

Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches

Phase III (Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich &
Injektionsmittel, in situ-Versuche)
(STROEFUN III)

Förderkennzeichen: 02E11748A und 02E11748B

Schlussbericht Technischer Anhang

Der vorliegende Schlussbericht entstand unter Mitarbeit von:

Projektmitarbeitende TUC

M. Sc. Julius Bauermeister
Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld

Projektmitarbeitende IBeWa

Dipl. Anke Schieweg
B. Sc. Lysann Raebiger
M. Sc. Patrick Abel
Thomas Viertel
Johannes Flemming
M. Sc. Wafiullah Noorhan
Sebastian Leyh
Dr. Uwe Glaubach
Dr. Thomas Wilsnack

Projektmitarbeitende BGE TEC

Dr. Nina Müller-Hoeppe
Dr. Ali Hussein
M. Sc. Tilman Fischer
Dipl. Holger Schmidt
Dr. Hans-Joachim Engelhardt

Projektmitarbeitende K-UTEC

Dipl. Dittmar Lack
Christian Kursave

Projektmitarbeitende HZDR

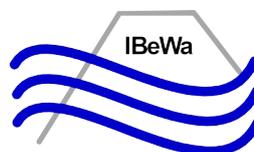
Dr. Johannes Kulenkampff

Beteiligte Institutionen:

Technische Universität Clausthal - Institut
für Bergbau
(TUC)



Ingenieurpartnerschaft für Bergbau,
Wasser- und Deponietechnik
(IBeWa)



BGE TECHNOLOGY GmbH
(BGE TEC)



K-UTEC Salt Technologies
(K-UTEC)



Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf
(HZDR)



Durchgeführt unter der Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)



Und betreut vom:



Das diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02E11748A und 02E11748B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Clausthal-Zellerfeld, den 30. November 2023

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract	2
1 Einleitung	3
2 Vorhabensbeschreibung - Grundlagen und Vorgehensweise	5
3 Versuchsbauwerk in Teutschenthal – realisiertes Testkonzept	7
3.1 Standortcharakterisierung	7
3.2 Beschreibung des realisierten Messkonzeptes und des Versuchsbauwerks....	9
3.3 Virtuelles CAD-Standortmodell.....	12
4 Technischer Anhang – Teil 1	13
4.1 Entwicklung und Optimierung des Messsystems	13
4.1.1 Funktionsprinzip	13
4.1.2 Halbtechnische Testung der Schlauchkammern.....	17
4.1.3 Anschluss der Ringkammerschläuche	19
4.2 Vorlaufender Gasdrucktest der Anschlussrohre in situ	21
4.3 Vergleichsuntersuchungen zur Optimierung des Verbundes	23
4.4 Überbohren der Anschlussrohre.....	25
4.4.1 Vortest zum Überbohren.....	25
4.4.2 Teilrückbau der Testrohre.....	26
5 Technischer Anhang - Teil 2	30
5.1 Injektionskonzept und Injektionsmittel.....	30
5.1.1 Konzept Injektionsleitungen	30
5.1.2 Verwendete Injektionsmittel	31
5.1.2.1 Styromag-MgO-Suspension.....	33
5.1.2.2 MFBBa.....	34
5.1.2.3 Epojet-LV.....	39
5.1.3 Prozessverständnis zur Begründung für die Auswahl der Injektionsmittel....	39
5.2 Injektion einer Probe Laborkomposit im Labor	42
6 Technischer Anhang – Teil 3	45
6.1 MgO-Massenbaustoff A1- Rezepturanpassung	45
6.1.1 A1-Basisrezeptur und Ausgangsstoffe.....	45
6.1.2 Kriterien Magnesiumoxid.....	45
6.1.3 Magnesiumoxid	46
6.1.4 Kriterien Salzgrus.....	47
6.1.5 Salzgrus	47
6.1.6 Kriterien Anmachlösung.....	50
6.1.7 Anmachlösung	50
6.2 Vorversuche - Baustoffblöcke und Bohrungsverfüllungen.....	50

6.2.1	Mischversuche	51
6.2.2	Sedimentationstabilität der Baustoffsuspension	52
6.2.3	Wirkung von Armierungsmatten.....	53
6.2.4	Qualitätssicherung des Baustoffs.....	54
6.2.5	Reaktion auf die Ergebnisse zur Sedimentationsstabilität - Materialtechnik.....	57
6.2.6	Reaktion auf die Ergebnisse - Temperaturentwicklung.....	58
6.2.7	Ergebnis der Rezepturanpassung.....	60
7	Technischer Anhang - Teil 4.....	61
7.1	Simulation der Temperaturentwicklung.....	61
7.1.1	3D-Modellgeometrie.....	61
7.1.2	Randbedingungen und Berechnungsannahmen.....	63
7.1.3	Materialmodell zur Beschreibung der Hydratationswärmeentwicklung.....	64
7.1.4	Verwendete thermische Materialparameter	65
7.1.5	Berechnungsablauf.....	65
7.2	Zusammenstellung der Ergebnisse.....	66
7.2.1	Zusammenstellung der Ergebnisse des Prognosemodells.....	66
7.2.2	Anpassung des Prognosemodells an die Messdaten.....	66
7.2.3	Simulationsergebnisse nach Anpassung.....	67
7.3	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.....	69
8	Technischer Anhang – Teil 5.....	71
8.1	Laboruntersuchungen an Kompositproben	71
8.1.1	Herstellung von Laborkompositproben	71
8.1.2	Gewinnung von in situ-Kompositproben aus der 300 mm Bohrung.....	71
8.1.3	Gewinnung von in situ-Kompositproben aus dem Halbdamm.....	71
8.2	Hydraulische Kennwerte der Kompositproben	73
8.2.1	Permeabilität Laborkomposit.....	73
8.2.1.1	Effektive Gaspermeabilität - Laborkomposit.....	73
8.2.1.2	Lösungsp permeabilität - Laborkomposit.....	74
8.2.2	Effektive Gaspermeabilität - in situ-Komposit aus der 300 mm Bohrung.....	74
8.2.3	Effektive Gaspermeabilität - in situ-Komposit aus dem Bauwerk.....	75
8.3	CT-Charakterisierung des Kontakts.....	78
8.4	Hydraulische Kennwerte von Steinsalz und Sorelbetonen.....	79
8.4.1	Laboruntersuchungen – Ergebnisse zur effektiven Gaspermeabilität.....	79
8.4.2	Laboruntersuchungen - Ergebnisse zu Porosität und Porenraumsättigung..	80
8.4.2.1	Lösungsgehalt.....	80
8.4.2.2	Dichte.....	82
8.4.2.3	Porosität aus den Dichten.....	84
8.4.2.4	Porenraumsättigung.....	85
8.5	Einordnung der Permeabilitätswerte und Schlussfolgerungen.....	86
9	Technischer Anhang – Teil 6.....	91
9.1	Weiterführende Untersuchungen zur Porenraumstruktur.....	91

9.1.1	Steinsalz.....	91
9.1.1.1	Porosität und Porengrößenverteilung aus CT - Steinsalz.....	91
9.1.1.2	Porosität und Porengrößenverteilung aus MIP - Steinsalz.....	92
9.1.1.3	Diskussion der Ergebnisse CT /MIP - Steinsalz.....	95
9.1.2	Sorelbetone.....	97
9.1.2.1	Porosität und Porengrößenverteilung aus CT - A1-Basisrezeptur.....	97
9.1.2.2	Porosität und Porengrößenverteilung aus MIP - A1-Basisrezeptur.....	98
9.1.2.3	Gegenüberstellung verschiedener Verfahren - A1-Basisrezeptur.....	99
9.1.2.4	Porosität und Porengrößenverteilung aus MIP - modifizierte A1-Rezeptur.....	100
9.2	Kapillardruck und Sättigung.....	102
9.2.1	Kapillardruck in Abhängigkeit der Sättigung - Steinsalz.....	104
9.2.2	Kapillardruck in Abhängigkeit der Sättigung –A1-Basisrezeptur.....	105
9.2.3	Kapillardruck in Abhängigkeit der Sättigung - A1-modifizierte Rezeptur.....	106
10	Verzeichnisse.....	107
10.1	Quellen/Literatur.....	107
10.2	Abkürzungen.....	110
10.3	Formelzeichen, Variablen und Indizes.....	111
10.4	Abbildungen.....	112
10.5	Tabellen.....	118

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Datenblatt Injektionsschläuche Predimax® 11/19	120
Anlage 2	Technisches Datenblatt des Epojet LV	121
Anlage 3	Materialien	122
Anlage 4	Datenblatt Außenputzgewebe/Armierungsmatte	127
Anlage 5	Spaltzugfestigkeit	128
Anlage 6	Methodik – Ermittlung von Permeabilität und Porosität	130
Anlage 7	Untersuchungen am HZDR	141

Kurzfassung

In dem Forschungsvorhaben STROEFUN III wurde ein Konzept für die strömungstechnische Testung von Streckenverschlussbauwerken entwickelt, installiert und in einem Streckenverschlussbauwerk in der Grube Teutschenthal erfolgreich getestet. Das Testkonzept für Bauwerke oder Bauwerksabschnitte aus hydraulisch abbindenden Dichtbaustoffen basiert auf der Druckbeaufschlagung von mindestens 3 an der Streckenkontur installierten Ringkammern. Diese können individuell mit Gas und/oder Flüssigkeit im stationären oder instationären Druckregime beaufschlagt werden. Das Konzept konzentriert sich auf die Testung des Kontaktbereiches Baustoff/Gebirge als bestimmenden Strömungsraum für die Dichtwirkung von Streckenverschlussbauwerken. Im Ergebnis der modellbasierten Auswertung der im Test ermittelten Druckganglinien sind Aussagen über die Permeabilität des Bauwerkes im Kontakt Baustoff/Gebirge und daraus abgeleitet für die integrale Permeabilität des Bauwerkes möglich. Das Testkonzept ist ein zusätzlicher Baustein für den gegenständlichen, strömungstechnischen Funktionstest von Streckenverschlussbauwerken im Rahmen der Nachweisführung. Im Ergebnis des Forschungsvorhabens liegen umfangreiche Kenntnisse zum Standort und zum Bauwerk aus MgO-Baustoff (angelehnt an die A1-Basisrezeptur) vor. Dieser umfangreiche Kenntnisstand, die Zugänglichkeit und die Standortbedingungen bieten die Chance in der nahen Zukunft eine Vielzahl an Untersuchungen zur nachträglichen Vergütung des Bauwerkes mit Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung der Vergütung sowie zum zeitabhängigen Baustoffverhalten im Kontakt zur Atmosphäre und im Kontakt zur Salzlösung durchzuführen

Abstract

In the research project STROEFUN III a concept for the fluidic testing of closing structures was developed, installed and successfully tested on a closing structure at the Teutschenthal mine. The test concept for structures or sections of structures made of hydraulically settling sealing materials is based on the pressurization of at least 3 ring chambers installed on the drift contour. These can be individually pressurized with gas and/or liquid in a steady-state or transient pressure regime. The concept concentrates on testing the contact area between material and rock mass as the determining flow space for the sealing effect of drift closure structures. As a result of the modelbased evaluation of the pressure hydrographs determined in the test, statements can be made about the permeability of the structure in the contact between the building material and the rock mass and, derived from this, about the integral permeability of the structure. The test concept is an additional option for the fluidic functional test of drifts closure structures within the scope of verification of sealing effect. As a result of the research project, extensive knowledge is available on the location and the structure made of MgO-building material. This extensive knowledge, the accessibility and the site conditions offer the opportunity in the near future to carry out a large number of investigations on the subsequent improvement of the structure with assessment of the fluidic effect of the improvement as well as on the time-dependent behavior of the building material in contact with the atmosphere and in contact with the salt solution.

1 Einleitung

Für die Endlagerung von radioaktiven Stoffen untertage ist ein Multibarrierensystem vorgesehen, welches einen Austausch von Radionukliden zwischen der Biosphäre und den eingelagerten Stoffen verhindern soll. Dieses Multibarrierensystem setzt sich aus geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren zusammen.

Das Projekt STROEFUN III beschäftigte sich mit dem gegenständlichen Nachweis der strömungstechnischen Dichtheit von Streckenverschlussbauwerken (geotechnische Barrieren) aus kohäsiven Materialien.

Die herkömmlichen Konzepte für den Funktionsnachweis von errichteten Streckenverschlussbauwerken beruhen auf:

1. In situ-Permeabilitätsuntersuchungen zur
 - a. Charakterisierung des Gebirges im Einbaubereich des Dichtsegmentes für die Standortauswahl und die Festlegung des erforderlichen Gebirgsnachschnittes
 - b. Ermittlung der Permeabilität des verbleibenden Gebirgsmassives als Grundlage der Materialauswahl und Dimensionierung sowie der modellgestützten Prognose von Strömungsprozessen durch das Bauwerk (Funktionsnachweis)
2. Labortechnische Ermittlung der strömungstechnischen Eigenschaften der verwendeten Bau- und Dichtmaterialien
3. Lokale Testung des eingebauten Bauwerkes über Erkundungsbohrungen oder strömungstechnische Testung durch Druckkammern.

Die unter Punkt 1 und 2 genannten Untersuchungen sind immer erforderlich.

Die Beurteilung der Funktionalität erfolgt über einzelne Erkundungsbohrungen, die das Bauwerk schneiden (Punkt 3). Die Untersuchungsergebnisse ergeben punktuelle Aussagen zur strömungstechnischen Situation an den Durchstoßpunkten der Bohrungen durch das Bauwerk bzw. entlang der Bohrungen im Bauwerk. Um die Anzahl an Bohrungen in einem Dichtbauwerk zu minimieren, wird der Untersuchungsumfang auf wenige lokale Punkte im Bauwerk begrenzt. Die punktuelle Erkundung über wenige Bohrungen kann nur als eingeschränkt aussagekräftig für die Beurteilung der integralen Wirkung der Streckenverschlussbauwerke angesehen werden.

Die integrale Testung der Bauwerke über vorinstallierte Druckkammern in Streckenstummeln war in der Vergangenheit immer an Forschungsvorhaben gebunden. Die Beschränkung dieses Testkonzeptes auf Streckenstummel und der große bergtechnische Aufwand schlossen die Anwendung dieses Konzeptes für den gegenständlichen strömungstechnischen Funktionsnachweis von sicherheitsrelevanten installierten Streckenverschlussbauwerken aus.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des hier betrachteten Nachweiskonzeptes bildet die spezifische strömungstechnische Situation für Dichtsegmente aus kohäsivem Material (Zemente, Mörtel, Betone) im Kontakt zum Salinargebirge. Eine besondere Situation für die Abdichtung besteht in der Kontaktzone des Baustoffes zum Gebirge. Mit Ausnahme von MgO-basierten Baustoffen ist für zementbasierte Dichtmaterialien nicht von einer aktiven Dichtung durch Volumenzunahme, wie dies beim Einsatz von Bentonit als Dichtmaterial gezielt genutzt wird, auszugehen. Vielfach kommt es im Kontakt zum Gebirge zur Ausbildung eines Kontaktbereiches mit erhöhter Permeabilität, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

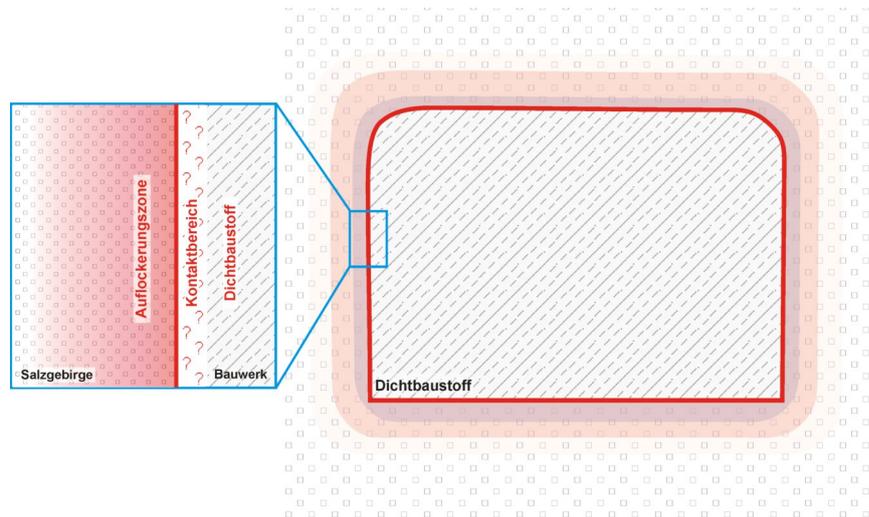


Abbildung 1: Schematische Darstellung Vertikalschnitt durch Dichtsegment mit Details zur Kontaktzone Baustoff/ Gebirge [1]

Die Ursachen für eine höhere Permeabilität sind vielfältig und überlagern sich. Diese sind unter anderem:

- a) auffahrungsbedingt durch die Meißeleinwirkung,
- b) thermische Expansion und Kontraktion von Gebirge und Baustoff im Verlauf des Temperaturregimes der Errichtung des Bauwerkes,
- c) Schwinden des Baustoffes im Verlauf der Abbindereaktion,
- d) Wechselwirkungen von Baukörper und Gebirgskontur (Zwangsbeanspruchungen).

Dies kann, räumlich begrenzt auf den Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge, lokal und über die Bauwerkslänge zu höher permeablen Wegsamkeiten führen, die die integrale Permeabilität des Gesamtbauwerkes bestimmen. Darüber hinaus sind diese Wegsamkeiten bestimmend für den Stofftransport und die Zeitdauer bis zum Durchtritt von gelösten Komponenten durch das Bauwerk.

Im Forschungsvorhaben „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereichs“ (FKZ: 02 E11748A, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) wurde ein Konzept für die integrale Testung von errichteten Streckenverschlussbauwerken zur gegenständlichen Beurteilung und gegebenenfalls dem Nachweis der strömungstechnisch dichtenden Wirkung entwickelt und dieses in einem Dammbauwerk in der Grube Teutschenthal installiert sowie erfolgreich getestet. Mit diesem Testkonzept wird der genehmigungsrechtlich begründeten Notwendigkeit und Forderung nach einem gegenständlichen Nachweis für die strömungstechnische Funktionssicherheit in Abhängigkeit von den Belastungsszenarien und den Anwendungsbedingungen des Streckenverschlussbauwerkes entsprochen [2].

