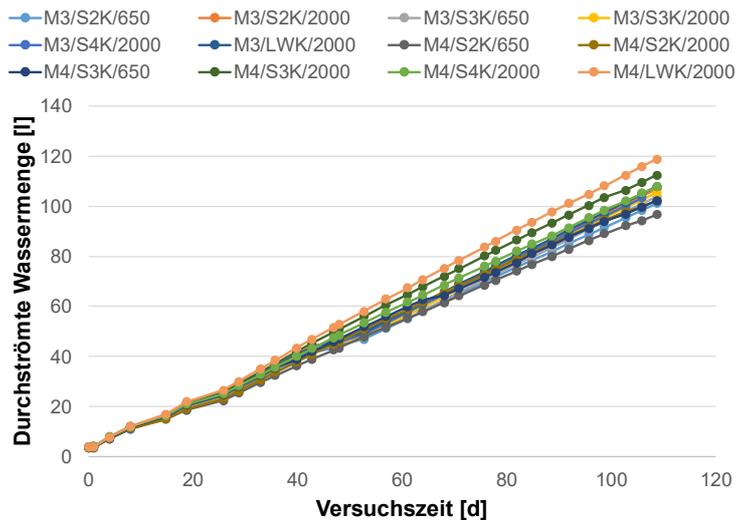


Abbildung 10-140: Wassermenge die im Umströmungsversuch 4 durch die einzelnen Reaktionskammern floss

10.8. Umfrage Bohrunternehmen (Juni 2016): Detektion, Abdichtungsmaßnahmen und Fallbeispiele von stockwerksübergreifenden Bohrungen bzw. vertikalen Grundwasserflüssen

Jeweils beantwortet von:

1. Bohrunternehmen 1
2. Bohrunternehmen 2
3. Bohrunternehmen 3

1. Detektion einer Stockwerksverbindung bzw. von vertikalem Grundwasserfluss im Bohrloch

- 1.1 Wie stellen Sie während einer Bohrung fest, dass zwei Grundwasserleiter mit unterschiedlichen Druckpotentialen oder ein Arteser angebohrt wurden?

Antworten zur Frage 1.1		
AW 1	AW 2	AW 3
Bei einer Imlochhammerbohrung verändert sich im Falle eines Artesers der abzulesende Druck des Manometers, sprich mehr Wasser = Druckerhöhung im Auswurfstrom des Bohrkleins. Bei Spülbohrungen kann beim Nachsetzen des Bohrgestänges oder der Bohrröhre die Spülungssäule beobachtet werden.	Häufig wird das oberste Grundwasserstockwerk mit einer Hilfsverrohrung abverrohrt, sodass das tiefer liegende Grundwasserstockwerk isoliert gemessen werden kann. Überwiegend erfolgt die Herstellung der Erdsonden als direkte Spülbohrung mit Luftspülung. Artesisch gespannte Grundwasserführungen werden im freien Bohrloch unmittelbar erkannt. Grundwasserstände werden auch während des Bohrvorgangs mittels elektrischem Kabellichtlot erfasst. In vereinzelten Fällen werden Ausblasversuche durchgeführt.	Durch die Veränderung der Drücke während der Bohrarbeiten bzw. beim Öffnen der Luftzufuhr nach dem Nachsetzen einer Bohrstange.

1.2 Ist die Detektion abhängig von dem eingesetzten Bohrverfahren?

Wenn ja: Welches Bohrverfahren ist für eine Detektion gut/schlecht geeignet?

Wählen Sie das Bohrverfahren unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydrogeologischen Situation aus?

Antworten zur Frage 1.2		
AW 1	AW 2	AW 3
<p>Bodenklassen 1-5: Spülbohrung 6-7: Imlochhammerbohrung Da beim Imlochhammerbohren stärkere Drücke auftreten, kann es zu mehr Unruhe im Bohrloch kommen (Umläufigkeiten, Klufverschließungen, Auskolkungen, etc.)</p>	<p>Gut geeignet für die Detektion ist eine direkte Spülbohrung mit Luftspülung. Wir passen das Bohrverfahren grundsätzlich den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen an.</p>	<p>Ja die Detektion ist abhängig vom Bohrverfahren. Nur Bohrverfahren mit Druckluft als Spülmedium lassen ein genaues Erkennen von Wasserzutritten zu. Bohrungen mit einer Fluidbasierten Spülung verschleiern die Wasserzutritte. Allerdings unterbindet die Spülung auch Wasserströmungen in der Bohrung. Daher ist es hier nicht so wichtig die Wasserzutritte zu erkennen. Es sind verschiedene Faktoren die zur Auswahl des Bohrverfahrens führen. Hauptsächlich die Geologie, aber auch die Hydrogeologie und die Bohrtiefe spielen eine Rolle.</p>

1.3 Messen/Bestimmen Sie die Druckpotentiale angebohrter Grundwasserleiter? Wenn ja, wie und mit welcher Genauigkeit?

Antworten zur Frage 1.3		
AW 1	AW 2	AW 3
<p>Wenn ein Arteser angetroffen wird, werden die Bohrohre nach oben hin aufgesetzt, bis er in Ruhelage kommt. Kopfdruk und Auslitern findet über das Verschließen der Bohrverrohrung satt.</p>	<p>Die Messung von Grundwasserständen erfolgt mittels elektrischem Kabellichtlot (Ruhewasserspiegel). Druckpotentialmessung am Verrohrungskopf (Arteser), alternativ Einbau pneumatischer Schlauchpacker.</p>	<p>Ja, mit den Manometern der Bohranlage und mit Lichtloten. Die Genauigkeit wird bei ca. 2-5 m liegen.</p>

- 1.4 Messen/Bestimmen Sie die, bei einer Stockwerksverbindung oder einem Arteser, im Bohrloch resultierenden auf-/absteigenden bzw. artesischen Volumenströme? Wenn ja, wie und mit welcher Genauigkeit?

Antworten zur Frage 1.4		
AW 1	AW 2	AW 3
siehe 1.3	Auf- und ansteigende Grundwasserströme werden während des Bohrvorganges in der Regel nicht gemessen.	Ja bei Artesern wird dies sogar relativ aufwändig geprüft um eine große Sicherheit und genaue Daten zu haben. Die Genauigkeit liegt beim Volumenstrom bei +/- 5% beim Potential +/- 0,2 m

2. Maßnahmen zur Abdichtung einer Stockwerksverbindung bzw. eines vertikalen Grundwasserflusses

2.1 Beschreiben Sie bitte kurz Ihr übliches/bevorzugtes Vorgehen bei der Bohrungserstellung und insbesondere der Verfüllung von EWS (gerne in Stichworten).