Vor der abschließenden, erfolgreichen Testung des Dammbauwerkes, die im Hauptband zu diesem Vorhaben beschrieben ist, wurde eine Vielzahl von Voruntersuchungen und ergänzenden Untersuchungen durchgeführt, die - in Abhängigkeit vom Ergebnis - ggf. zu Anpassungen des Test- und Bauwerkskonzeptes führten. Diese sind in dieser Unterlage zusammengestellt. Weiterhin sind auch Ergebnisse beschrieben, die im Weiteren nicht genutzt wurden. Ggf. sind sie in einem anderen Kontext von Interesse.

2 Vorhabensbeschreibung - Grundlagen und Vorgehensweise

Die Errichtung von strömungstechnisch abdichtenden Streckenverschlussbauwerken ist im Salzbergbau eine wichtige Voraussetzung, um die Auswirkungen auf die Umwelt bei Nutzung der Grubenräume für die Einlagerung von umweltgefährdenden Stoffen/Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle zu minimieren. In diesem Zusammenhang ist der Nachweis der Funktionsfähigkeit der Streckenverschlussbauwerke eine wesentliche Voraussetzung für den Betrieb und/oder die Nutzung des untertägigen Hohlraumes für die Endlagerung.

Die Konzepte für die Nachweisführung der Dichtwirkung von Streckenverschlussbauwerken aus kohäsiven, MgO-basierten Materialien sollen hier in folgender Weise unterteilt werden:

- indirekte Methode: Ermittlung der für die Funktionsbeurteilung relevanten Eigenschaften des Gebirges und des Bauwerkes an Kernproben und aus in situ-Messungen als Grundlage der modellgestützten Simulation der Funktionsweise des Streckenverschlussbauwerkes
- direkte Methode: Strömungstechnische Testung des gesamten Bauwerkes oder relevanter Abschnitte des Bauwerkes über eine in situ-Druckbeaufschlagung

In der Vergangenheit erfolgte die Beurteilung von Streckenverschlussbauwerken vielfach aus einer Verknüpfung der indirekten und der direkten Methode. In Forschungsvorhaben und/oder großtechnischen Handhabungsversuchen wurden Streckenverschlussbauwerke im Maßstab und in der technischen Ausführung entsprechend der späteren praktischen Realisierung hergestellt, über Parameterermittlungen an Kernproben und über in situ-Untersuchungen charakterisiert und durch Druckbeaufschlagung getestet. Die Ergebnisse und Erfahrungen dieser Referenzbauwerke bilden dann die Grundlage der Handlungsvorgaben für die Errichtung der Streckenverschlussbauwerke in den Bergwerken – Praxisbauwerke. An diesen Bauwerken werden dann stichprobenweise die funktionsrelevanten Eigenschaften an Kernproben und in einzelnen in situ-Untersuchungen überprüft. Die Analogie der Herstellung des Referenzbauwerkes und der Praxisbauwerke, die Beurteilung und Einordnung der ermittelten Eigenschaften in den Erfahrungsstand und die modellgestützte Prognose der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes bilden dann die Grundlage für den Nachweis der strömungstechnischen Funktion.

Diese Vorgehensweise hat sich bewährt und bildet die Grundlage für die erfolgreiche Errichtung von Streckenverschlussbauwerken.

Von Seiten der Genehmigungsbehörden wird aktuell für ausgewählte Streckenverschlussbauwerke ein gegenständlicher Nachweis für die strömungstechnische Funktionssicherheit in Abhängigkeit von den Belastungsszenarien und den Anwendungsbedingungen des Streckenverschlussbauwerkes gefordert [2].

Ausgehend von diesem Sachstand, wurde in der 3. Phase des Forschungsvorhabens „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereichs“ ein Konzept für die integrale strömungstechnische Testung von errichteten Streckenverschlussbauwerken zur gegenständlichen Nachweisführung entwickelt, in einem Dammbauwerk aus MgO-basiertem Baustoff (angelehnt an die A1-Basisrezeptur [3], [4]) in der Grube Teutschenthal installiert und das Testkonzept angewendet. Das Testkonzept konzentriert sich aktuell auf Streckenverschlussbauwerke aus kohäsiven, hydraulisch abbindenden Materialien. Es ermöglicht, wenn erforderlich auch baubegleitend, die mehrfache Testung von Streckenverschlussbauwerken mit Gas und mit Flüssigkeit.

Vorauslaufend und begleitend zu der Entwicklung des Testkonzeptes wurden ergänzende und weiterführende Untersuchungen zu ausgewählten Sachverhalten durchgeführt, die in Abhängigkeit vom Untersuchungsergebnis ggf. zu Änderungen bzw. Anpassungen führten. Diese vorauslaufenden und ergänzenden Untersuchungen sind Gegenstand dieses Technischen Anhangs, während im Hauptband zu diesem FuE- Vorhaben „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches“ vorrangig eine Beschreibung des Dammbauwerks, seiner Errichtung und des gegenständlichen Testkonzeptes und der damit verknüpften Ergebnisse erfolgt.

Der Technische Anhang gliedert sich in 6 Teile, die die vorauslaufenden und ergänzenden Untersuchungen zu folgenden Themen enthalten:

- Teil 1 - Entwicklung und Optimierung des Messsystems
- Teil 2 - Injektionskonzept und injektionsmittel
- Teil 3 - MgO-Massenbaustoff A1 – Rezepturanpassung
- Teil 4 - Simulation der Temperaturentwicklung
- Teil 5 - Laboruntersuchungen an Kompositproben
- Teil 6 - Weitergehende Laboruntersuchungen zur Porenraumstruktur

Die in den Teilen 5 und 6 beschriebenen Ergebnisse wurden unter Einbeziehung von CT-Untersuchungen erzielt, die am Helmholtzzentrum Dresden Rossendorf (HZDR) durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen wurden in einem eigenständigen Projektbericht mit dem Titel „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches – Phase III: Vertiefung Kenntnisstand & Injektionsmittel, in situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B“ zusammengefasst. Er ist als Anlage 7 Bestandteil dieser Unterlage.

3 Versuchsbauwerk in Teutschenthal – realisiertes Testkonzept

Nachstehend erfolgt eine Kurzbeschreibung des Standortes, des realisierten Messkonzeptes und des Versuchsbauwerkes, um die Einordnung der einzelnen Teile dieses Technischen Anhangs in das Gesamtprogramm auf einfache Weise zu ermöglichen.

Die detaillierte Beschreibung des Bauwerks und seiner Testung findet sich im Hauptband „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches“.

3.1 Standortcharakterisierung

Die Grube Teutschenthal wird dem Halleschen Kalilagerstättenrevier zugeordnet. Der Versuchsstandort befindet sich in der Nordflanke des herzynisch streichenden Teutschenthaler Sattels mit flachem Einfallen der ruhig abgelagerten Schichten des Staßfurt-Steinsalzes mit 200-300 m Mächtigkeit und des carnallitischen Kaliflozes Staßfurt.

Der Versuchsstandort des Projektes STROEFUN III befindet sich im schachtnahen Steinsalzaltfeld des Grubenfeldes Teutschenthal, etwa 500 m vom Schacht Teutschenthal entfernt. Das Steinsalzaltfeld und das angrenzende Lehrrevier werden durch Übergangsschichten und das Staßfurt-Kalilager (K2) im Hangenden überdeckt. Die Überdeckung beträgt etwa 50 m bis 80 m zwischen den Grubenbauen im Steinsalzaltfeld und denen im Kalilager. Aus gebirgsmechanischen Messungen ist bekannt, dass das Steinsalzaltfeld durch das überdeckende Kaliabbaufeld eine leichte Entlastung aufweist. Der Versuchsort STROEFUN III liegt im südlichen Randbereich des Steinsalzaltfeldes und geringfügig außerhalb der Überdeckung durch das hangende Kaliabbaufeld.

Der Versuchsort befindet sich am Streckenende einer im April/Mai 2019 mit einer Teilschnittmaschine aufgefahrenen Blindstrecke. Diese liegt gegenüber der Versatzkammer 14 in einer Teufe von ca. 678 m (– 568 mNN). Die Versuchsstrecke wurde mit einer Länge von 25 m, einer Höhe von 4,5 m und einer Breite von 3 m bzw. von 2,5 m aufgefahren. Die Position der Versuchsstrecke kann Abbildung 2 entnommen werden.

Die Blindstrecke des Versuchsortes verläuft von der Streckenmündung im Nordosten (NE) zur Ortsbrust (hinterer Stoß) im Südwesten (SW). Die Blickrichtung zum hinteren Stoß ist die Referenz für lokale Richtungsangaben. Danach liegen der rechte Stoß auf der Nordwestseite (NW) und der linke Stoß auf der Südostseite (SE) der Blindstrecke.

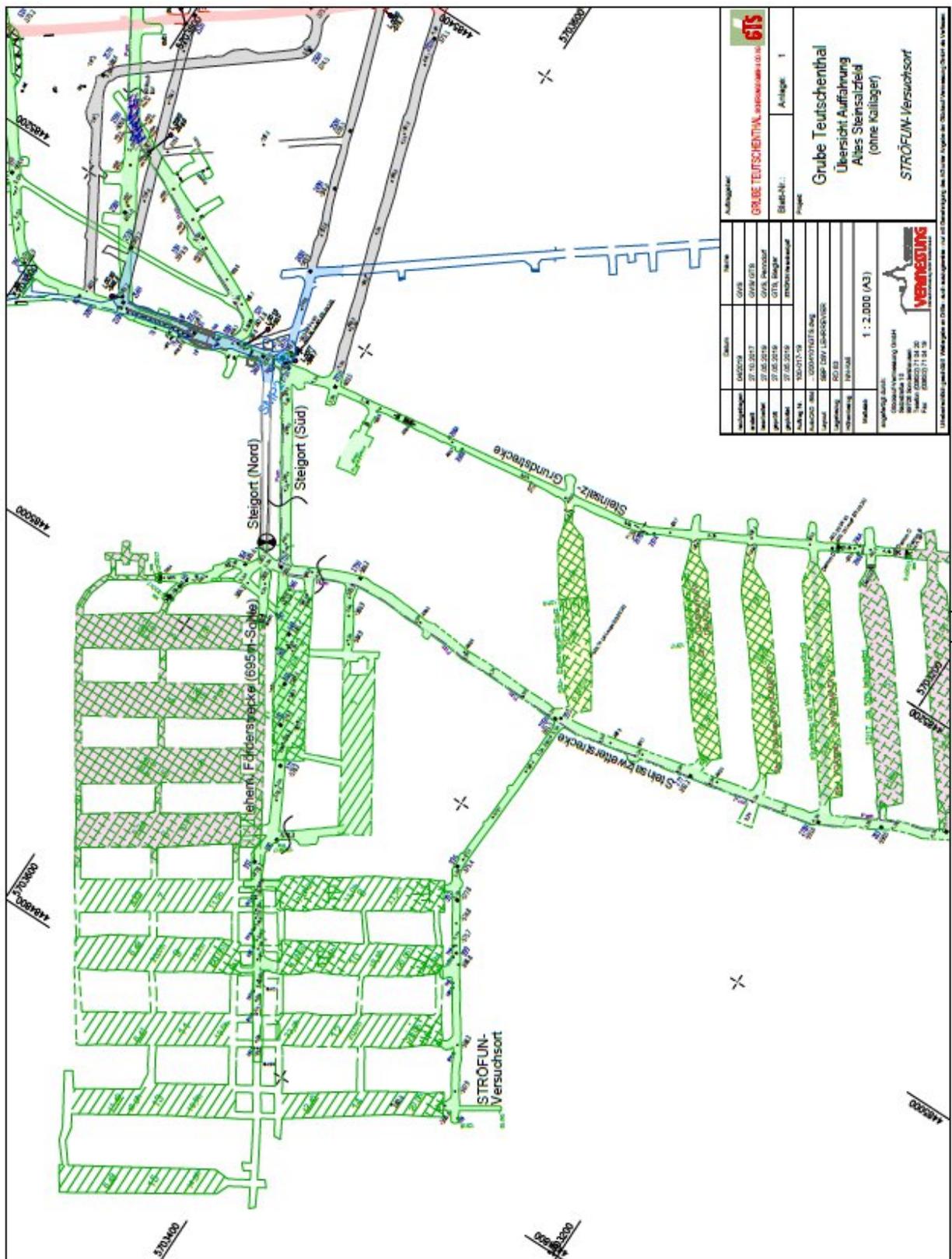


Abbildung 2: Übersicht über die Auffahrungen am Standort des Versuchsbauwerkes [5]

3.2 Beschreibung des realisierten Messkonzeptes und des Versuchsbauwerkes

Die Erfahrungen zeigen, dass die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge zumindest anfangs bestimmend für die Dichtwirkung des Bauwerkes ist, wenn angenommen wird, dass der

Baustoffkörper unter Anwendung betontechnologischer Maßnahmen und Qualitätskriterien mit hinreichend geringer Permeabilität hergestellt wird. Im Vergleich zur strömungstechnischen Transportwirksamkeit der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge ist die strömungstechnische Transportwirksamkeit des Baustoffkörpers daher als gering einzuordnen.

Bereits in der Phase I wurde das Konzept für einen „Strömungstechnischen Funktionsnachweis“ entwickelt [1], [6]. Danach sollte ein Testsystem in das zu testende Bauwerk integriert werden, mit dessen Hilfe ein gegenständlicher Funktionsnachweis zur strömungstechnischen Wirkung erbracht werden kann. Das zu entwickelnde Nachweiskonzept sollte prinzipiell für alle Wirtsgesteine in Verbindung mit kohäsiven Abdichtmaterialien geeignet sein.

In den ersten Studien wurde ein System aus 3 radial umlaufenden, über das Dichtsegment verteilten Rohrleitungen (Ringkammern) diskutiert, welche in definierten Abständen in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge umlaufend installiert werden.

Bei der Testung fungieren die Ringkammern als Druckkammern bzw. als Beobachtungs- / Kontrollkammern. Eine Ringkammer, z.B. die mittlere Ringkammer wird mit einem Fluiddruck (Gas oder Flüssigkeit) beaufschlagt. Der axiale Abstrom wird in den beiden benachbarten Kontrollkammern über den sich einstellenden Druckverlauf beobachtet. Grundsätzlich kann auch jeweils eine der äußeren Kammern beaufschlagt und die Ausbreitung des Testfluids in den beiden anderen Kammern beobachtet werden. Der Anschluss der Ringkammern sollte gemäß den ersten Konzeptplanungen über eine Befüllbohrung im Sohlbereich und eine Entlüftungsbohrung im Firstbereich erfolgen. Der Anschluss der Ringkammern innerhalb der Bohrungen sollte mit einem entsprechend langen Mehrfachpackersystem erfolgen.

Das ursprüngliche Konzept wurde verworfen und statt der Rohrleitungen ein System aus Schlauchkammern mit Anschluss über eine temporäre Verrohrung gewählt, deren Entwicklung in diesem Technischen Anhang Teil 1 detailliert beschrieben ist. Das System wurde als flexibler einsetzbar angesehen, wobei insbesondere die technische Realisierung der ursprünglich vorgesehenen Bohrungen, welche die drei Ringkammern nach der Betonage anschließen, als risikobehaftet angesehen wurde. Das Risiko und die negativen Auswirkungen einer evtl. fehlerhaften Anschlussbohrung wurden im Vergleich zu einer temporären Verrohrung höher eingeschätzt, da die Verrohrung vor der Betonage getestet und ggf. einfach nachgebessert werden kann. Die Handlungsoptionen beim nunmehr erforderlichen Rückbau der Verrohrung werden generell als flexibler als bei der Anwendung von Mehrfachpackern angesehen.

Das ursprüngliche Projekt wurde in den Phasen 1 und 2 für den Baustoff Salzbeton konzipiert, dessen Schwinden eine Injektion des Kontaktes nahelegte, um ein funktionsfähiges Bauwerk zu erhalten [1], [6]. Der wissenschaftliche und ingenieurtechnische Kenntnisszuwachs im Zusammenhang mit der Planung von Streckenverschlussbauwerken hat im Projektverlauf zur Priorisierung von MgO-basierten Baustoffen geführt [7], [8]. Die Volumenzunahme dieser Baustoffe im Abbindeverlauf macht theoretisch eine Injektion der Kontaktzone nicht mehr grundsätzlich erforderlich. Da jedoch auch bei Verwendung von MgO-Baustoff die unterschiedlichen Belastungsszenarien „frühe und schnelle Druckbeaufschlagung mit Salzlösung“ und „späte Druckbeaufschlagung mit Salzlösung“ nach einigen hundert bis tausend Jahre zu berücksichtigen sind, wurde trotzdem eine Installation von Injektionsschläuchen für eine Ringinjektion vorgesehen, um während der geplanten Testungen des Bauwerks Handlungsoptionen zu haben, die potenziellen Belastungsszenarien abzudecken und so die Möglichkeit zu schaffen, die Kontaktzone gezielt mit Injektionsmitteln zu beeinflussen und die sich einstellenden Auswirkungen anhand von weiteren Testungen zu quantifizieren. Ergebnisse von Voruntersuchungen zu Injektionsmitteln und zur Injektionsplanung finden sich im Technischen Anhang Teil 2.

Im Rahmen dieser 3. Projektphase wurde das Testkonzept für den gegenständlichen in situ-Funktionsnachweis in einem großtechnisch errichteten Pilotbauwerk in der Grube Teutschenthal der GTS-Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG realisiert, Abbildung 3.

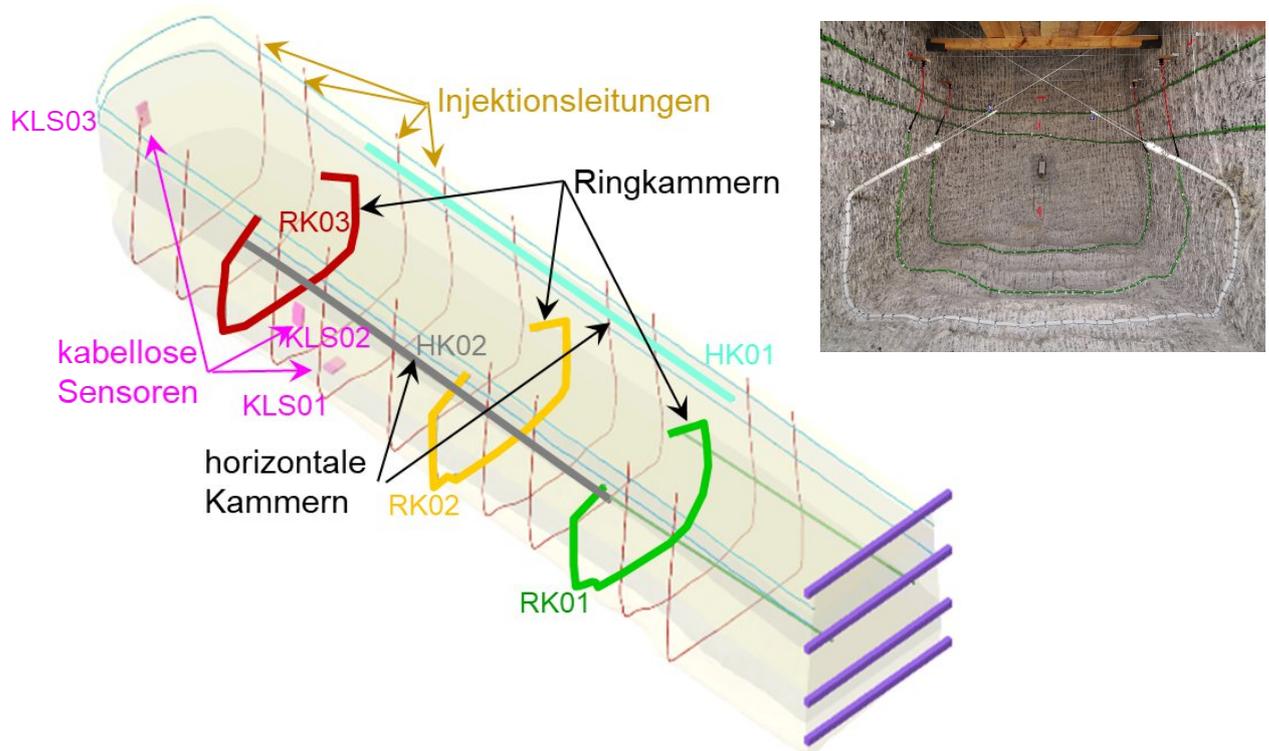


Abbildung 3: Realisiertes Testkonzept und seine Umsetzung in situ

In einem neu aufgefahrenen Streckenstummel mit einer Firsthöhe von ca. 4,5 m im Steinsalztaffel der Grube Teutschenthal wurde ein 15 m langer, 2,5 m bis 3,1 m breiter und ca. 2,4 m hoher Halbdamm aus MgO-Baustoff im Ortbetonbauweise errichtet. Die Form des Halbdammes wurde mit dem Ziel der Schaffung einer Zugänglichkeit zu der Oberfläche des Damms und zu den seitlichen Kontaktflächen zwischen Gebirge und Bauwerk gewählt. Die Ausführung des Bauwerkes als Halbdamm war hinreichend für die Anwendung des Testkonzeptes und ermöglicht vielfältige weitere Untersuchungen an dem Bauwerk. Durch eine ca. 6° Neigung der Stöße im Einbaubereich wurden die Voraussetzungen für die gebirgsmechanische Einspannung des Bauwerkes geschaffen. Durch eine Armierung nahe der Oberfläche wurden dort die Dehnungen behindert. An der luftseitigen Stirnfläche wurde für die Betonage eine Schalung errichtet. Da auf ein für Dichtbauwerke aus MgO-Baustoff typisches massives Widerlager verzichtet wurde, wurde auch hier eine Armierung eingebaut. Abbildung 3 zeigt schematisch das realisierte Messsystem, die Injektionsleitungen und die Schalungsträger. Aufgrund der Zielsetzung auch Injektionstests durchzuführen, erfolgte vor Betonage des Halbdammes kein Nachschnitt der Streckenkontur. Die geometrische Position des Halbdammes in dem Streckenstummel kann Abbildung 4 entnommen werden, die geometrischen Parameter des Halbdammes sind in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Geometrische Daten des Halbdamms (Ist-Werte)

Länge	15,7	m
mittlere Höhe	2,37	m
Volumen	102,19	m ³
Oberfläche	39,73	m ²
Stirnfläche	6,44	m ²
Kontaktfläche zum Gebirge	121,00	m ²
mittlere Querschnittsfläche	6,51	m ²

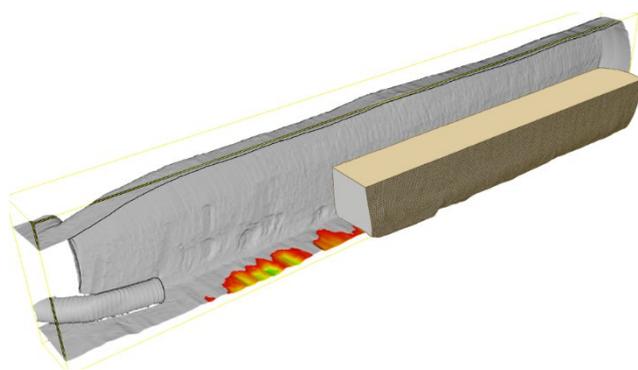


Abbildung 4: Positionierung des Halbdamms in der Versuchsstrecke (links) / Blick in Richtung Ortsbrust überlagert mit Dreiecksvermaschung (rechts)

Vor Betonage des Halbdamms mussten die Ausgangsstoffe für den MgO-Baustoff am Markt¹ beschafft werden, wobei sich zeigte, dass die verfügbaren Ausgangsstoffe zum Teil von den Vorgaben für die A1-Basisrezeptur abwichen. Weiterhin musste die üblicherweise großtechnisch produzierte A1-Basisrezeptur² an die kleinskaligere Misch- und Fördertechnik in Teutschenthal angepasst werden. Die Anpassung erfolgte mit Hilfe von Labor- und Technikumsversuchen, die in Teil 3 des Technischen Anhangs beschrieben sind.

Im Ergebnis wurde für die Betonage des Halbdamms in Teutschenthal deshalb eine modifizierte A1-Rezeptur verwendet.

Aufgrund der geometrischen Daten des Halbdamms und der frisch in frisch Betonage darf die durch die Erhärtung bedingte Wärmefreisetzung nicht vernachlässigt werden. Da für den Sorelbeton A1-Basisrezeptur ein Simulationsmodell verfügbar ist, wurde dieses für eine Prognose der Temperaturentwicklung im Halbdamm genutzt und an Hand von Temperaturmessdaten an die modifizierte A1-Rezeptur angepasst. Das Vorgehen bei der Anpassung und die Simulationsergebnisse sind in Teil 4 des Technischen Anhangs angegeben.

Die laborative strömungstechnische Charakterisierung der Kontaktzone fand an zylindrischen Kompositproben, deren eine Hälfte aus einem Salzkern und die andere Hälfte aus Baustoff bestand, statt. Diese Kompositproben wurden sowohl künstlich im Labor hergestellt als auch in situ als Bohrkern, der die Kontaktzone enthielt, gewonnen. Die Ergebnisse der

¹ Bedingt durch die Corona-Pandemie waren die Lieferketten insbesondere nach China unterbrochen oder ganz ausgesetzt.

² Aufgrund der vorliegenden großtechnischen Erfahrungen diente die in der SchachtanlageASSE verwendete A1-Rezeptur als Ausgangsbasis für die Rezepturanpassung. Sie wird im Folgenden als A1-Basisrezeptur bezeichnet.

strömungstechnischen Charakterisierung der Kompositproben finden sich in Teil 5 des Technischen Anhangs.

In Teil 6 des Technischen Anhangs werden abschließend exemplarische, weiterführende Untersuchungen zur Porenraumstruktur beschrieben und die Untersuchungsergebnisse angegeben.

3.3 Virtuelles CAD-Standortmodell

Direkt Im Anschluss an die Auffahrung wurde die Strecke mittels des terrestrischen 3d-Scanners Profiler 5003 der Firma Z+F aufgenommen und ein 3d-Modell erstellt. Durch die Bearbeitung der Dateien wurden Dreiecksvermaschungen im OBJ- und DXF-Format erzeugt mit 10 mm und 20 mm Punktabstand. Die 3d-Daten wurden in eine CAD-Software überführt und als Basis für ein als virtuelles Standortmodell verwendet, dem sukzessive weitere Objekte hinzugefügt wurden.

Anhand des 3d-Modells konnten die geometrischen Parameter des Halbdamms abgeleitet werden. In Abbildung 4 links ist die Positionierung des Halbdamms im Standortmodell dargestellt, rechts ist eine Überlagerung eines Fotos und der Scandaten zu sehen. Weiterhin wurden in das virtuelle CAD-Standortmodell die weiteren, im Rahmen des STROEFUN III erstellten Objekte am Standort wie Messstellen und Untersuchungsbohrungen integriert.

Anhand dieses 3d-Modells wurden sämtliche Planungen zur Instrumentierung durchgeführt, was sich als sehr vorteilhaft für die späteren Installationsarbeiten zur Instrumentierung, z.B. der Ringkammern erwies. Auch nach der fertiggestellten Installation des Messsystems wurde der Standort kurz vor der Betonage mittels einer Leica TRC360 aufgezeichnet. Dadurch konnte der finale Einbauzustand der Instrumentierung mit einer 3d-Punktgenauigkeit von 2,9 mm bei einer Messentfernung von 20 m erfasst werden.

Das abschließend vorhandene virtuelle CAD-Standortmodell mit seinen Objekten ist in Abbildung 5 exemplarisch dargestellt.

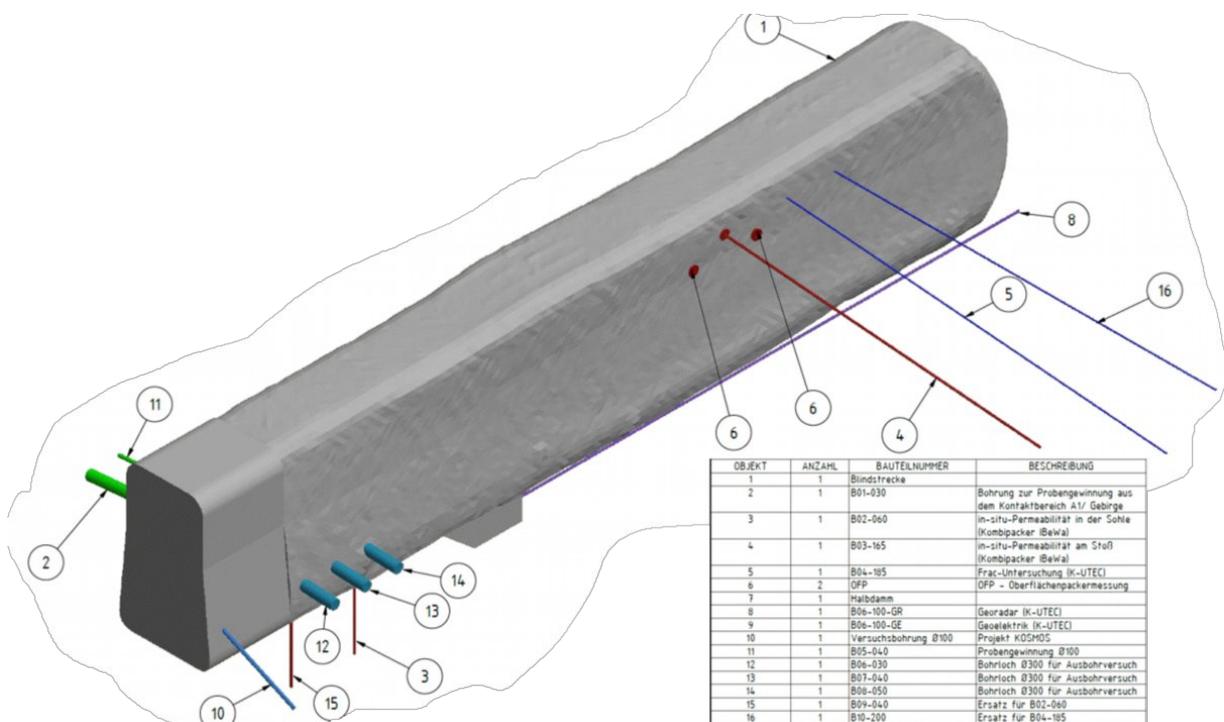


Abbildung 5: Virtuelles CAD-Standortmodell mit Bohrungen und OFP-Messstellen (siehe Legende). Objekt Nr. 7 und Nr. 9 sind verdeckt und daher nicht sichtbar.

4 Technischer Anhang – Teil 1

4.1 Entwicklung und Optimierung des Messsystems

4.1.1 Funktionsprinzip

Das ursprüngliche technologische Konzept der Ringkammern und deren Anschluss im Bauwerk wurden im Forschungsprojekt stark angepasst und optimiert. Die maßgeblichen Ursachen für diese Weiterentwicklung waren:

- die Herausforderungen für zwei zielgenaue Bohrungen über jeweils 3 Ringkammern hinweg,
- die Anwendung einer praxistauglichen Einbautechnologie,
- das Erfordernis der Dichtheit/Wiederverwendbarkeit der Ringkammern nach einer Vergütung/Injektion der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge („steuerbare Permeabilität“ der Ringkammern).

Der letzte Punkt ergibt sich aus der Zielstellung, dass das Testsystem auch nach Abdichtungsinjektionen im Kontaktbereich des Bauwerks weiterhin anwendbar sein muss. Da das Ziel von Abdichtungsinjektionen die Reduzierung von Wegsamkeiten und von vorhandenen Hohlräumen ist, besteht die Gefahr, dass durch eine erfolgreiche Abdichtinjektion die vorhandenen Prüf- und Kontrollkammern aufgefüllt und verschlossen werden. Das Testsystem wäre damit nach einer erfolgreichen Abdichtinjektion nicht mehr vorhanden bzw. nutzbar.

Für diese Anforderung wurde ein Ringkammersystem entwickelt, dass von außerhalb bei Bedarf geöffnet und geschlossen werden kann.

Das Ringkammerkonzept beruht auf der Entwicklung einer Schlauchkammer aus einem Gewebeschlauch \varnothing 29 mm (Polypropylen oder Glasfaser) mit einem integrierten Packerschlauch aus NBR (Abbildung 6).

Der Gewebeschlauch bildet die Außenwand der Ringkammer und ist permeabel für Gas und Flüssigkeiten. Der innenliegende Packerschlauch ist expandierbar und hat dadurch eine formgebende Funktion während der Betonage sowie eine abdichtende Funktion während bspw. einer Injektion.



Abbildung 6: Gewebeschlauch mit innenliegendem Packerschlauch

Die Steuerung der Schlauchkammern erfordert daher mindestens 2 Anschlüsse. Dazu wurden spezielle Anschlussstücke (Abbildung 7) entwickelt, welche eine Ansteuerung des

Packerschlauches sowie des außen liegenden Gewebemantels ermöglichen. In der Abbildung 8 ist der Prototyp eines Anschlussstücks mit expandiertem Packerschlauch dargestellt.



Abbildung 7: Prototyp des Anschlussstücks mit installiertem Packerschlauch (der Gewebeslauch ist zur Ansicht zurückgezogen).

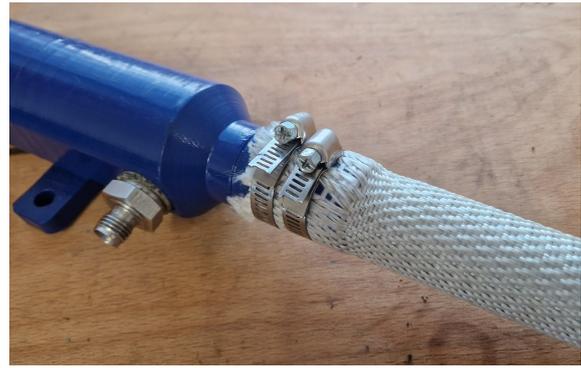


Abbildung 8: Prototyp des Anschlussstücks mit expandiertem Packerschlauch / Gewebeslauch.

Durch das Expandieren des Packerschlauches wird für den Zeitraum der Installation und der Betonage die Schlauchkammer in der gewünschten expandierten Form gehalten. Der Gasdruck wird bis zum Erreichen der Frühfestigkeit des Betons aufrechterhalten. Mit der Druckentlastung fällt der Packerschlauch zusammen und der entstehende Hohlraum bildet den benötigten Prüfraum/die Kammer für die Testung des Bauwerkes. Der durchlässige Gewebemantel kleidet von innen den verbleibenden Prüfraum aus. Mit jeder erneuten Expansion/ Druckentlastung des Packerschlauches kann der Prüfraum „geöffnet“ / „geschlossen“ werden.

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 9 bis Abbildung 11) ist die Funktion der Anschlussstücke bei den verschiedenen Betriebszuständen der Schlauchkammer dargestellt.

In der Abbildung 9 ist der Zustand während der Installation / Betonage dargestellt. Der Packerschlauch ist durch ein Druckmedium (pink dargestellt) voll expandiert, wodurch auch der Gewebeslauch vollständig expandiert ist. Der Expansionsdruck von bis zu 3 bar wird in dieser Phase (bis zum Erhärten des Betons) vom Gewebeslauch getragen. Die Konstruktion ist so gestaltet, dass der Packerschlauch gleichzeitig auch den Anschluss der Testleitung (Testmedium blau dargestellt) verschließt.