Bitte machen Sie hierbei u.a. Angaben zu:

- Hauptsächlich verwendetes Bohrverfahren
- Verwendung einer Bohrspülung ja/nein; wenn ja: Art und Dichte der Spülung
- Ist das Vorgehen bei der Verfüllung davon abhängig, ob mit oder ohne Spülung gebohrt wurde?
- Mischertyp: Chargenmischer/Kolloidalmischer/Durchlaufmischer (gerne mit Modellbezeichnung)
- Art und Dichte (ca.) des Baustoffs (Fertigbaustoff Sackware/Silo, Eigenmischung,...)
- Verwendung Verpressschlauch/Verfülllanze gezogen ja/nein
- Verfüllvolumenstrom
- Typische Sondenart (z.B. 2-U-EWS 32 x 2,9 mm), typischer Bohrl Lochdurchmesser
- Verfüllung kontinuierlich oder mit Unterbrechungen
- Für Bohrungen in Baden-Württemberg: verwendetes automatisches Abdichtungskontrollsystem
- Wann erfolgt der Rückbau einer ggf. mitgeführten Bohrverrohrung?

Antworten zur Frage 2.1		
AW 1	AW 2	AW 3
<ul style="list-style-type: none"> • Imlochhammer-/Spülbohrung • Bei Spülbohrung: 1,05 kg/l • Nein • Kolloidalmischer • Sackware, Dichte > 1,9 kg/l • Verpressschlauch, gezogen • > 35 l/min • 2-U-EWS 32,2,9 mm, Bohrl Lochdurchmesser 152 mm • Je nach Geologie • Ja • Verguss-/Verpressmasse muss immer gut in der Bohrverrohrung stehen, 	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Spülbohrungen mit Luftspülung oder Fluidspülungen • Bohrspülung wird an die Untergrundverhältnisse angepasst: Dichte, Zusätze • Die Ringraumhinterfüllung ist unabhängig vom gewählten Bohrverfahren • Je nach Baustellensituation werden alle genannten Verfahren eingesetzt (Hersteller: MAT, Colshorn) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hauptsächlich Imlochhammer und Doppelkopfbohranlage • Hauptsächlich Luftspülung im Festgestein, teilweise Wasserbasierte Spülung im Lockergestein • Spüldichte in der Regel < 1,05 kg/l Bentonit oder CMC Spülung • Ja, wird mit Spülung gebohrt und die Bohrung nicht verrohrt, sind alle Wasserwegsamkeiten schon beim Bohren unterbunden. Daher ist die Hinterfüllung einfacher

<p>Außenrohre aufziehen (?) wenn Verpressmantel steht → G.O.K</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Die Dichte wird gemäß Herstellerangaben gewählt. Neben Sackwaren werden auf größeren Baustellen häufig auch Silotechnik oder Big-packs eingesetzt • I.d.R. Verpressschlauch (nicht gezogen) • Verfüllvolumenstrom richtet sich nach Mischtechnik (MAT z.B. 60 l/min) • Doppel-U-Sonde 32 x 2,9 oder 40 x 3,7; typischer Bohrlochdurchmesser 152 mm • Je nach Mischtechnik kontinuierlich oder mit Unterbrechung • CemTrakker in Kombination mit dotiertem Verpressmaterial • Der Rückbau erfolgt nach Hinterfüllung 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur Kolloidalmischer, verschiedene Typen hauptsächlich von der Fa. Ger-tec • Schwenk Füllbinder HHS Plus, EWM Plus, Hauri Zeotherm 2.0 dot. Also Silo oder Sackware, Dichte immer nach Datenblatt. • Verpressschlauch und Lanze, teilweise gezogen. • 60 l/min • Doppel- U- 32x2,9 mm • Kontinuierlich • CemTrakker und (DBO 3 selten) • Sukzessive mit dem Verfüllvorgang. Suspensionsstand muss immer in der Hilfsverrohrung sein.
---	---	---

2.2 Bis zu welchen Grundwasserbedingungen (Drücke/Volumenströme) führen Sie bei einer stockwerksübergreifenden Bohrung bzw. bei einem Arteser eine „normale“ Verfüllung ohne besondere Maßnahmen (gemäß dem in Punkt 2.1 beschriebenen Verfahren) aus?

Antworten zur Frage 2.2		
AW 1	AW 2	AW 3
-	Die Verpressdichte richtet sich nach der Anbohrtiefe und Stauhöhe des Arteser und etwaigen darüber liegenden Grundwasserführungen. Häufig sind Schüttungen < 0,5 l/s unkritisch	Bei Artesern wir immer versucht diesen Totzustauen und somit die Strömung wähen der Hinterfüllung zu unterbinden. Hierzu können keine Pauschalen Aussagen gemacht werden.

2.3 Welche Maßnahmen ergreifen Sie, wenn festgestellt wird, dass zwei Grundwasserleiter mit unterschiedlichen Druckpotentialen oder ein Arteser angebohrt wurden? Bitte beschreiben Sie das Vorgehen bis zum Abschluss der Verfüllung. Gerne können sie hierbei in Abhängigkeit der vorliegenden Druckpotentiale/Grundwasservolumenströme verschiedene Vorgehen unterscheiden. Falls es sich um ein gestuftes Vorgehen handelt (z.B.: zuerst einfache Abdichtungsmaßnahmen wie z.B. Erhöhung der Suspensionsdichte; falls diese fehlschlagen: aufwändigere Maßnahmen wie z.B. Kiesen o.ä.), erläutern Sie dieses bitte.

Antworten zur Frage 2.3		
AW 1	AW 2	AW 3
-	Bestimmung von Anbohrtiefe und Druckpotential. Bewertung der Risiken. Ermittlung der erforderlichen Suspensionsdichte (ggf. Zugabe von Barith). Bei höheren Schüttungen Einbau eines EWS-Gewebepackers. Bei sehr kritischen Verhältnissen erfolgt kein Ausbau mit Erdsonde	1. Genaue Aufnahme der Potentiale 2. Berechnung der benötigten Dichte 3. Überlegung wie weiter vorgegangen wird: -Kann mit der Hilfsverrohrung totgestaut werden? -Reicht die Dichte des Verpressmaterials? -Muss Schwerspat zugesetzt werden? -Kann eine Sonde eingebaut werden oder wird die Bohrung ohne Sonde verschlossen? -Muss ein Packer eingebaut werden?