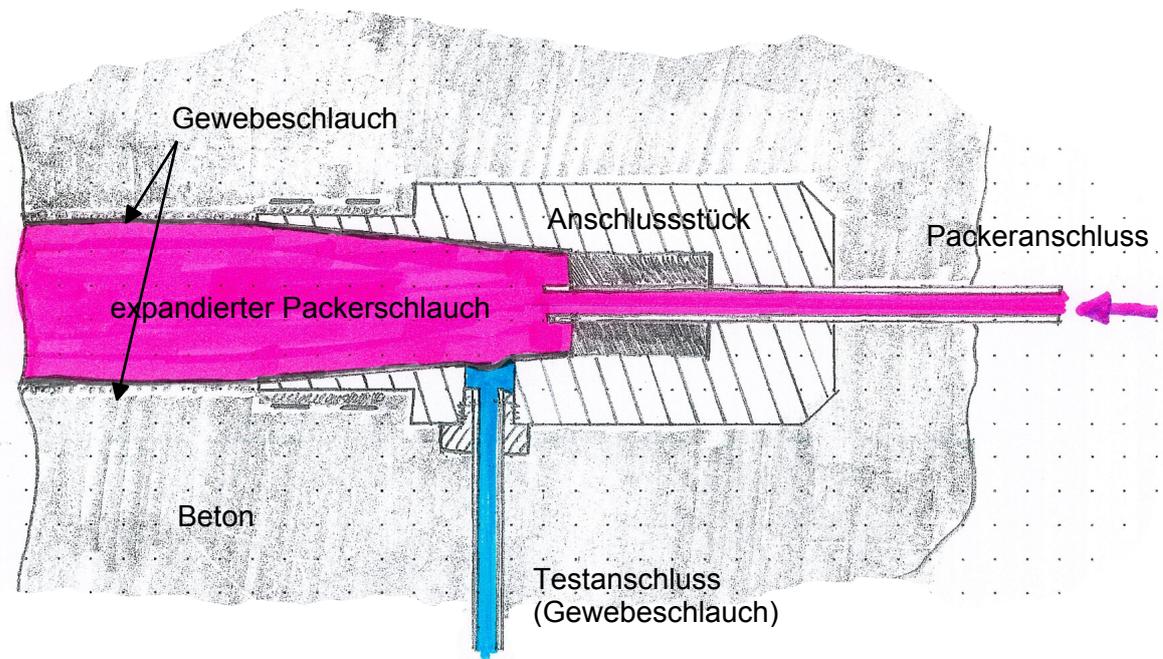


Abbildung 9: Anschlussstück im Zustand des gesetzten Packerschlauchs (Schnittdarstellung)

Mit der Druckentlastung fällt der Packerschlauch in sich zusammen und gibt auch den Anschluss der Testleitung frei (Abbildung 10). Bei einer gleichzeitigen Druckbeaufschlagung wird die Verdrängung des Druckmediums im Packerschlauch unterstützt. Ab diesem Zeitpunkt ist auch der umgebende Beton bzw. die angrenzende Kontaktzone strömungstechnisch an die Testleitung angekoppelt.

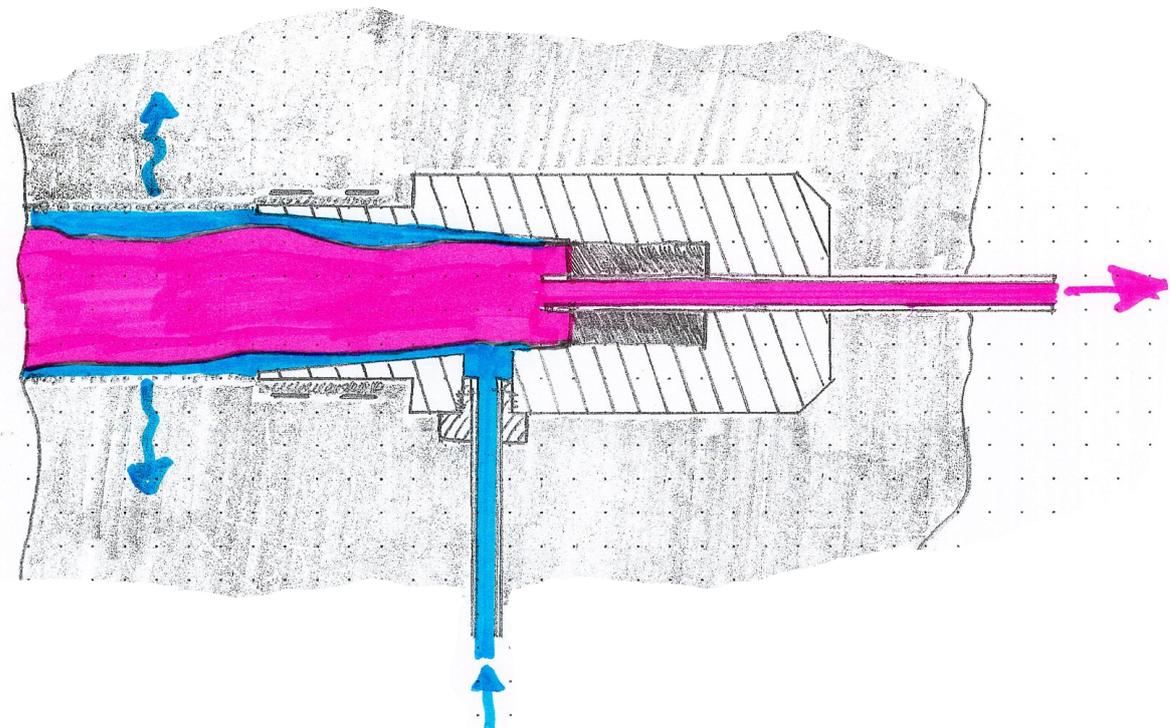


Abbildung 10: Anschlussstück im Zustand des Übergangs vom Entlasten des Packers zur Beaufschlagung des Gewebeschlauchs (Testung)

Mit dem steigenden Druck im Prüfraum des Gewebeschlauchs wird der Packerschlauch vollständig entleert, womit nahezu das vollständige Volumen³ des Gewebeschlauchs für die Testung zur Verfügung steht (Abbildung 11).

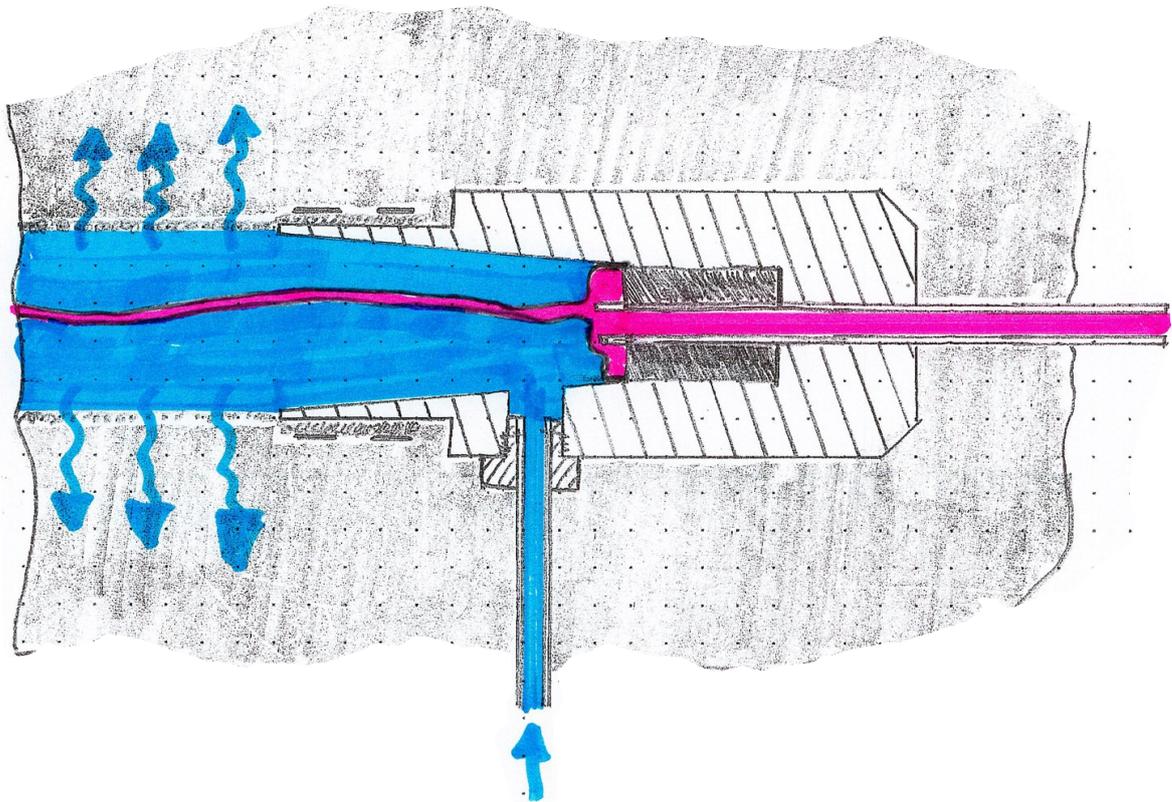


Abbildung 11: Anschlusstück im Zustand des Testvorganges

Wenn eine Zirkulation der Druckmedien im Packerschlauch und im Gewebeschlauch nötig bzw. gewünscht ist (z.B. um eine Entlüftung zu erreichen), muss der Ringkammerschlauch an beiden Enden mit einem Anschlusstück versehen werden. Diese Variante wurde auch im Projekt realisiert, was zur Folge hatte, dass jede Schlauchkammer mit 4 Anschlussleitungen versehen werden musste.

Im optimalen Anwendungsfall werden nur 3 Anschlussleitungen benötigt. Dabei wird nur der Prüfraum (Gewebeschlauch) über 2 Leitungen angeschlossen. Diese 2 Anschlüsse sind nötig, da nach beendeter Testung des Bauwerks die Schlauchkammern mit einem Injektionsmaterial verpresst bzw. dauerhaft verschlossen werden und dabei eine Entlüftung benötigt wird.

³ abzüglich des Volumens des zusammengedrückten Packerschlauchs (0,6 mm Wandstärke)

4.1.2 Halbtechnische Testung der Schlauchkammern

Um das Design der Anschlussstücke zu erproben und zu optimieren, wurde eine Vielzahl von Prototypen mit Hilfe von 3D-Druck aus Kunststoff gefertigt. Ursprünglich war sogar vorgesehen, auch am Demonstrationsbauwerk mit 3D-gedruckten Bauteilen zu arbeiten. Es zeigte sich jedoch, dass eine Herstellung von ausreichend gasdichten 3D-gedruckten Kunststoffteilen nicht gelang. Trotzdem war der 3D-Druck eine wertvolle Hilfe bei der Optimierung des Designs der Anschlussstücke.

Um das gesamte Schlauchkammersystem zu erproben, zu optimieren sowie die Grenzen der Leistungsfähigkeit zu testen, wurden halbtechnische Versuche durchgeführt.

Dabei wurden kurze (ca. 1 m) Abschnitte des Schlauchkammersystems zwischen 2 armierten Betonplatten einbetoniert. Für diese Tests wurde herkömmlicher Estrichbeton mit einer Zuschlagkörnunggröße 0/8 mm aus dem Baumarkt verwendet.

Es erfolgte zuerst die Betonage der unteren Betonplatte mit ca. 20 cm Stärke, wobei in einem dichten Raster Bewehrungsstähle gegen die Zugbelastung aus der zukünftigen Betonagefuge eingebaut wurden.

Als Zugbewehrungsstähle wurden praktischerweise Holzschrauben mit 35 cm Länge verwendet (siehe Abbildung 12), welche vor der Betonage der unteren Betonplatte senkrecht in die Schalung eingedreht wurden. Danach wurde die zu testende Installation auf der Oberseite der Betonplatte zwischen die herausragenden Bewehrungsstähle installiert (Abbildung 12). Gleichzeitig wurden beiderseits parallel Injektionsschläuche verlegt und im Anschluss die obere Betonplatte aufbetoniert. In der Abbildung 13 ist ein 3D-gedrucktes Anschlusselement der Ausgangsseite der Schlauchkammer mit den dazugehörigen Anschlüssen dargestellt.

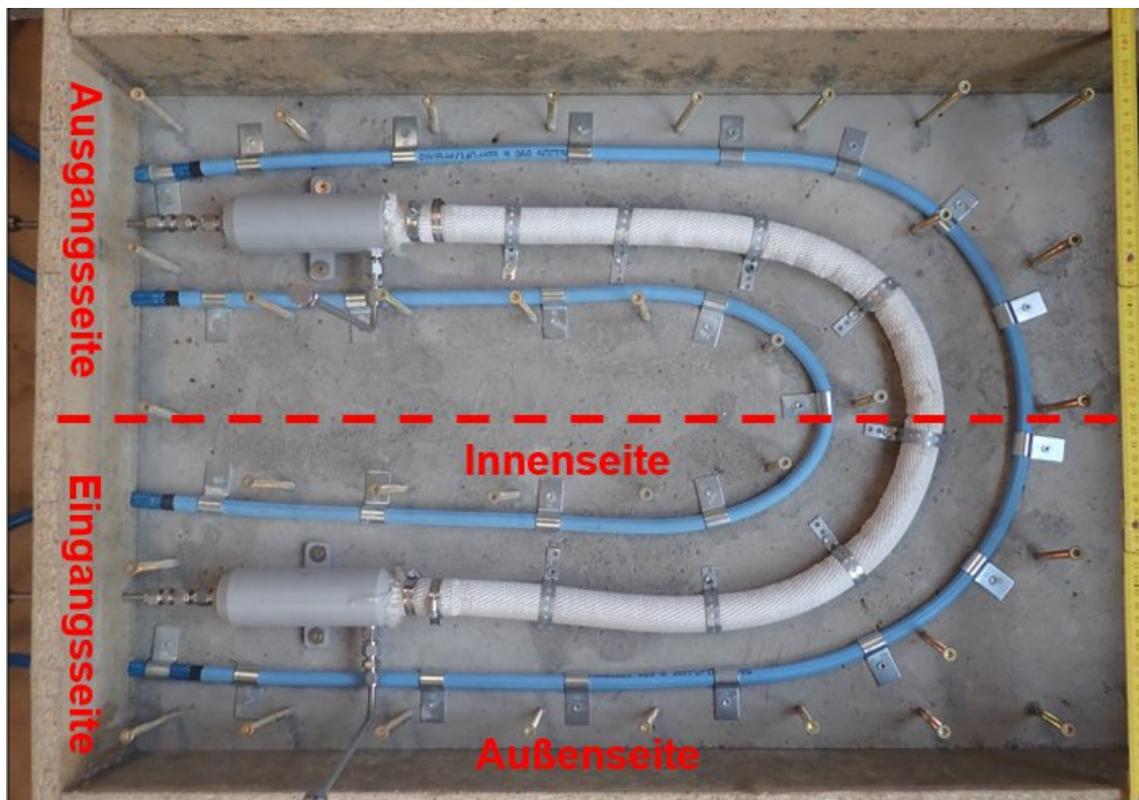


Abbildung 12: Aufbau des Vorversuchs (Zustand vor der Betonage der oberen Betonplatte)

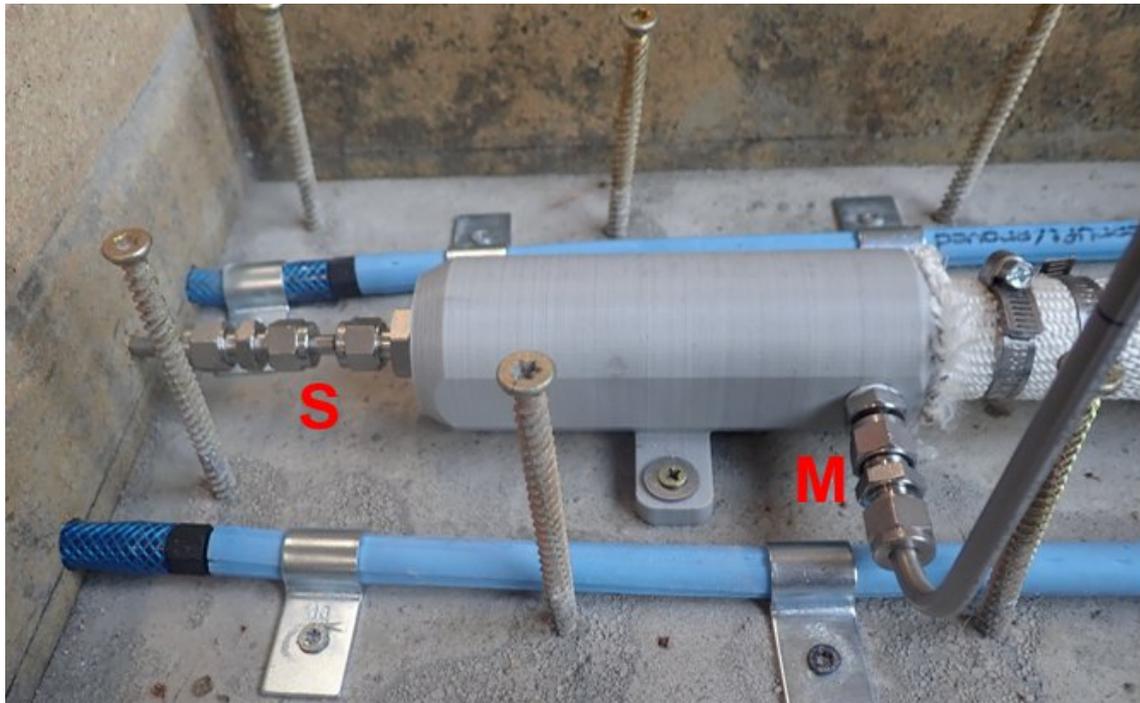


Abbildung 13: Anschlusselement der Schlauchkammer mit den Anschlüssen für den Packerschlauch (S) und für den Gewebemantel (M)

Im Rahmen der Testung des Schlauchkammersystems wurden die Injektionsschläuche mit Epoxidharz bei Injektionsdrücken von bis zu 40 bar injiziert. Die Vorversuche wurden teilweise nachträglich bei dem Rückbau untersucht. Um die Verschiebung bzw. Hebung der oberen Betonplatte zu überwachen, wurde mittig auf der Betonoberfläche eine Messuhr positioniert.

Das Ziel des halbtechnischen Testprogramms war es, ein Verständnis für die Handhabung des Schlauchkammersystems zu entwickeln. Dadurch sollten Erfahrungen zu den möglichen Effekten bei unterschiedlichen praxisnahen Anwendungsbedingungen gesammelt werden.

Die wichtigsten Ergebnisse der halbtechnischen Tests waren

- volumenstabile Betonage des Schlauchkammersystems an Bauwerksfugen erprobt,
- Funktionsprinzip des steuerbaren Schlauchkammersystems nachgewiesen,
- Setzdrücke der Packerschläuche im nicht betonierten Zustand bis 0,4 MPa erprobt,
- Setzdrücke der Packerschläuche im einbetonierten Zustand bis mind. 5,0 MPa möglich (Betonversuchsaufbau versagte bei 8,1 MPa),
- ausreichende Einbindung in den Beton und Anbindung des Gewebeschlauchs an die Fuge,
- Detektion der Anströmung von Injektionsmaterial an die Schlauchkammer durch Überwachung des Packerdruckes während einer naheliegenden Injektion,
- Ermittlung des effektiven Volumens der permeablen Schlauchkammer durch Drucktests bzw. Gasentspannungstests am Packerschlauch.

Dieser Kenntniszuwachs war eine wichtige Hilfe bei der konstruktiven Optimierung der Anschlusselemente sowie der Planung der Installation und Verlegung. Auch die Tests zu den Anwendungsgrenzen waren essenziell für die sichere großtechnische Realisierung bei einem errichteten Dammbauwerk.

4.1.3 Anschluss der Ringkammerschläuche

Der Anschluss der Ringkammern erfolgte mit handelsüblichen Kunststoffrohren (PP-R) für Wasser- und Druckluftinstallationen. Für dieses Rohrmaterial wurde ein einfaches Überbohren zum Rückbau erwartet. Folgende Eigenschaften und Vorteile sprechen für die Auswahl der Kunststoffrohre:

- Aussendurchmesser 40 mm,
- Innendurchmesser 26,6 mm,
- beständig gegen konz. Salzlösungen,
- max. Druck 2,5 MPa (bei 70 °C),
- max. Temperaturen 95 °C (139 °C Schmelztemperatur),
- druckdichte Verbindung durch Muffenschweißen,
- baustellentauglich und langjährig bewährt.

Die Anschlussrohre werden vor der Betonage im künftigen Dichtsegment mit einer Neigung von ca. 3° installiert. Nach der Beendigung der Testungen sollen die Kunststoffrohre überbohrt und auf der gesamten Zuleitungslänge geraut werden. Danach erfolgt die qualitätsgerechte Verfüllung der verbleibenden Bohrlöcher (z.B. mit dem Dichtbaustoff des Bauwerkes), wobei die Neigung der Rohre vorteilhaft bzw. notwendig ist.

Die dichte Anbindung der Kunststoffrohre mit dem Baustoff und auch die Gasdichtheit des Rohrsystems an sich, sind eine wichtige Voraussetzung für die Funktion des Messsystems. Deshalb wurden halbtechnische Tests im Labor und in situ in großkalibrigen Versuchsbohrungen durchgeführt (siehe Abbildung 5).

Um im Vorfeld die Gasdichtheit des verwendeten Kunststoffrohrsystems mit verschweißten Anschlüssen zu testen, wurde ein Rohrdummy hergestellt. Dieser wurde mit Gasdruck (Druckluft) beaufschlagt und die Druckganglinie über ca. 20 h aufgezeichnet (Abbildung 14). In diesem Zeitrahmen wurde ein Druckabfall von rund 15 kPa aufgezeichnet. Da auch eine Temperaturabnahme von rund 1,5 K in der Versuchsumgebung erfasst wurde, konnte auf der Grundlage des Vergleiches der Ganglinien eine hinreichende Dichtheit festgestellt werden. Abbildung 15 zeigt exemplarisch einen Rohrdummy.

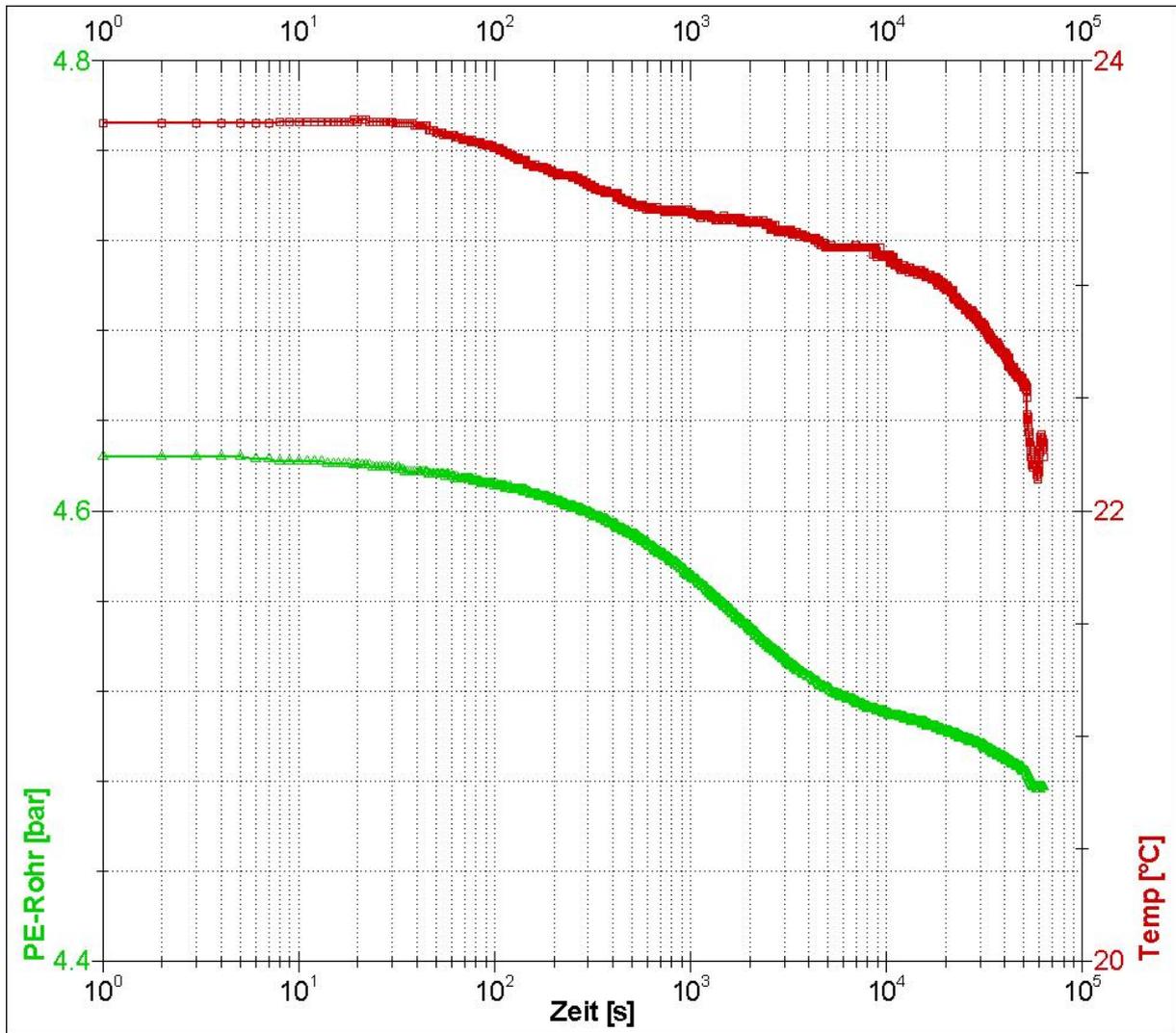


Abbildung 14: Verlauf des Prüfdrucks und der Temperatur während der Testung der Gasdichtheit

Da die Kunststoffrohre für einen Innendruck von maximal 2,5 MPa bei einer Verwendung im „Freien“ ausgelegt sind, sollte ein Drucktest die Beständigkeit der Rohre für höhere Drücke bei praxisnaher Einspannung in einem Baustoff zeigen. Dazu wurde ein weiterer Rohrdummy mit einer Länge von ca. 30 cm gefertigt und mit Armierungsmatten in eine Holzschalung (Kantenlänge 50 cm) eingebaut (Abbildung 16). Danach wurde die Schalung mit einem handelsüblichen Estrichbeton verfüllt. Nach Ablauf der Abbindezeit wurde der Rohrdummy mit Hilfe einer Hydraulikpumpe unter Druck gesetzt. Der Druck sollte bis zum Versagen des Rohres bzw. sichtbaren Schädigungen des Betonblockes erhöht werden. Bei einem Druck von 25,0 MPa waren noch keine Schädigungen erkennbar und der Versuch wurde beendet.

Damit konnte gezeigt werden, dass, bei einem vollständigen Einschluss der Anschlussleitungen in einen kohäsiven Baustoff deutlich höhere Drücke aufgenommen werden können, als die technische Spezifikation für die reguläre Anwendung zulässt. Vorallem für das Setzen der Packerschläuche zur Abdichtung der Schlauchkammern gegen lokale Injektionsdrücke müssen Drücke anwendbar sein, welche deutlich höher als die im Datenblatt der Rohrleitungen spezifizierte Druckbelastbarkeit der Kunststoffrohre von 2,5 MPa sind.



Abbildung 15: Rohrdummy



Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Testung des Kunststoffrohres bis 2,5 MPa

4.2 Vorlaufender Gasdrucktest der Anschlussrohre in situ

Um eine erste Einschätzung über die Anbindung des Kunststoffes am Baustoff zu treffen wurde ein Rohr in einer Bohrung einbetoniert. Hierzu wurde die Bohrung B01-030 mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Länge von 3,0 m im südöstlichen Streckenstoß im Bereich vor dem geplanten Bauwerk genutzt (Lage der Bohrung siehe Abbildung 5). In diese Bohrung wurde ein Kunststoffrohr mit Hilfe von 3D-gedruckten Distanzhaltern mittig platziert (Abbildung 17).



Abbildung 17: In der Bohrung B01-030 mittig positioniertes Rohr

Das Rohr war am unteren Ende mit Gewebeklebeband verschlossen, um ein Einfließen von Baustoff während der Betonage zu verhindern. Danach wurde die Bohrung mit einer Holzschalung verschlossen (das äußere Ende des Rohres wurde durch die Schalung hindurchgeführt) und mit Baustoff vergossen.

Nach dem Abbinden des Baustoffes wurde die Schalung entfernt und das Klebeband am unteren Ende des Rohres mit einem Glasfasergestänge aufgerieben (Abbildung 18). Danach wurde ein Drucktest mit Gas am Rohr durchgeführt. Nach dem Gastest wurde das Rohr überbohrt, um erste Erfahrungen zum Überbohren der verwendeten Kunststoffrohre zu sammeln.



Abbildung 18: Verfüllte Bohrung B01-030 mit Kunststoffrohr und Baustoff

Für den Gasdrucktest wurde das äußere Rohrende mit einem Anschlussstück mit Adapterfittings versehen und mittels 4 mm Edelstahlleitungen an einen Gasmesskoffer angeschlossen. Der Test wurde mit 4 bar Druckluft über einen Zeitraum von rund 26 Stunden durchgeführt (Abbildung 19). In diesem Zeitraum reduzierte sich der Druck um ca. 25,0 kPa, wobei systembedingt nicht zwischen dem Anteil des Druckverlustes aus der Anbindung am Kunststoffrohr und dem Abstrom durch den permeablen Baustoff unterschieden werden kann.

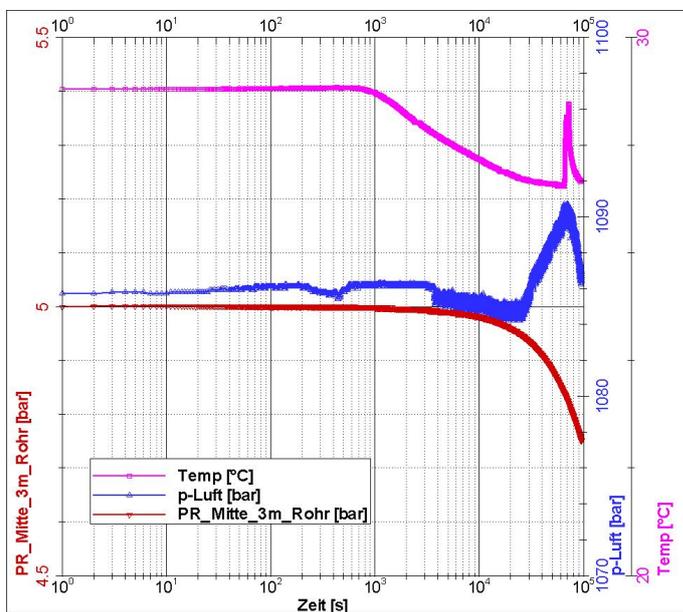


Abbildung 19: Gasdrucktest Kunststoffrohr in Bohrung B01-030

Trotzdem wurde die Anbindung der Kunststoffoberfläche des Rohres an den Baustoff noch nicht als ausreichend dicht bewertet und sollte somit weiter untersucht werden. Daraufhin wurden weitere Versuche zur Anbindung des Baustoffs an die Kunststoffrohre geplant und durchgeführt.

4.3 Vergleichsuntersuchungen zur Optimierung des Verbundes

Zur Optimierung des Verbundes zwischen der Oberfläche der Kunststoffrohre und dem Baustoff wurden Untersuchungen an drei unterschiedlich behandelten Rohrinstallationen durchgeführt. Es wurden Rohre paarweise in drei jeweils 1 m tiefe Bohrungen (Durchmesser 300 mm) eingebaut (Lage der Bohrung siehe Abbildung 5). Dabei war ein Rohrpaar unbehandelt, das zweite Rohrpaar wurde oberflächlich mit grobem Sandpapier (Körnung 40) zur Erhöhung der Rauheit angeschliffen und beim dritten Rohrpaar wurden, ergänzend zum Anschliff, Scheiben als zusätzliches Fixierungselement und Strömungshindernis aufgeklebt (Abbildung 20). Zur Positionierung und Befestigung kamen 3D-gedruckte Distanzhalter und Klemmen zum Einsatz (Abbildung 21).



Abbildung 20: getestete Rohrinstallationen

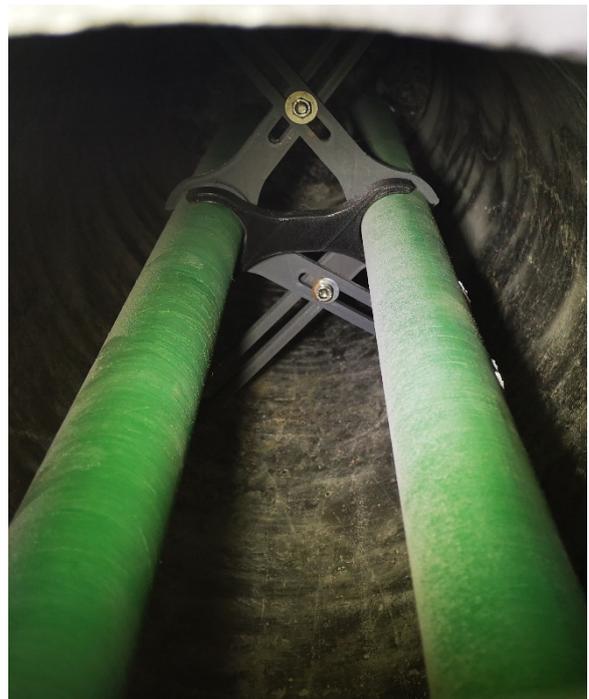


Abbildung 21: Kunststoffrohre in Bohrung

Auf Grund der paarweisen Anordnung der Rohre konnten für jede Installation zwei Tests durchgeführt werden. Dabei wurde immer wechselweise ein Rohr mit dem Prüfdruck beaufschlagt (rot dargestellt) und das andere diente als Kontrollintervall (grün dargestellt). Der Anschluss und die Messung wurden analog zu den messungen in der B01-30 durchgeführt.

Die unbehandelten Rohre wurden in die Bohrung B06-030 eingebaut und getestet. Die Druckganglinien sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt.

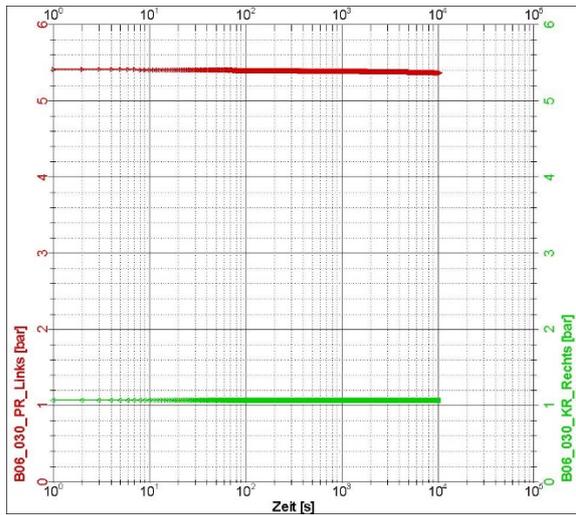


Abbildung 22: B06-030 Prüfrohr links (unbehandelt)

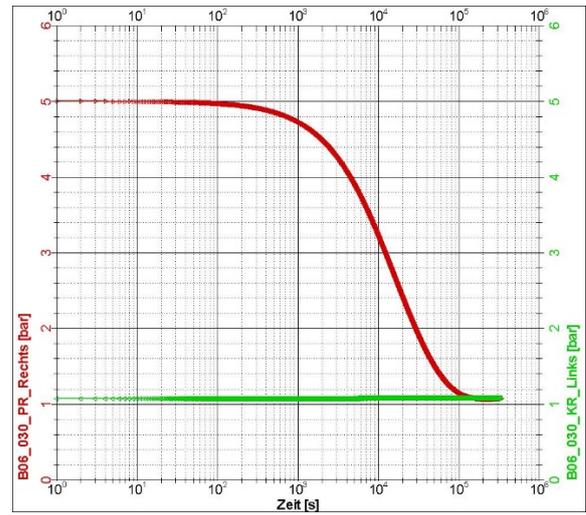


Abbildung 23: B06-030 Prüfrohr rechts (unbehandelt)

Die geschliffenen Rohre wurden in die Bohrung B07-040 eingebaut und getestet. Die Druckganglinien sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt.