2.4 Verwenden Sie schwere Bohrspülungen zur Unterbindung von vertikalen Grundwasserströmungen im Bohrloch?

Wenn ja: Bis zu welchen Druckpotentialen/Grundwasservolumenströmen kann eine schwere Bohrspülung einen vertikalen Grundwasserfluss stoppen?

Nach welchen Kriterien Erfolgt die Einstellung der Dichte der Bohrspülung?

Wie erfolgt der Einbau der EWS wenn schwere Bohrspülung verwendet wurde?

Antworten zur Frage 2.4		
AW 1	AW 2	AW 3
Nein Dichte: Heologie, Hydraulik, Bohrverfahren Einbau: Gewicht unterhängen, Sonde mit Spülung füllen	Sehr selten. Der Einbau der Erdsonden Erfolgt mit Einbaugestänge	Ja, wird teilweise ausgeführt. - Möglich Druckpotentiale hängen von der Anbohrtiefe ab (Vergleiche Be-

		wertung kritischer Stockwerksbau. Es handelt sich um die gleiche Situation, nur das die Spülung nicht abbildet). Einstellung der Dichte erfolgt nach Berechnung - Sonde muss mit einem Gestänge oder Einschubhilfe eingebaut werden.
--	--	--

2.5 Verwenden Sie EWS-Packer zur Unterbindung eines vertikalen Grundwasserflusses im Bohrloch?

Wenn ja: Bis zu welchen Druckpotentialen/Grundwasservolumenströmen kann der Einsatz eines EWS-Packers einen Grundwasserfluss unterbinden?

Wie sind Ihre Erfahrungen im Umgang mit EWS-Packern (positiv, negativ, ...)?
Wie wird bei Verwendung eines EWS-Packers verfüllt?

Antworten zur Frage 2.5		
AW 1	AW 2	AW 3
Positive Erfahrungen Verfüllung: unter bzw. über dem Packer	Der Einsatz von Erdsondenpackern erfolgte bis dato nur bei artesisch gespannten Grundwasserführungen	-Ja -Lassen sich, je nach Bohrdurchmesser in der Regel nur bis max. 2- 5 l/sec einbauen. -Potential relativ egal -positiv -Verpressen unter dem Packer, Packer verfüllen, Verpressen über dem Packer.

2.6 Bis zu welchen Drücken (oder Volumenströmen oder Tiefenlage des Artesers) wird die Bohrung noch mit einer EWS ausgebaut? Ab welchen Drücken wird die Bohrung aufgegeben bzw. ohne Sondenrohre wieder Dicht verfüllt?

Antworten zur Frage 2.6		
AW 1	AW 2	AW 3
-	Die Entscheidung ist abhängig von Anbohrtiefe und Druckpotential. Häufig ab > 0,8 bar	kann nicht pauschal beantwortet werden.

2.7 Erstellen Sie Bohrungen mit mitgeführter Verrohrung?

Wenn ja: Kann das Anbohren zweier Grundwasserleiter beim Mitführen einer Verrohrung zuverlässig erkannt werden?

Wird durch das Mitführen einer Verrohrung die Entstehung eines vertikalen Grundwasserflusses im Bohrloch bei einer stockwerksübergreifenden Bohrung zuverlässig verhindert?

Wird die Verrohrung beim Verfüllvorgang sukzessive gezogen oder erst nach Abschluss des gesamten Verfüllvorgangs bzw. wann wird welcher Ansatz verfolgt?

Antworten zur Frage 2.7		
AW 1	AW 2	AW 3
Erkennung fraglich Vertikaler Grundwasserfluss wird nicht zuverlässig verhindert Verrohrung: sowohl als auch, hängt von der Schichtenabfolge ab	Je nach Standsicherheit wird eine Verrohrung mitgeführt. Das Erkennen eines zweiten Grundwasserleiters erfolgt aufgrund des in der Regel geringeren Bohrfortschrittes gut. Durch das Mitführen der Hilfsverrohrung verbleibt bis zum erstmaligen kompletten Verfüllen der Bohrstrecke im Bohrloch. Während dem Ziehen der Verrohrung erfolgt, falls erforderlich, eine fortschreitende Nachverfüllung.	-ja - ja kann erkannt werden, besser als ohne Verrohrung - nicht zu 100 % aber deutlich eingeschränkt -Je nach Bohr und Verrohrungstiefe. In der Regel werden ca. 10- 15 m in die Verrohrung verpresst und dann 3- 9 m Verrohrung gezogen.

10.9. Protokoll Workshop mit Bohrunternehmern vom 17.11.2016



PROTOKOLL ZU DEM WORKSHOP „VERFÜLLUNG VON STOCKWERKSÜBERGREIFENDEN EWS-BOHRUNGEN“ AM 17.11.2016 IN STUTT GART

TEILNEHMER:

Stefan Michel (Stuwa GmbH), Torsten Weyhrauch (Dietrich GmbH), Edward Michalik (Michalik Brunnenbau), Christian Fleissner (Drillexpert GmbH), Edelbert Krämer (Krämer Erdwärme), Igor Khaertdinov (Krämer Erdwärme), Bruno Lorinser (UM Baden-Württemberg, Ref. 64), Ute Hellstern (UM Baden-Württemberg, Ref. 54), Stefan Wigger (KIT, PTKA), Petra Huttenloch (EIFER), Hagen Steger (KIT, AGW), Roman Zorn (EIFER), Olaf Ukelis (EIFER), Moritz Zemann (KIT, MPA Karlsruhe), Julian Link (KIT, MPA Karlsruhe), Ingrid Stober (KIT, AGW), Sabrina Gärtner (Solites), Maria Portune (Solites), Julian Rolker (Solites)

Die Präsentation liegt diesem Protokoll als pdf-Datei bei.

1. BEGRÜSSUNG

Begrüßung der Teilnehmer und allgemeine Vorstellungsrunde.

2. THEMENBLOCK 1

Rückblick auf das abgeschlossene Forschungsvorhaben EWS-tech und Vorstellung des Folgeprojekts EWS-tech II mit Erläuterung der Arbeitspakete, die Versuche zur Untersuchung des Einflusses von vertikalem Grundwasserfluss beinhalten.

Vorstellung des allgemeinen Vorgehens beim Verbinden zweier Grundwasserleiter mit anschließender Diskussion der Abschnitte in den Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS-EWS) zum Thema Verfüllung von EWS-Bohrungen: Abschnitt 2.4 (Dokumentation des Bohrvorgangs, Ansprache der Geologie und des Grundwassers), Anlage 3 (Matrix kritischer Stockwerksbau) und Anlage 4 (Arbeitsanweisungen für die Ansprache diverser Grundwasserhältnisse / Geologien).

Rückmeldungen zum allgemeinen Vorgehen beim Verbinden zweier Grundwasserleiter:

- Das Erkennen von Grundwasserleitern ist stark vom verwendeten Bohrverfahren abhängig. Luftbasierte Spülbohrungen ermöglichen eine gute Detektion von Wasserzutritten, wohingegen fluidbasierte Spülbohrungen das Erkennen von Wasserzutritten erschweren. Erfahrene Bohrmeister können durch die Änderung der Bohrspülung in ihrer Konsistenz, Farbe, etc. auf Wasserzutritte rückschließen.

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
 Meitnerstr. 8, 70563 Stuttgart, Tel. 0711 673 2000-0, Fax 0711 673 2000-99, info@solites.de, www.solites.de
 Zentrale: Steinbeis Innovation gGmbH, USt-Ident-Nr. DE 245846290, Steuer-Nr. 99143/00355
 Haus der Wirtschaft, Willi-Bleicher-Strasse 19, 70174 Stuttgart
 Geschäftsführer: Dipl.-Ing. (FH), M. Eng. Erik Burchardt, Registergericht: Stuttgart HRB 720289
 Ein Unternehmen im Steinbeis-Verbund (www.steinbeis.de)
 Dokument: 2016-11-17 Protokoll_Workshop Verfüllung stockwerksübergreifenden EWS-Bohrungen.docx

Seite 1 / 4

- Für eine erfolgreiche Abdichtung einer stockwerksübergreifenden Wasserfließbewegung ist vor allem die Bestimmung des hydraulischen Druckpotentials als auch die Bestimmung des Grundwasservolumenstroms innerhalb des Bohrlochs von großer Bedeutung.
- Bei aufsteigenden Grundwasserleitern ohne artesischen Auslauf kann für die Bestimmung des hydraulischen Druckpotentials ein Gewebepacker auf Höhe des Grundwasser-Geringleiters eingebaut werden. Bei Artesern wird das hydraulische Druckpotentiale entweder durch das „Totstauen“ (Aufsetzen von zusätzlicher Hilfsverrohrung über GOK), oder ebenso durch den Einbau eines Gewebepackers bestimmt. Bei der Verwendung des Imlochhammerbohrverfahrens kann die Bestimmung des Druckpotentials mit Hilfe des angebrachten Manometers der Bohranlage erfolgen. Beim Erreichen eines Grundwasserleiters zeigt dieses gegenüber dem Zustand ohne Grundwasserzutritt einen erhöhten Druck, der der resultierenden Wassersäule im Bohrloch entspricht. Beim Anbohren eines zweiten Grundwasserleiters kann eine exakte Bestimmung des Druckpotentials nur dann stattfinden, wenn der obere Grundwasserleiter mit Hilfe eines Packers oder der Hilfsverrohrung vom unteren Grundwasserleiter hydraulisch entkoppelt ist.
- Die Messung des Grundwasservolumenstroms im Bohrloch erweist sich in der Praxis als komplex:
 - Bei der Verwendung des Imlochhammerbohrverfahrens kann mit Hilfe eines Ausblasversuchs der Grundwasserzuströmung annäherungsweise bestimmt werden. Dabei wird das ins Bohrloch strömende Wasser auf Höhe des Grundwasserzutritts mit Hilfe der Druckluft der Bohranlage herausgeblasen und das Volumen am Auslauf gemessen. Bezüglich der Genauigkeit dieses Versuchs gehen die Meinungen auseinander. „Die durch einen Ausblasversuch ermittelten Werte liefern meist grobe Anhaltspunkte für den tatsächlichen Volumenstrom.“
 - Alternative Messmethoden zur Bestimmung des Grundwasservolumenstroms (wie zum Beispiel Flowmeter-Messung, geophysikalische Messmethoden, Pumpversuche etc.) sind kosten- und zeitintensiv und können ein Bohrvorhaben unwirtschaftlich machen.
 - Insgesamt ist die einhellige Meinung der Bohrunternehmen, dass die exakte Bestimmung des Volumenstroms des in das Bohrloch einströmende Grundwasser mit den derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln (technisch als auch finanziell) nicht möglich ist.

Rückmeldungen zum praktischen Umgang mit den LQS-EWS:

- Aus Sicht der Bohrunternehmen sind die Arbeitsanweisungen der LQS-EWS zum Teil zu wenig praxisorientiert. Hinsichtlich der Verbindung zweier Grundwasserleiter fehlen konkrete Angaben zum Vorgehen. Dies führt speziell bei der Kommunikation zwischen den Bohrunternehmen und den Behörden zu Problemen, da sich diese auf die Einhaltung der LQS-EWS berufen.

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
 Meitnerstr. 8, 70569 Stuttgart, Tel. 0711.673 2000-0, Fax 0711.673 2000-99, info@solites.de, www.solites.de
 Zentrale: Steinbeis Innovation gGmbH, USt-Ident-Nr. DE 245846290, Steuer-Nr. 99143/00355
 Haus der Wirtschaft, Willi-Bleicher-Strasse 19, 70174 Stuttgart
 Geschäftsführer: Dipl.-Ing. (FH), M. Eng. Erik Burchardt, Registergericht: Stuttgart HRB 720289
 Ein Unternehmen im Steinbeis-Verbund (www.steinbeis.de)
 Dokument: 2016-11-17 Protokoll_Workshop Verfüllung stockwerksübergreifenden EWS-Bohrungen.docx

Seite 2 / 4



- Hinsichtlich des Vorgehens beim Verbinden zweier Grundwasserleiter erachten es die Bohrunternehmen als wichtig, einen standardisierten Vorgang zu definieren. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Praktikabilität mehr in den Vordergrund gerückt werden sollte.