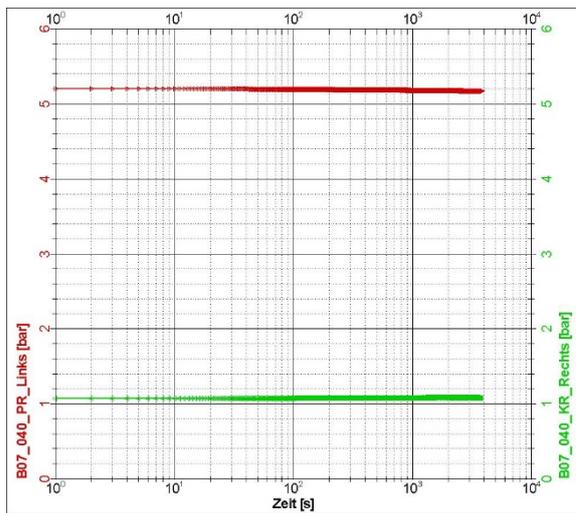


Abbildung 24: B07-040 Prüfrohr links (geschliffen)

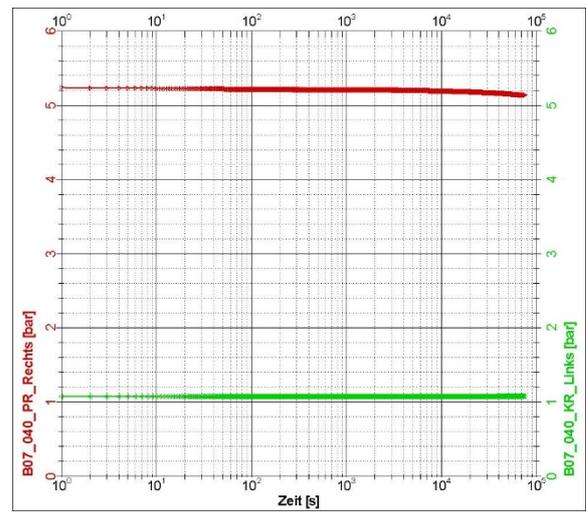


Abbildung 25: B07-040 Prüfrohr rechts (geschliffen)

Die geschliffenen Rohre mit aufgeklebten Scheiben wurden in die Bohrung B08-050 eingebaut und getestet. Die Druckganglinien sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt.

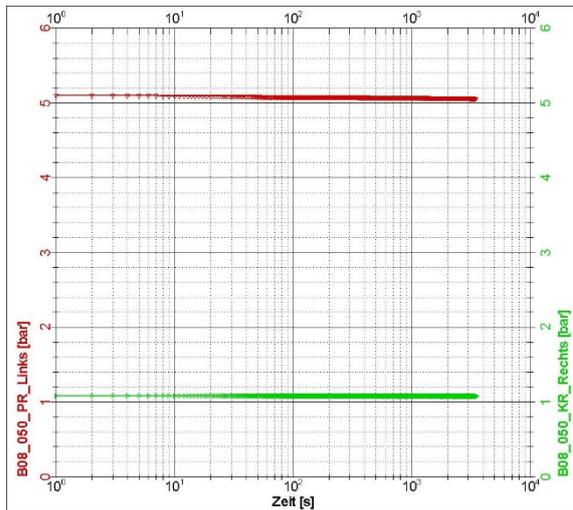


Abbildung 26: B08-050 Prüfrohr links (geschliffen und Scheiben)

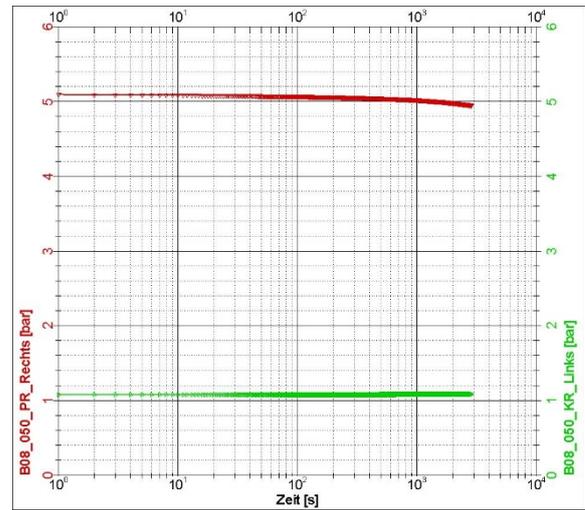


Abbildung 27: B08-050 Prüfrohr rechts (geschliffen und Scheiben)

Die Druckganglinien zeigen für alle durchgeführten Tests nur geringe Druckverluste. Anhand der Druckganglinien ist erkennbar, dass bei der Installation von Rohren mit geschliffener Oberfläche und den Rohren mit Anschliff und Scheiben die zuverlässigste Anbindung zu erwarten ist. Unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit für die Anbindung und des vorraussichtlichen Montageaufwandes wurde somit die Installation von Rohren mit angeschliffener Oberfläche ausgewählt. Dabei sollten die Rohre im Anlieferungszustand eingebaut werden und der Anschliff danach in der Einbauposition erfolgen. Anschließend sollte der Gasdichtheitstest vorgenommen werden.

4.4 Überbohren der Anschlussrohre

4.4.1 Vortest zum Überbohren

Um die Möglichkeit des Überbohrens der Kunststoffrohre (Anschlussleitungen für die Ringkammern) zu testen wurde da in Bohrung B01-030 einbetoniertes Kunststoffrohr genutzt (Abbildung 5).

Das Ausbohren des Kunststoffrohres erfolgte mit einer 40 mm Hartmetallbohrkrone. Nach dem Ausbohren wurde eine Kamerabefahrung der entstandenen Bohrung durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass noch Reste des Rohres im Bohrloch verblieben waren (Abbildung 28). Dies konnte auf ein Verlaufen der Bohrkrone zurückgeführt werden. Das Ausbohren der Rohre sollte also im Weiteren mit einer Bohrkrone mit einem Zentrierpiloten erfolgen.



Abbildung 28: Kunststoffreste in Bohrung

4.4.2 Teiltrückbau der Testrohre

Die Kammern sind zur Druckbeaufschlagung und Steuerung der innenliegenden Schläuche über Kunststoffleitungen angeschlossen. Nach Abschluss der Testung des Bauwerkes werden diese Kunststoffrohre vollständig zurückgebaut. Der Rückbau der Kunststoffleitungen dient nach dem erfolgreichen Nachweis der Abdichtwirkung der Herstellung eines langzeitsicheren Zustandes des Abdichtbauwerkes.

Um den Rückbau im Rahmen des Projektes zu testen, wurden im Sohlbereich des Bauwerkes zwei jeweils 15 m lange Testleitungen installiert, siehe Hauptband. Diese sollten es ermöglichen den Rückbau der Anschlussleitungen zu testen, ohne die unwiederbringliche Deaktivierung der Testinstallation der installierten Kammern zu bewirken.

Durch die TS-Bau GmbH wurde im Rahmen des Projektes ein Konzept für das Rauben der Kunststoffrohre entwickelt, wobei folgende Anforderungen an den Rückbau formuliert wurden:

- vollständiges Ausrauben der Kunststoffrohre auf der gesamten Länge; lokale Reste der Kunststoffleitungen stellen keine Gefährdung dar,
- vollständige, qualitätsgerechte Verfüllung der Bohrungen mit einem Dichtbaustoff, der eine dauerhafte Anbindung an den Baustoff des Dichtsegmentes gewährleistet.

Dabei wurden bereits in der Phase der Konzeptentwicklung für die Testung eines Bauwerkes im Zusammenhang mit der Auswahl der Anschlussleitungen unterschiedliche Methoden für den Rückbau geprüft und beurteilt:

- Verwendung von Kunststoffrohren, die durch thermische Beanspruchung zersetzt und zurückgewonnen werden können,
- Verwendung von Metallleitungen, die nach dem Abschluss der Testung verfüllt werden und dauerhaft im Bauwerk verbleiben,
- Verwendung von Kunststoffrohren, die nach dem Abschluss der Testung ausgebohrt werden,
- Ziehen der Kunststoffrohrleitungen und Abreißen an vorgegebenen Sollbruchstellen.

Im Ergebnis der Recherchen und technischen Prüfungen wurde das gasgespülte Ausbohren der Rohrleitungen als Grundkonzept für den Rückbau der Rohrleitungen weiterverfolgt. Für das Dichtsegment aus MgO-Baustoff wurde ein Bohrprozess mit Salzlösung als Spülung aufgrund der nicht beurteilbaren Auswirkungen der sekundären Wechselwirkungen zwischen Salzlösung und Baustoff sowie dem Einfluss auf den Bohrlochdurchmesser ausgeschlossen.

Nach ersten Voruntersuchungen an den ausgewählten und eingebauten Kunststoffrohren zeigte sich, dass das Ausbohren mit einer speziellen Bohrkrone erfolgen muss, welche mit minimalem Übermaß das Kunststoffrohr aus dem Beton eher ausschält als ausbohrt. Ein generelles Überbohren im MgO-Baustoff ist in der Praxis kaum durchführbar, da mangels einer Führung die Bohrkrone aus der Spur läuft. Wenige Zentimeter Abweichung reichen dann aus, um ein angeschnittenes Kunststoffrohr im Bohrloch zu hinterlassen. Des Weiteren müsste grundsätzlich ein Kernrohr verwendet werden, welches bis zur gewünschten Endteufe reicht, da im Gegensatz zum MgO-Baustoff der Kunststoff nicht abbricht.

Die Testung des Rückbaus erfolgte in den zwei 15 m langen Testkunststoffrohren, welche im unteren Bereich des Halbdamms einbetoniert waren. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Ausbohrprozess auf Bohrungslängen von 5 m bis 6 m getestet.

Dafür wurde im Rahmen des Projektes durch den Partner TS-Bau GmbH eine spezielle Bohrkrone (Abbildung 29) zur Verfügung gestellt, welche mittels eines Führungsdorns eine Zentrierung in der Kunststoffrohrleitung ermöglicht. Im Idealfall wird das Kunststoffrohr durch die Bohrkrone eher ausgeschält, was aber zu langen zusammenhängenden Spänen führt (Abbildung 30). Die ausgeprägte Zähigkeit des Kunststoffes begünstigt diese Spanbildung, sodass der Abtransport des „Bohrkleins“ über eine mehrere Meter lange Bohrung eine besondere Herausforderung darstellt. Die Anordnung, die Anzahl und Geometrie der Schneiden, die verfügbare Querschnittsfläche zum Austrag der Endlosspäne und die Drehzahl entscheiden maßgeblich den Fortschritt des Ausbohrprozesses des Kunststoffrohres.

Der Austrag der langen Späne ist entscheidend für den Erfolg des Ausbohrens. Sobald der Austrag ins Stocken kommt, führt dies unweigerlich zu einer Erhöhung der Reibung und damit zur Erhöhung der Temperatur. Da der thermoplastische Kunststoff PP-R bei höheren Temperaturen weich wird und ab ca. 140 °C schmilzt, besteht eine hohe Gefahr des Verklebens und Blockierens der Kunststoffspäne. Um diesen Prozess zu limitieren, wurde mit der niedrigst möglichen Drehzahl von ca. 200 U/min gebohrt, was aber als immer noch zu hoch eingeschätzt wird, um die Spanbildung wirkungsvoll zu limitieren.

Der Prozess des Aufschmelzens kann innerhalb weniger Sekunden auftreten und wird deshalb erst bemerkt, wenn es bereits zu spät ist. Die gesamte Bohrkrone heizt sich extrem auf und schmilzt den Kunststoff auch im Bereich des Führungsdorns. Eine Wiederaufnahme der Bohrarbeit nach solch einem Aufschmelzen ist sehr schwierig, da ein reibungsarmes und damit kühles Wiederanschneiden kaum möglich ist. Ein temporäres Aufschmelzen des Kunststoffes muss deshalb auf alle Fälle vermieden werden. Neben dem Austrag der Späne gilt es deshalb auch die Spülung bzw. Kühlung zu optimieren.



Abbildung 29: Bohrkronen mit Führungsdorn

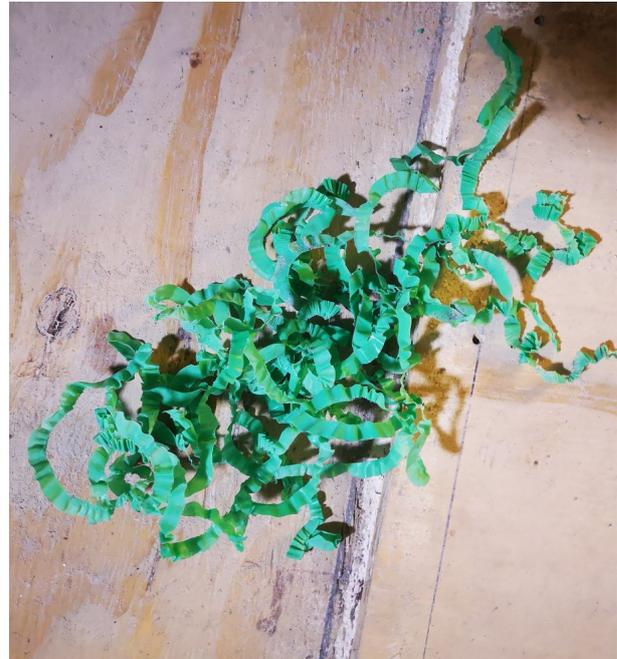


Abbildung 30: Typischer Endlosspan des Kunststoffrohres

Der beschriebene Effekt des Aufschmelzens der Kunststoffrohrleitung beim Ausbohren war der limitierende Faktor bei den Rückbauuntersuchungen. Bei beiden Testleitungen mussten die Ausbohrarbeiten beim Stand von ca. 5 m bzw. 6 m beendet werden. Eine weitere Optimierung der Bohrkronen bzw. des Ausbohrprozesses konnte im Rahmen des Projektes nicht mehr realisiert werden, ebensowenig wie das vollständige Ausbohren eines der 15 m langen Kunststoffrohres.

Folgende Maßnahmen und Erfahrungen sollten für eine zukünftige Optimierung des Ausbohrens von Kunststoffrohren berücksichtigt werden:

- Nutzung von nur maximal 3 Hartmetallschneiden, um die Spanbildung zu minimieren, ggf. auch nur 1 Schneide und 2 Zentrierhilfen,
- Optimierung der Drehzahl (unterhalb von 200 U/min),
- Maximierung der Fläche, welche zum Austrag der Späne zur Verfügung steht,
- Modifizierung des Gestänges mit einer Austragsspirale,
- Erprobung mit einer effektiveren Spülung bzw. Kühlung mit $MgCl_2$ -Lösung,
- Erprobung duroplastischer Kunststoffsorten, welche ein anderes mechanisch-thermisches Verhalten haben und nicht schmelzbar sind.

Bis auf die beschriebenen technologischen Besonderheiten bei Ausbohren der Kunststoffleitungen, wird das Konzept des Rückbaus und das erreichte Ergebnis des Ausbohrprozesses als geeignet bewertet, solange eine sichere Führung der Bohrkronen gewährleistet ist. Wie in Abbildung 31 ersichtlich, kann das Ausbohren ohne eine Zentrierung der Bohrkronen zu einem Auslaufen der Bohrung führen. Dann wird das Kunststoffrohr nur noch angeschnitten, was bohrtechnisch nur mit hohem Aufwand zu überarbeiten ist.

In der Abbildung 32 ist ein brauchbares Ergebnis des Ausbohrens dargestellt, wenn die Bohrkronen im Kunststoffrohr zentriert wurde (Bohrkronen siehe Abbildung 29). Lediglich im

Bereich der Verbindungsmuffen (alle 2 m) blieben Kunststoffreste im Damm zurück, da die Verbindungsmuffen konstruktionsbedingt einen größeren Durchmesser als die Rohrleitungen haben.



Abbildung 31: Ergebnis des Ausbohrens ohne eine zentrierte Führung der Bohrkronen



Abbildung 32: Ergebnis des Ausbohrens mit einer zentrierten Führung der Bohrkronen

Im optimalen Fall sollte beim Ausbohren der Kunststoffleitungen auch ein paar zehntel Millimeter des MgO-Baustoffs abgebohrt werden, um eine raue frische MgO-Oberfläche für die anschließende Verfüllung der Bohrlöcher mit MgO-Suspension zu erhalten.

Ein (Teil)Rückbau der aktiv verwendeten Rohrleitungen zum Anschluss der Kammern im Halbdamm erfolgte im Projektverlauf nicht. Die Testinstallation im Bauwerk ist auch nach Abschluss des Vorhabens vollständig einsetzbar.

5 Technischer Anhang - Teil 2

5.1 Injektionskonzept und Injektionsmittel

5.1.1 Konzept Injektionsleitungen

Bevor der Einsatz von quellenden MgO-Baustoffen in Streckenabdichtungen im Salinar intensiviert wurde, wurden vorwiegend zementbasierter Salz- und Solebeton auf CSH-Basis eingesetzt. Da CSH-Betone, ohne den Zusatz spezieller Quellmittel, eher zum Schwinden neigen, wurden derartige Abdichtungsbauwerke meistens mit nachträglichen Injektionen der Kontaktzonen zwischen Baustoff und Gebirge vergütet, um das Volumendefizit und die daraus resultierende Porositäts- und Permeabilitätserhöhung zu minimieren. Dieser Prozess und die Folgen für die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes muss dabei standortbezogen immer zusammen mit der wirkenden Konvergenz des Gebirges beurteilt werden.

Die Injektionen erfolgten entweder über Bohrungen, welche jedoch aufwendig zu erstellen sind, da der Kontaktbereich des Damms über seinen Umfang und eine gewisse Länge angeschlossen werden muss, oder über vorinstallierte Injektionsschläuche an der Gebirgskontur. Letzteres hat den Nachteil, dass die Zuleitungen der Injektionsschläuche lateral im Damm liegen und zur Vermeidung von lateral verlaufenden Fließwegen im Bauwerk nachträglich entfernt werden müssen.