3. THEMENBLOCK 2

Vorstellung der im Verbundprojekt EWS-tech II geplanten Versuchsaufbauten mit vertikalem Grundwasserfluss als Untersuchungsschwerpunkt. Darstellung des Technikumversuchsaufbaus mit detaillierter Erläuterung der Skalierung realer Druckbedingungen in den Versuchsmaßstab.

Kurze Erläuterung der Herangehensweise:

Ein aufsteigender Grundwasserleiter muss innerhalb einer bestimmten Höhe (= simulierte Höhe des darüber liegenden Aquitards) vollständig abgedichtet werden. Im Versuchsaufbau steht dafür ein transparentes Versuchsrohr zur Verfügung, das im unteren Bereich (ca. 70 cm) das radiale Zuströmen von Wasser mit einem definierbaren Volumenstrom (= simulierter Grundwasserstrom) ermöglicht. Das Druckpotential wird durch eine zusätzliche Wassersäule aufgebracht, wobei die Anbohrhöhe dieses Rohres aus der Umrechnung der in den LQS-EWS Anhang 3 angegebenen Bewertungszahl (kritischer Stockwerksbau / nicht kritischer Stockwerksbau) bzw. der aus dieser Bewertungszahl berechneten erforderlichen Suspensionsdichte resultiert.

(In der beigefügten Präsentation in PDF-Form ist der Versuchsaufbau näher erläutert.)

Rückmeldung zum Versuchsaufbau:

- Hinsichtlich der oben beschriebenen Skalierung realer hydraulischer Druckverhältnisse in den Versuchsmaßstab gibt es von Seiten der Bohrunternehmen keine Einwände.
- Der Versuchsaufbau wurde als geeignet eingestuft, um Verfüllvorgänge von Erdwärmesondenbohrungen unter Grundwassereinfluss zu untersuchen.
- Von den Bohrunternehmen wurde angemerkt, dass mit dem dargestellten Versuchsaufbau kein 100 m tiefes Bohrloch simuliert werden kann.
 - Dies ist korrekt. Mit dem Versuchsaufbau können aufsteigende Grundwasserleiter im drucklosen Zustand (z.B. artesischer Auslauf) simuliert werden.
Anmerkung von Seiten des Projektkonsortiums: Verfüllvorgänge in druckbeaufschlagten Versuchssäulen zur Simulation tiefer Erdwärmesonden sind unter anderem Arbeitsschwerpunkte in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanzierten Forschungsvorhaben QEWS II, bei dem Solites und auch das Institut für Angewandte Geowissenschaften am KIT dem Projektkonsortium angehören.

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
Meitnerstr. 8, 70569 Stuttgart, Tel. 0711.673 2000-0, Fax 0711.673 2000-99, info@solites.de, www.solites.de
Zentrale: Steinbeis Innovation gGmbH, USt-Ident-Nr. DE 245846290, Steuer-Nr. 99143/00355
Haus der Wirtschaft, Willi-Bleicher-Strasse 19, 70174 Stuttgart
Geschäftsführer: Dipl.-Ing. (FH), M. Eng. Erik Burchardt, Registergericht: Stuttgart HRB 720289
Ein Unternehmen im Steinbeis-Verbund (www.steinbeis.de)
Dokument: 2016-11-17 Protokoll_Workshop Verfüllung_stockwerksübergreifenden EWS-Bohrungen.docx

Seite 3 / 4



Weitere Rückmeldungen:

- Es wurde von den Bohrunternehmen vorgeschlagen, den Einfluss des „Kiesens“ (Einfüllen von gerundetem Kies in das Bohrloch bei großem Suspensionsverlust) versuchstechnisch detaillierter zu betrachten.
 - Die Durchführung der vorgeschlagenen Untersuchungen wird vom Projektkonsortium überprüft und ggf. wird mit einzelnen Personen Kontakt aufgenommen.

4. ZUSAMMENFASSUNG

- Hinsichtlich des Versuchsaufbaus und der Skalierung realer Druckverhältnisse in den Versuchsmaßstab gibt es von Seiten der Bohrunternehmen keine Einwände. Die Herangehensweise ist somit auch für die weiteren Untersuchungen passend.
- Die bei den Vorversuchen gewählten Volumenströme des simulierten Grundwasserstroms spiegeln realistische Gegebenheiten wider und können ebenso wie die gewählten Verfüllvolumenströme für weitere Untersuchungen herangezogen werden.
- Es wurde aufgezeigt, dass bei den LQS-EWS ein Überarbeitungsbedarf besteht:
 - Die Matrix „kritischer Stockwerksbau“ (Anlage 3 der LQS EWS) bedarf einer Überarbeitung, da aufsteigende Grundwasserleiter auch bei Grundwasservolumenströme $< 0,5$ l/s ggf. nicht abgedichtet werden können, wenn die Suspensionsdichte bezogen auf das hydraulische Potential des einströmenden Grundwassers zu gering ist. Prinzipiell besteht auch das Problem, dass der Grundwasservolumenstrom in der Praxis nicht hinreichend genau bestimmt werden kann.
Darüber hinaus kann auch ein zu geringer Verfüllvolumenstrom dazu führen, dass das einströmende Grundwasser die Suspension stets so verdünnt und die Suspensionsdichte herabsetzt, dass die zur Abdichtung erforderliche Dichte nicht erreicht wird und der vertikale Grundwasserfluss im Bohrloch somit nicht gestoppt werden kann.
 - Von Seiten der Bohrunternehmer wurde angemerkt, dass die LQS-EWS hinsichtlich ihrer Praktikabilität neu betrachtet und ggf. angepasst werden sollten. Aus Sicht der Bohrunternehmen ist entscheidend, dass das Vorgehen im Einklang mit der Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit steht.
 - Das Umweltministerium zeigt Bereitschaft zur Anpassung / Überarbeitung der LQS-EWS (auf Basis neuer Erkenntnisse).

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
 Meitnerstr. 8, 70563 Stuttgart, Tel 0711.673 2000-0, Fax 0711.673 2000-99, info@solites.de, www.solites.de
 Zentrale: Steinbeis Innovation gGmbH, USt-Ident-Nr. DE 245846290, Steuer-Nr. 99143/00355
 Haus der Wirtschaft, Willi-Bleicher-Strasse 19, 70174 Stuttgart
 Geschäftsführer: Dipl.-Ing. (FH), M. Eng. Erik Burchardt, Registergericht: Stuttgart HRB 720289
 Ein Unternehmen im Steinbeis-Verbund (www.steinbeis.de)
 Dokument: 2016-11-17 Protokoll_Workshop Verfüllung stockwerksübergreifenden EWS-Bohrungen.docx

Seite 4 / 4

10.10. Literaturrecherche von Schadensfällen im Zusammenhang mit Erdwärmebohrungen

Introduction

Table 1: Compilation of cases of damage in Germany and adjacent regions (complemented from Grimm et al., 2014 with data from TLUG, 2016).

Location	defect drilling #	Year of the drilling	Cause	Damages
Baden-Württemberg				
Tettnang (Lake Constance County)	1	1997	Artesian discharge, ascending	Soil wetness
Wurmlingen (Tübingen)	1	2002	Ascending hydraulic potential, cavity formation due to subrosion of gypsum keuper	Subsidence and damages to buildings and streets
Ravensburg (Ravensburg)	1	2006	Artesian discharge, ascending potential	Siltation of sewers, damage by water
Böblingen (Böblingen)	n/a	2006-2008	Anhydrite swelling	damage to buildings by uplift
Staufen (Freiburg rural)	1	2007	Ascending hydraulic potential, anhydrite swelling	damage to buildings and streets by uplift
Rudersberg (Rems-Murr-County)	1	2007-2008	Ascending and/or descending potential, anhydrite swelling	damage to buildings and streets by uplift
Schorndorf (Rems-Murr-County)	2	2008	Descending hydraulic potential	damage to buildings by subsidence, dry running of the Rainbrunnen spring
Leonberg (Böblingen)	1	2011	Descending hydraulic potential	damage to buildings by subsidence
Remlingen (Böblingen)	1	2011	Descending hydraulic potential	dry running of several springs
Steinfeld (Sonneberg)	n/a	2011	Artesian discharge	n/a
Thuringia				
Mühlhausen (Unstrut-Heinrich-County)	n/a		Artesian discharge	n/a
Jena	n/a		Artesian discharge	n/a
Arnstadt (Iim-County)	n/a		Artesian discharge	n/a
Saale-Holzland-County	n/a		Karst formation	n/a
Saale-Holzland-County	n/a		Contamination of surface water by drilling fluid	n/a
Paitzdorf (Greiz County)	n/a	2001-2013	Subsidence due to incomplete backfilling	n/a
Heiligenstadt (Eichsfeld)	n/a		Subsidence due to incomplete backfilling	n/a
Weißborn (Saale-Holzland-County)	n/a		incomplete backfilling	n/a
Wachsenburggemeinde (Iim-County)	n/a		incomplete backfilling	n/a
Gera	n/a		incomplete backfilling	n/a
Landau, Rhineland-Palatinate	2, 1	2010	Seismicity, deep drilling	Slight damage to property
Wiesbaden, Hesse	1	2009	Artesian discharge, ascending potential	Soil wetness, material extraction
Kamen, North Rhine-Westphalia	1	2009	Descending potential	Sagging/Subsidence, damage to buildings
Basel, Swiss	3, 4	2006	Seismicity, deep drilling	Slight damage to property
Lochwiller, France	n/a	2008	Ascending Potential, anhydrite swelling	damage to buildings by uplift

Basic Considerations

Table 3: Volume flow rates and involved lithologies recorded from different cases of vertical groundwater movement (Source shown in table).

	Location / year	flow rate [l/min]	Groundwater-Inflow		Groundwater-Outflow		Source	
			Depth [m] below ground	Potential [mH ₂ O]	Lithology and aquifer classification	Depth [m] below ground		Potential [mH ₂ O]
Artesian discharge	Staufen, 2007	10.00	32.00	n/a	Layers of the Esthærien; joint and karst aquifer	-	-	LGRB (2012)
	Künzelsau	12.00	76.00	89.00	n/a	-	-	Drilling Company
	Kilchberg	19.80	85.00	94.25	n/a	-	-	Drilling Company
	Allensbach	30.00	19.00	20.40	n/a	-	-	Drilling Company
	Schallstadt	60.00	n/a	n/a	n/a	-	-	Drilling Company
	Foothill zone general	60 - 120.00	n/a	n/a	n/a	-	-	Drilling Company
	Tettmang, 1997	180.00	n/a	n/a	n/a	-	-	Grimm et al. (2014)
	Ravensburg, 2006	600.00	81.00	86.00	Morainic deposits; porous aquifer	-	-	Grimm et al. (2014)
	Kiebingen	1200.00	37.00	40.70	n/a	-	-	Drilling Company
	Schindeleggi (CH)	5400.00	n/a	n/a	n/a	-	-	Drilling Company
Ascending Conditions	Wiesbaden, 2009	6000.00	~100.00	n/a	n/a	-	-	WVGW (2010)
	Staufen, 2007	1.90	154.80	156.90	upper limestone; joint & karst aquifer	~80.00	n/a	LGRB (2010)
		3.00	141.66	143.46	n/a	85.50	n/a	LGRB (2010); Grimm et al. (2014)
		4.00	-	-	n/a	-	-	LGRB (2010); Grimm et al. (2014)
	Moosbeuren, 2016	60.00	25.00	23.70	tertiary marl	4.00	0	Drilling Company
		72.00	-	-	n/a	-	-	Drilling Company
	Böblingen, 2008	2.40	~40.00	n/a	lower bunte layers of the Esthærien; joint & karst aquifer	70.00	n/a	LGRB (2015c)
		12.00	-	-	n/a	-	-	LGRB (2015c)
	Critical stocked aquifer		30.00		n/a			UM (2015)

10.11. Dokumentation der Referenzversuche ohne Sondenrohre

Versuch 005_M4_T1

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restaus-laufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens.temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
005_M4_T1	kg/l	s	s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
	2	194	196	0	0	0	1607	22.7	53	225	50