In der Vergangenheit wurde in einem Demonstrationsbauwerk aus Salzbeton im Endlager Morsleben wurden alle Zuleitungen der Injektionsleitungen in einem Sammelrohr gebündelt, um dieses dann nachträglich auszubohren [9]. Das in Morsleben angewendete Konzept zur Injektion des Kontaktbereiches mit Ausnahme der Installation eines Sammelrohres war die Grundlage für die Planung der Injektionen im Versuchsdamm des STROEFUN-Projektes.

Auf Grund des in den letzten Jahren eingetretenen Wechsels der Baustoffpräferenz von Salzbeton hin zu MgO-Baustoffen, wird eine Injektion des Konturbereichs von Dichtsegmenten auf der Basis von MgO-Baustoff nicht mehr als grundsätzlich notwendig angesehen. Trotzdem wurde im Rahmen des STROEFUN-Projektes eine Kombination aus MgO-Baustoff und Injektionsleitungen untersucht. Entsprechend Vorhabensplanung war, neben der Entwicklung und Testung des Nachweiskonzeptes, ebenfalls die Konzipierung von injektionsbasierten Maßnahmen zur nachträglichen Vergütung (Handlungsoption im Ergebnis der Bauwerkstests) ein Schwerpunkt des Vorhabens.

Die BGE (vormals DBE) verwendete im Demonstrationsbauwerk aus Salzbeton im Endlager Morsleben Injektionsschläuche mit der Markenbezeichnung Predimax® 11/19 der Firma BPA, siehe Anlage 1. Diese Injektionsschläuche wurden nach Voruntersuchungen (unveröffentlicht) ausgewählt und in Abständen von 0,75 m an der Kontur verlegt (Abbildung 33). Das System Predimax® 11/19 besteht aus einem Innenschlauch mit großen Austrittsöffnungen, welcher durch einen Außenschlauch überzogen ist. Der Außenschlauch besitzt zu den Austrittsöffnungen versetzt angeordnete Schlitze, sodass der Injektionsschlauch wie ein Ventil funktioniert (Abbildung 34). Bei der Betonage wird das Eindringen des Betons verhindert, während bei der Injektion das Injektionsmittel von innen nach außen strömen kann.

Bei der Anwendung in Morsleben wurden die Schläuche in umlaufenden Schlitzen in der Steinsalzkontur montiert, um die Mitte der Injektionsschläuche auf dem Niveau der Kontaktfläche Baustoff/ Gebirge zu positionieren. Diese Vorgehensweise wurde jedoch im STROEFUN-Projekt nicht umgesetzt, sondern die Injektionsschläuche auf der Streckenkontur befestigt (siehe Hauptband) und der Abstand zwischen den Injektionsschläuchen auf 1,0 m vergrößert.



Abbildung 33: Injektionsinstallation im ERA Morsleben [9]



Abbildung 34: Injektionsschlauch Predimax (zur Ansicht wurde der Außenschlauch teilweise entfernt) [9]

5.1.2 Verwendete Injektionsmittel

Im Ergebnis der Testung eines installierten Streckenverschlussbauwerkes ist eine Entscheidung über die Notwendigkeit von Vergütungs-/Abdichtungsmaßnahmen erforderlich. Die einzige Handlungsoption, die besteht, ist die Injektion der als höher permeabel identifizierten Strömungsräume mit geeigneten Injektionsmitteln. In der Projektphase 1 und 2 wurden dazu die partikelgestützten Injektionsmittel IM4+ (MgO-basiert) und Ultrafin 12 (zement(CSH)-basiert) sowie die molekulardispersen Injektionsmittel Bitumen und Epoxidharz Epojet LV in Betracht gezogen und hinsichtlich der injektionsrelevanten Eigenschaften beurteilt sowie teilweise charakterisiert. Detaillierte Erläuterungen dazu und zum Injektionsprozess unter den spezifischen Bedingungen des Salinargebirges werden in den Berichten zu Phase 1 und Phase 2 des Projektes gegeben [1], [6].

Über die Laufzeit der Projektphasen wurde von der BGETEC im Auftrag der BGE mbH (ehemals Asse GmbH) der partikelgestützte, MgO-basierte Injektionsbaustoff MFBBa [10] entwickelt und erfolgreich angewendet. Aufgrund der Partikelgrößenverteilung und der rheologischen Eigenschaften dieses Injektionsbaustoffs wurde dieser in die Materialauswahl des Projektes aufgenommen und zusätzlich parametrisiert.

In der Projektphase 3 wurde zusätzlich eine Styromag-MgO-Suspension zu Injektionszwecken genutzt, so dass – da die Verwendung von Bitumen und Ultrafin 12 zurückgestellt wurde – zwei partikelgestützte Injektionsmittel und ein Expoxidharz zur Anwendung kamen, und zwar

- Styromag-MgO-Suspension
- MFBBa
- Epojet LV

Eine Injektion ist grundsätzlich ein Strömungsprozess von Flüssigkeit durch einen Porenraum. Dieser wird bestimmt von der Porengrößenverteilung, der Porosität, der initialen Fluidsättigung im Porenraum und der sich daraus ergebenden effektiven Permeabilität der Porenstruktur gegenüber dem Injektionsmittel. Gleichzeitig bestimmt das rheologische Verhalten des Injektionsmittels und der aufgewendete Druck / das Druckregime den Strömungsprozess bzw. die Ausbreitung des Injektionsmittels im Porenraum.

Für den Einsatz von partikelgestützten und/oder abbindenden Injektionsmaterialien sind zusätzlich der Feststofftransport und die daraus resultierenden Kolmations- und Sedimentationsprozesse sowie die Änderungen der rheologischen Eigenschaften im Abbindeverlauf zu berücksichtigen.

Der Erfolg bzw. die durch eine Injektion erreichte Reduzierung der Permeabilität eines Strömungsraumes erfordert die Zusammenführung der Kenntnisse zur Porenstruktur des zu injizierenden Porenraumes, zur Partikelgrößenverteilung des Injektionsmittels, zu den rheologischen Eigenschaften des Injektionsmittels und der Auswahl der verwendeten Injektionstechnik sowie des angewendeten Injektionsregimes.

Die Aufzählung macht deutlich, dass es sich bei einem Injektionsprozess aufgrund der physikalischen Zusammenhänge und der technischen Möglichkeiten um einen überaus komplexen Prozess handelt. Im Rahmen der Phase 3 des Projektes wurden für die Konzipierung und Durchführung von Injektionsversuchen folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Charakterisierung der Injektionsmittel bezüglich der Partikelgrößenverteilung und der rheologischen Eigenschaften, auch während des Abbindens sowie die damit verbundene Dauer der Injizierbarkeit (Topfzeit), als Ausgangspunkt der Beurteilung der Eignung für die Injektion,
- Laborative Ermittlung der Gas- und Lösungspemeabilität des Gebirges, des Baustoffs sowie von Kernproben aus der Kontaktzone des Bauwerkes – siehe Teil 5 des Technischen Anhangs,
- Ermittlung der Porengrößenverteilung im Kontakt Baustoff/Gebirge auf der Basis von CT-Untersuchungen – siehe Teil 6 des Technischen Anhangs,
- Modellgestützte Ermittlung der in situ-Permeabilität der strömungsrelevanten Bereiche in den zu injizierenden Strömungsräumen in den Bauwerksabschnitten zwischen den Ringkammern in Auswertung der durchgeführten Bauwerkstestungen, siehe Hauptband,
- Injektion von ausgewählten radial umlaufenden Injektionsleitungen in Kombination mit der strömungstechnischen Testung des Bauwerkes, siehe Hauptband.

Im Folgenden wird zunächst auf die Charakterisierung der Injektionsmittel eingegangen, die auf den zu injizierenden Porenraum abgestimmt werden müssen.

5.1.2.1 Styromag-MgO-Suspension

5.1.2.1.1 Ausgangsstoffe

Die Styromag-MgO-Suspension zur Injektion besteht aus MgO, Anhydritmehl und der Magnesiumchloridlösung. Das Verhältnis von MgCl₂-Lösung und MgO ist das Gleiche, wie bei der A1-Basisrezeptur.

Tabelle 2: Zusammensetzung des Injektionsbaustoffs

Ausgangsstoff	Massenanteil [Ma.-%]	Einwaage [kg]
MgCl ₂ -Lösung	50,2	15,8
MgO	29,2	9,2
Anhydritmehl	20,6	6,5
Gesamt	100,00	31,5

5.1.2.1.2 Suspension – Partikelgrößenverteilung und Fließkurven

In Abbildung 35 ist die Partikelgrößenverteilung des Injektionsmittels nach dem Anmischen dargestellt. Es können die einzelnen Partikelgrößen abgelesen werden, bei denen 10, 50, 80, 90 und 99 % der Partikelgrößenverteilung erreicht worden sind.

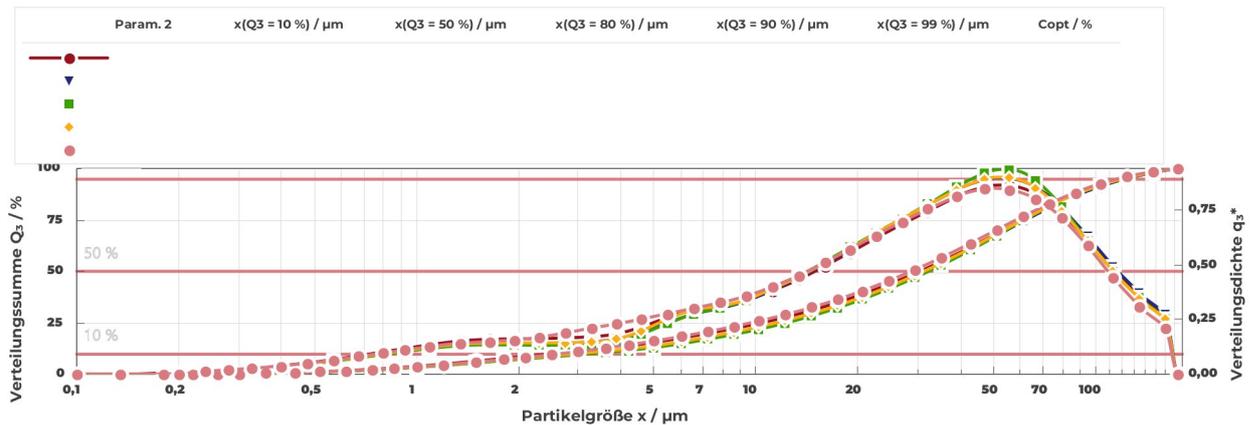


Abbildung 35: Verteilungsdichte/Verteilungssumme der Partikelgröße zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Anmischen der angerührten Styromag-Suspension.

Die dargestellten Messergebnisse wurden am Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme der TU Clausthal gemessen.

Für diese Suspension wurden auch Fließkurven zu unterschiedlichen Zeiten ermittelt. In Abbildung 36 sind die Fließkurven (dynamische Viskosität η in Abhängigkeit vom Schergefälle D) für unterschiedliche Zeitpunkte nach der Herstellung der Suspension dargestellt. Es ist ein Trend zu erkennen. Bei fast allen Suspensionen, bis auf die, die nach 130 min untersucht worden ist, ist anfangs ein Anstieg der Viskosität bei einer gleichzeitigen Zunahme der Scherrate zu erkennen. Nachdem die maximale Viskosität erreicht wurde, nimmt sie kontinuierlich ab. Das anfängliche Verhalten, dass die Viskosität mit ansteigender Scherrate zunimmt, ist ein untypisches Verhalten. Weitere Untersuchungen mit dem gleichen MgO bestätigen dieses Verhalten, jedoch wird in dieser Ausarbeitung auf diesen Punkt nicht weiter eingegangen.

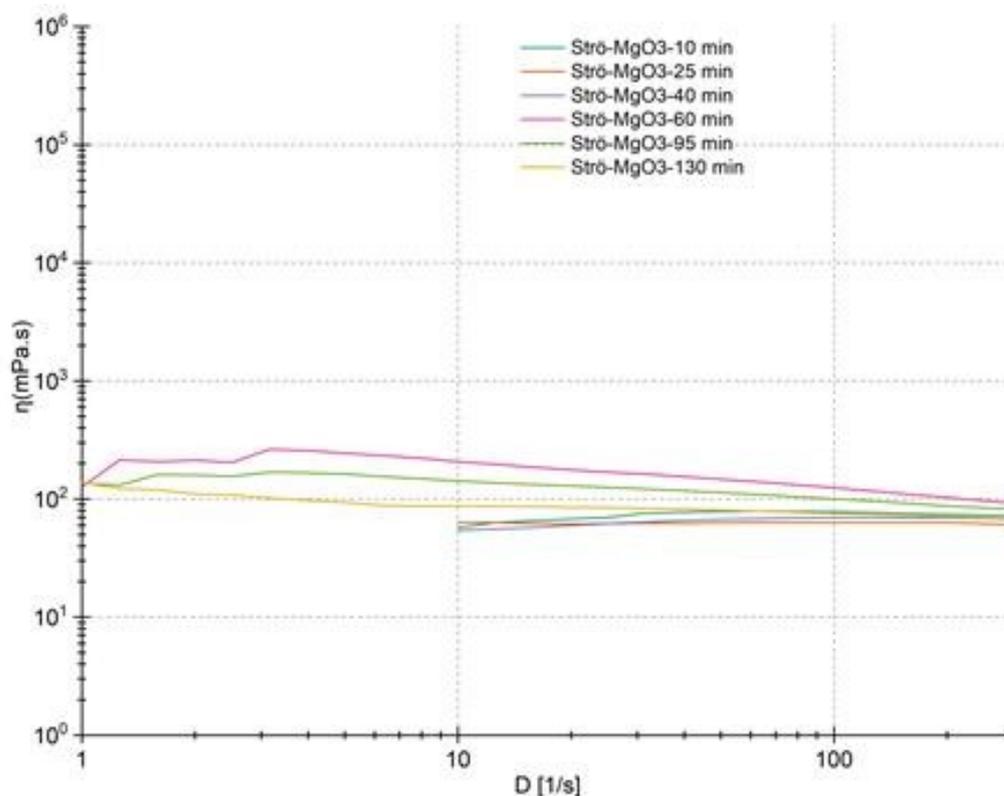


Abbildung 36: Fließkurven der Styromag-MgO-Suspension unmittelbar nach der Herstellung

5.1.2.2 MFBBa

Der partikelgestützte Injektionsbaustoff MFBBa wurde von der BGE TECHNOLOGY GmbH für die spezifischen Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit der Abdichtungsinjektion von Salzformationen und von Auflockerungszonen und Kontaktzonen zwischen Verschlussbauwerken aus kohäsiven Materialien und dem Gebirge entwickelt. Für die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das vorgemischte Ausgangsmaterial (Trockenmischung) und die Anmachlösung zur Verfügung gestellt.

Das Trockengemisch enthält neben Magnesiumoxid einen Anteil Brucit und - als inerten Zuschlagstoff - Barytpulver. Eine Übersicht der Zusammensetzung des Injektionsbaustoffs wird in Tabelle 3 gegeben. Mit Bezug auf diese Zusammensetzung wird für den angewendeten Injektionsmörtel auch die Kurzbezeichnung MFBBa 17/3/30 verwendet.

Tabelle 3: Zusammensetzung Injektionsbaustoff MFBBa [10]

	Massenanteil [Ma.-%]	Masse Ausgangsstoffe je Kubikmeter Suspension [kg]
MgCl ₂ -Lösung	50	981
MgO	17	334
Brucit	3	59
Barytpulver	30	589
Gesamt	100	1963

Das Trockengemisch wird in einem Massenverhältnis von 1:1 mit einer MgCl₂-Lösung (S30 DEUSA⁴) in Suspension gebracht. Dabei ist die Anmachlösung vorzulegen und das Trockengemisch unter Rühren zuzugeben.

⁴ Die genutzte DEUSA S30-Lösung wurde zusätzlich zur Trockenmischung zur Verfügung gestellt.

Für den MFBBa-Injektionsbaustoff erfolgte die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung der Trockenmischung sowie die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung und der dynamischen Viskosität der Suspension.

5.1.2.2.1 Trockenmischung - Partikelgrößenverteilung

Zur Charakterisierung des Ausgangsmaterials wurde an der angelieferten Trockenmischung für zwei Proben die Partikelgrößenverteilung über Laserbeugung ermittelt. Im Ergebnis der Analysen wurde der d90-Wert mit 11,4 µm und 11,7 µm ermittelt. Damit besitzt das Ausgangsmaterial eine sehr feine Körnung. Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Abbildung 37 dokumentiert.