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Proben-nummer	Bemerkungen
540 - 630	homogene Säule, keine Entmischungen erkennbar, sehr gute Verfüllqualität
450 - 540	homogene Säule, keine Entmischungen erkennbar, sehr gute Verfüllqualität
360 - 450	homogene Säule, keine Entmischungen erkennbar, sehr gute Verfüllqualität
270 - 360	homogene Säule, keine Entmischungen erkennbar, sehr gute Verfüllqualität, geringfügige sandige Entmischung
180 - 270	homogene Säule, keine Entmischungen erkennbar, sehr gute Verfüllqualität, sandige Entmischung am SR, insgesamt gut
90 - 180	Auf Analysezettel keine Bemerkung gemacht, Qualität war jedoch durchgängig sehr gut
0 - 90	Auf Analysezettel keine Bemerkung gemacht, Qualität war jedoch durchgängig sehr gut



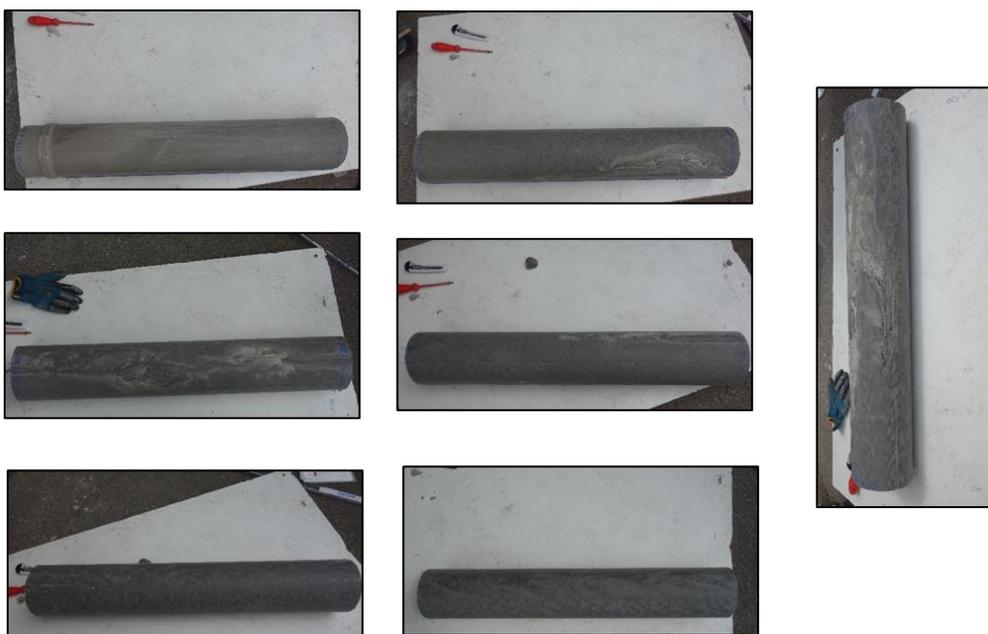
Versuch 007_M3_T2

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restaus-laufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens.temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
	kg/l	s	s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
007_M3_T2	1,985	81	71	0	0	0	778	26	83,2	450	59

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Proben-nummer	Bemerkungen	Zusammenfassung
3 - 90	helle Stellen erkennbar, vermutlich Entmischungen von Quarzmehl /-sand. Klarer frablicher Wechsel bei cm 17 (keine Erklärung dafür gefunden). Rückseite gute Qualität. Von oben ist an der Oberfläche eine kleine Sackung/Trichter erkennbar	Auf den Bildern dieser Probenstücke ist fälschlicherweise Baustoff M2 geschrieben. Ab Probenstück 360-450 ist wieder M3 geschrieben.
90 - 180	deutliche Entmischung erkennbar (bei ca. 160 - 180 cm). Dort deutliche sandige Entmischung. Entmischungen sind nicht an Sondenrihr	
180 - 270	Entmischungsstruktur nimmt deutlich zu. Hier fast über die gesamte Länge mit sandig entmischt (hell/dunkel). Auch hier nicht entlang Verfüllrohr.	
270 - 360	Entmischungen weiterhin auf der selben Seite deutlich erkennbar. Nun allerdings etwas dunkler als zuvor. Könnte dafür sprechen, dass hier eher Magnetit in den Entmischungen auftritt. (Anmerkung: Würde Sinn machen wenn davon ausgegangen wird, dass das Material entmischt. Sand ist leichter und könnte weiter nach oben migrieren. Magnetit ist schwerer und separiert sich irgendwann von der Gesamtaufstiegsmasse (Sand + Magnetit) ab.	
360 - 450	Entmischungen werden weniger. Die ganze Säule ist aber mit "Zacken" übersät. Diese könnten auch Anzeichen für Entmischungen sein!	
450 - 540	ähnlich wie bei dem Probenstück zuvor	
540 - 630	keine so deutliche Entmischungen (bis auf die Zacken) erkennbar.	



Versuch 009_M1_T3

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restausrufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens.temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
009_M1_T3	kg/l		s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
	2	>12 min	0	0	0,5	0,5	514	24,7	55	83	*

*zu weich und duktil um aus FP entfernt werden zu können

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Probennummer	Bemerkungen
1 - 90	insgesamt gute Qualität. Risse deuten im mittleren Bereich auf eine Sackung hin (U-Form). Z.T. kleinere Löcher
90 - 180	im mittleren Bereich sind 2 Löcher erkennbar. Ca. 1,5 x 1 cm groß. Das eine Loch ist ca. 1 cm tief und es ist das Verfüllrohr zu erkennen. Die Rückseite zeigt eine gute Verfüllqualität auf.
180 - 270	Entlang vom Verfüllrohr sind kleine Risse (vermutlich präferierter Aufstiegsweg rechts und links vom Rohr), dort z.T. auch kleine Löcher. Insgesamt gute Qualität
270 - 360	insgesamt gut Qualität. In der Nähe des Verfüllrohres ist auch ein kleines Loch (2x1cm) erkennbar. Tiefe ca. 5mm
360 - 450	insgesamt gute Qualität, keine markanten Risse, Löcher o.Ä. erkennbar
450 - 540	insgesamt gute Qualität, kleine Risse im Bereich des Sondenrohres
540 - 630	sehr gute Qualität. Durch einen farblichen Unterschied ist die max. Tiefe des Verfüllrohres erkennbar. Vom Versuchsstück wurden die untersten 4,7 cm abgeschnitten, damit das Probenstück in die Kunststoffbox passt.



Versuch 011_M2_T4

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restausr laufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens. temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
	kg/l	s	s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
011_M2_T4	2,05	194	*	0	0	0	**	26,8	45	60	60

*nach 7 Minuten gestoppt

** nicht messbar

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Probennummer	Bemerkungen	Zusammenfassung
1 - 90	sehr gute Verfüllqualität, SR an abweichender Baustofffarbe erkennbar, keine Entmischungen	sehr gut
90 - 180		perfekt
180 - 270	1 Querriss ca. in der Mitte	perfekt
270 - 360	mehrere Querrisse (vermutlich vom Ablegen)	perfekt
360 - 450	3 Querrisse (1 großer in der Mitte und 2 kleinere)	perfekt
450 - 540		perfekt
540 - 630		perfekt



10.12. Dokumentation der Referenzversuche mit Sondenrohren

Versuch 017_M1_T7_SR

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restaus-laufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens.temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
017_M1_T7_SR	kg/l	s	s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
	1,98	300	>600	0-0,5	0-0,5	-	438	23	68	90	54

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Proben-nummer	Bemerkungen	Zusammenfassung
0 - 90	Fehlstelle bei 40 cm, ca. 8 cm tief, 2 cm Länge, Hutstruktur unterhalb von Fehlstelle (ggü. FS)	befriedigend
90 - 180	kleine FS bei 97-100 cm (zw. SR), Baustoff bricht zwischen Sondenrohr heraus, Haarrisse mit heller Füllung (evtl. Sand) wie bei Hutstruktur	gut
180 - 270	viele Haarrisse mit heller Füllung auf einer Bohrröchhälfte. Sackung/Spalt bei 250 cm, 12 cm breit, 2 mm Querschnitt	gut
270 - 360	Spalt bei 290 cm, Sackung / Haarrisse über ganz Länge, "Seitenwechsel" an Spalt	gut
360 - 450	deutlich weniger Sackungen / Haarrisse als bei darüberliegenden Stücken	sehr gut- gut
450 - 540	deutlich weniger Sackungen / Haarrisse als bei darüberliegenden Stücken	sehr gut- gut
540 - 631	kleine Fehlstelle bei 600 cm, t=1cm, l= 3cm, b= 1,5 cm. Haarrisse /Sackungen wie bei den darüberliegenden Stücken	gut



Versuch 018_M2_SR

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restaus-laufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens.temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
018_M2_SR	kg/l	s	s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
	1,99	262	-	0	0	0	*	23,3	11	450	10

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Proben-nummer	Bemerkungen	Zusammenfassung
1 - 90	keine erkennbaren Mängel	sehr gute Verfüllqualität
90 - 180	z.T. marmoriert	sehr gute Verfüllqualität
180 - 270	keine erkennbaren Mängel	sehr gute Verfüllqualität
270 - 360	keine erkennbaren Mängel	sehr gute Verfüllqualität
360 - 450	keine erkennbaren Mängel	sehr gute Verfüllqualität
450 - 540	keine erkennbaren Mängel	sehr gute Verfüllqualität
540 - 633	keine erkennbaren Mängel	sehr gute Verfüllqualität



Versuch 019_M3_SR

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restaus-laufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens. temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
019_M3_SR	kg/l	s	s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
	1,99	76	69	0-0,5	0,5	-	670	22,4	61	450	52

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Proben-nummer	Bemerkungen	Zusammenfassung
7 - 90	z.T. deutliche Entmischungen erkennbar (sowohl sandige Bereiche als auch Magnetitentmischungen), kleinere Risse (Haarrisse) mit sandiger Füllung, stark marmoriert	schlechte Verfüllqualität, sandige Bereiche (-> Angriffsmöglichkeit gegenüber Grundwasser?!)
90 - 180	ähnlich wie oben, etwas weniger sandig entmischt, stark marmoriert	befriedigend - ausreichend
180 - 270	Fehlstelle ca. 18 cm lang und ca. 3 cm breit. Beginn der Fehlstelle: 191 cm von Oberkante Suspensionshöhe. Unterhalb der Fehlstelle sehr feinkörniges und weiches Material ("tonig")	Große Fehlstelle, schlechte Verfüllqualität, mangelhaft
270 - 360	kleine Fehlstelle, sehr stark entmischt (sowohl Sand als auch Magnetit), Aufstiegsweg erkennbar (ca. 2 mm breit), dieser ist teils mit Magnetit gefüllt, teils mit Sand gefüllt und teils auch unverfüllt.	kleine Fehlstelle, schlechte Verfüllqualität, mangelhaft
360 - 450	deutliche Aufstiegswegen von Sand & Magnetit erkennbar (z.T mit Sand und /oder Magnetit gefüllt, z.T. auch unverfüllt)	schlechte Verfüllqualität, befriedigend- ausreichend
450 - 540	stark marmoriert, hellere & dunklere Bereiche erkennbar, keine offenen Aufstiegswegen ersichtlich	befriedigend
540 - 633	deutlich weniger Qualitätsmängel, z.T. jedoch starke Magnetitanhäufung erkennbar, marmoriert	befriedigend



Versuch 020_M4_SR

Versuchsdurchführung:

Versuch	Suspensionsparameter										
	Dichte	Marsh-zeit	Restaus-laufzeit	Absetzmaß			CST	Suspens.temperatur	Filtrationsversuch		
				1h	2h	24h			Filtrat	Dauer	F.kuchen
020_M4_SR	kg/l	s	s	%	%	%	s	°C	ml	s	mm
	1,99	153	153	0	0	0	1161	22,5	67	326	62

Visuelle Analyse nach 7 Tagen Aushärtezeit

Proben-nummer	Bemerkungen	Zusammenfassung
1 - 90	sehr feine Rissstruktur, unauffällig	sehr gut
90 - 180	entlang vom Sondenrohr (liegt an "Bohrlochwand" an) sandig entmischt	sehr gut
180 - 270	-	sehr gut
270 - 360	kleiner Querriss im Zentrum des Versuchstücks (eventuell durch Ablegen/Transport?)	sehr gut
360 - 450	perfekt	sehr gut
450 - 540	perfekt	sehr gut
540 - 632	perfekt	sehr gut



10.13. Dokumentation Realmaßstabsversuch