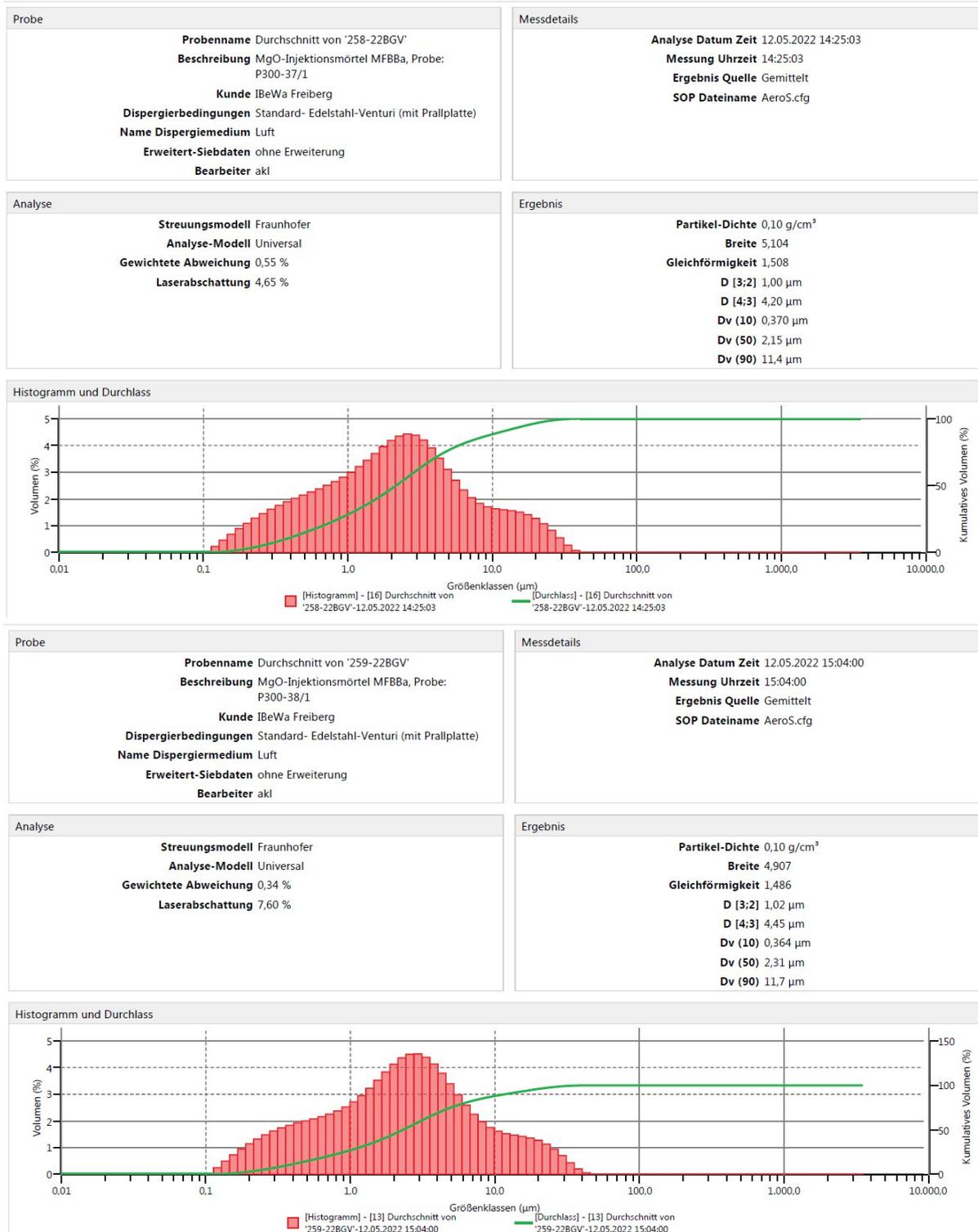


Abbildung 37: MFBBa – Partikelgrößenverteilung der Trockenmischung

5.1.2.2 Suspension – Partikelgrößenverteilung und Fließkurven

Die Injizierbarkeit wird von der Partikelgröße in der Suspension und der dynamischen Viskosität bestimmt. Zur Charakterisierung der Suspension wurden an zwei Proben die Partikelgrößenverteilung der Suspension und die dynamische Viskosität in Abhängigkeit vom Schergefälle – die Fließkurve - ermittelt. Im Abbindeverlauf des MFBBa ändert sich die dynamische Viskosität. Um dies zu erfassen, wurden Fließkurven zu mehreren Zeitpunkten im Abbindeverlauf ermittelt. Die Untersuchung der Suspensionsproben erfolgte am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau an der TU Bergakademie Freiberg.

Die Partikelgrößenverteilung in der Suspension wurden mit einem HORIBA LA-300 Laser-Streulichtspektrometer ermittelt. Das Gerät arbeitet auf der Grundlage der statistischen Laserlichtstreuung. Die Proben wurden vor der Messung in Wasser dispergiert und im Messprozess mit Ultraschall (mUS) und ohne Ultraschall (oUS) gemessen. Die Dichteverteilung der Partikelgrößen in Abbildung 38 ergibt eine bimodale Verteilung der Partikelgrößen mit einem Maximum bei ca. 10 μm und einem zweiten Maximum bei ca. 1,5 μm . Für die Darstellungen der Partikelgrößen in Abbildung 38 und Abbildung 39 wurden die jeweils 6 Analysen mit und ohne Ultraschallvorbehandlung im Analysegerät in einer geglätteten Kurve zusammengefasst.

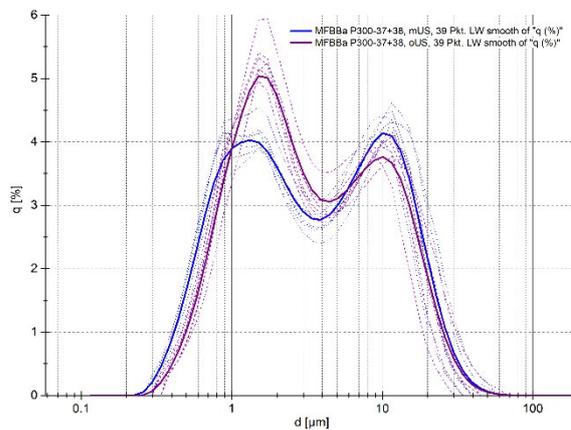


Abbildung 38: Dichteverteilung der Partikelgrößen der Suspension mit und ohne Ultraschalldispersion

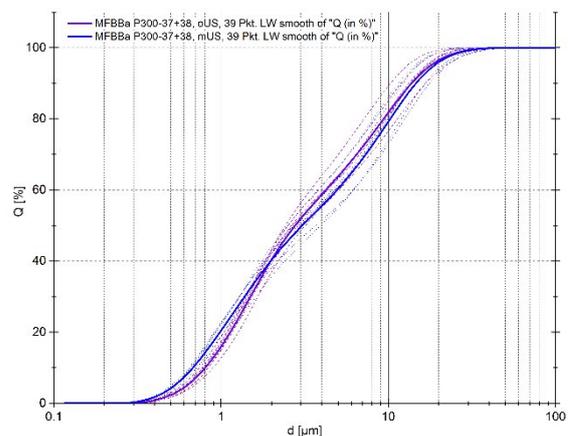


Abbildung 39: Kumulierte Partikelgrößenverteilung der Suspension mit und ohne Ultraschalldispersion

Aus der kumulierten Partikelgrößenverteilung in Abbildung 39 ergibt sich ein d_{95} -Wert von ca. 17 - 20 μm . Diese Größenordnung der Partikelgröße ist, eingeordnet in den Kenntnisstand zur Porengrößenverteilung, als bestimmend für den Injektionsprozess anzusehen.

Die Bestimmung der Fließkurven erfolgte in einem Rotationsviskosimeter bei einem Scherratenbereich von $0,1 \text{ s}^{-1}$ bis 500 s^{-1} in Abhängigkeit von der Verarbeitungszeit bis zum Einsetzen der Erstarrung des Mörtels. Die für die Proben P300-37 und P300-38 ermittelten Fließkurven sind für 4 Zeitpunkte in Abbildung 40 und Abbildung 41 für den Wertebereich des Schergefalles von 1 s^{-1} bis 350 s^{-1} dargestellt.

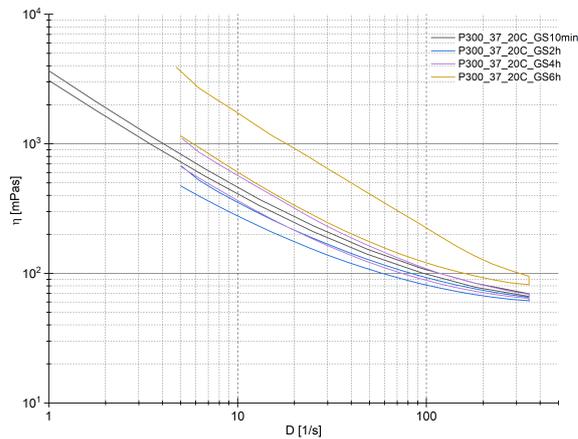


Abbildung 40: Fließkurven Injektionsmörtel MFBBa, Probe P300-37, in Abhängigkeit von der Abbindedauer

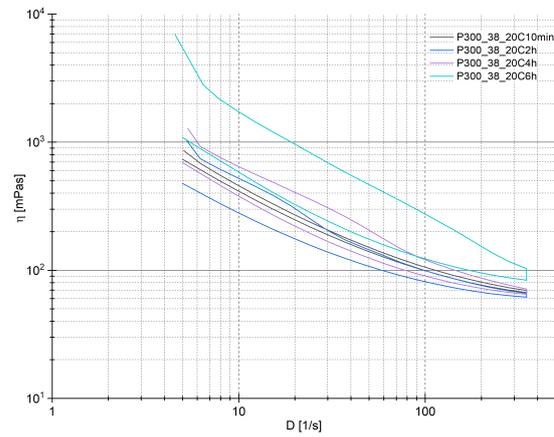


Abbildung 41: Fließkurven Injektionsmörtel MFBBa, Probe P300-38, in Abhängigkeit von der Abbindedauer

Für die beiden Proben ergibt sich ein gut vergleichbarer Verlauf der Fließkurven und des zeitabhängigen Verhaltens. Die Fließkurven weisen ein strukturviskoses Verhalten der Suspension nach. Mit zunehmendem Schergefälle reduziert sich die dynamische Viskosität auf ein Niveau von ca. 10 mPas.

Aus dem scherspannungsabhängigen Fließverhalten ergibt sich die Empfehlung von möglichst hohen Strömungsgeschwindigkeiten für die Injektion. Mit zunehmender Scherspannung reduziert sich die Viskosität und in der Folge die Druckverluste für den Strömungsprozess. Gleichzeitig erhöht sich die Reichweite des Injektionsfluides im Porenraum.

Um das strukturviskose Verhalten der Suspension bei der Beurteilung der Injektion zu berücksichtigen, wurde für die Fließkurven der Proben P300-37 und P300-38 unmittelbar nach der Herstellung der Suspension eine beschreibende Funktion ermittelt. Die mittlere Fließkurve der beiden Proben und die Regression sowie die zugehörige Regressionsgleichung für den Wertebereich des Schergefalles von 1 s^{-1} bis 350 s^{-1} sind in Abbildung 42 dargestellt.

Für das ermittelte strukturviskose Verhalten und die Beeinflussung durch den einsetzenden Abbindeprozess der Suspension wird davon ausgegangen, dass die Fließkurven unmittelbar nach der Herstellung der Suspension über einen Zeitraum von 1 bis 2 Stunden repräsentativ für das rheologische Verhalten der Suspension ist. Ein solcher Verarbeitungszeitraum (Topfzeit) kann für den Einsatz des MFBBa bei einer untertägigen Injektion als realistisch angesehen werden. Die zeitabhängige Erhöhung der dynamischen Viskosität weist erst nach ca. 6 h eine deutliche Erhöhung der Viskosität nach. Dies ist auf den beginnenden Abbindprozess des MFBBa zurückzuführen. Es ist zu beachten ist, dass die Untersuchungen bei Temperaturen von 20 °C stattfanden.

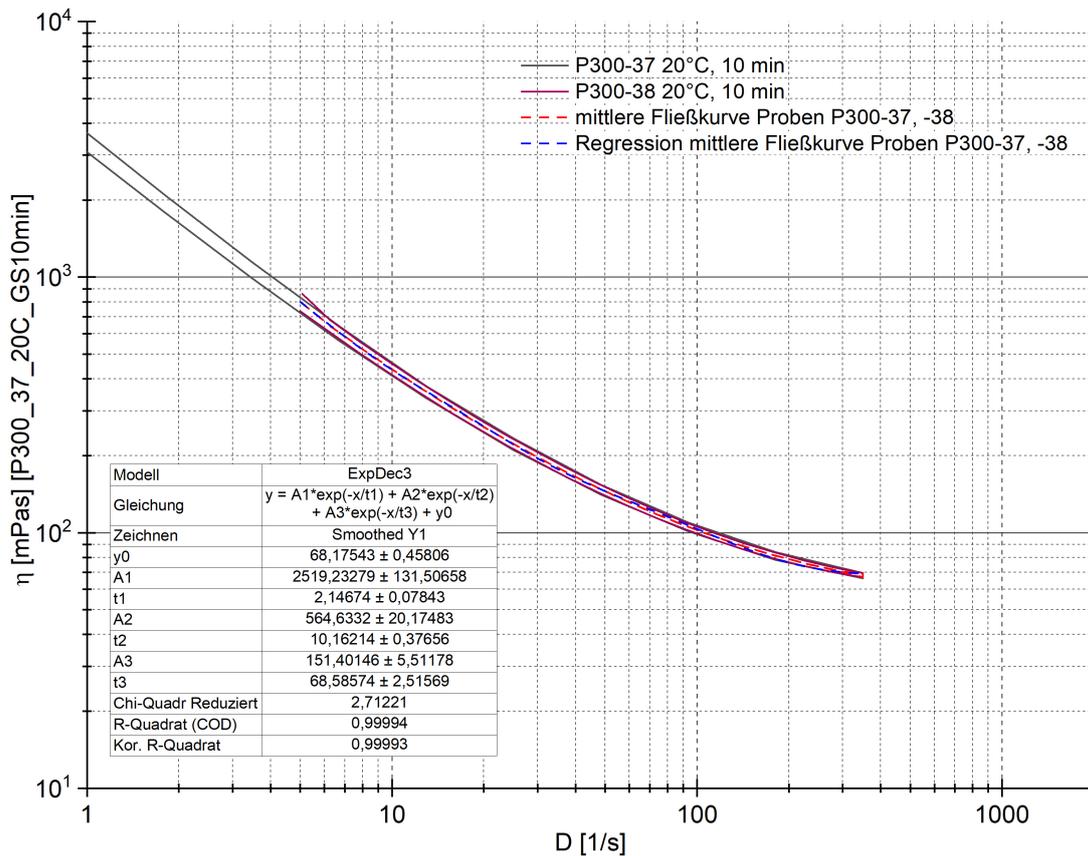


Abbildung 42: Regression der Fließkurven der MFBBa-Suspension unmittelbar nach der Herstellung

5.1.2.2.3 Vergleich der Fließkurven von Styromag-MgO- und MFBBa-Suspension

Die vergleichende Darstellung der Fließkurven für die Injektionsbaustoff auf der Grundlage der Styromag-MgO-Suspension und des Injektionsbaustoffs MFBBa nach einer Abbindedauer von 1 Stunde in Abbildung 43 zeigt ein stärkeres strukturviskoses Verhalten des Injektionsbaustoffs MFBBa. Für hohe Scherraten führt dies zu einer geringeren dynamischen Viskosität im Vergleich zum Injektionsbaustoffs auf der Basis von Styromag-MgO.

Die Kenntnis der Fließkurven bietet einen Anhaltspunkt für die Konzipierung und Planung des erforderlichen Querschnittes der für die Injektion verwendeten Druckleitungen, Injektionsschläuche und des anzuwendenden Druckregimes zur Überwindung der Druckverluste in den Leitungen und im Gebirge.

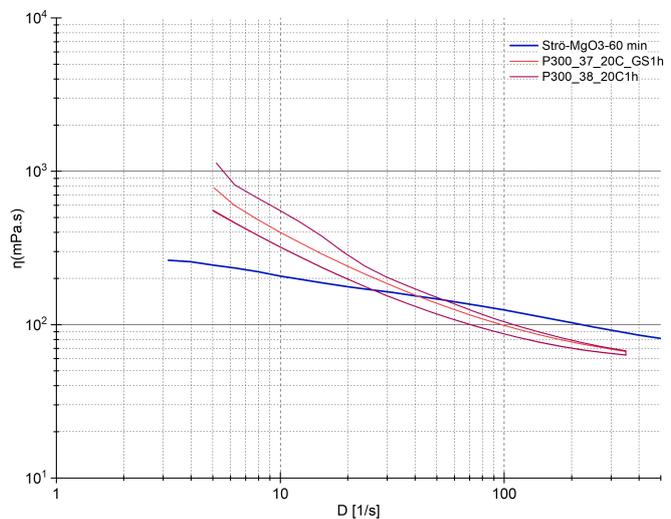


Abbildung 43: Vergleichende Darstellung der Fließkurven des Injektionsbaustoff auf der Basis von Styromag-MgO und des Injektionsbaustoffs MFBBa nach einer Abbindedauer von 1 Stunde

Im Zusammenhang mit der Beurteilung der Suspensionen ist immer der Einfluss der Temperatur zu berücksichtigen. Bei der Injektionssuspension handelt es sich um eine feststoffbeladene, hoch mineralisierte $MgCl_2$ -Lösung. Bereits kleine Temperaturveränderungen beeinflussen die chemische Zusammensetzung dieser Salzlösung. Die im Ergebnis einsetzenden Kristallisations- oder Lösungsprozesse können die Partikelgrößenverteilung in der Suspension maßgeblich beeinflussen ebenso wie die temperaturabhängige Zeitdauer des Abbindens. Daher sollten die Fließkurven immer für die Einsatzbedingungen der Injektion ermittelt und ein Einsatz der Suspension bei abweichenden thermodynamischen Bedingungen vermieden werden.

5.1.2.3 Epojet-LV

Das Epojet LV ist ein niedrigviskoses Injektionsharz auf Epoxidharzbasis [11]. Dieses Harz wurde ausgewählt, um zu testen, ob nach einer bereits erfolgten partikelgestützten Injektion, die Injektion mit einem niedrigviskosen, partikelfreien Injektionsmittel möglich ist. Das technische Datenblatt des Epojet LV befinden sich in Anlage 2.

5.1.3 Prozessverständnis zur Begründung für die Auswahl der Injektionsmittel

Nach Beschreibung der Injektionsmittel erfolgt nunmehr die Charakterisierung des zu injizierenden Porenraums, um die Injektionsmittel auf diesen abzustimmen. Im Zusammenhang mit Auswahl der Injektionsmittel wurden die nachfolgend beschriebenen Aspekte und Überlegungen berücksichtigt:

- Porengrößenverteilung des zu injizierenden Porenraums gegenüber Partikelgrößenverteilung als geometrische Bedingung,
- Permeabilität des zu injizierenden Strömungsraums gegenüber Fließkurven und der daraus abgeleiteten Viskosität zur Bestimmung der Injektionsparameter Druckregime und Reichweite.

Die Ermittlung eines repräsentativen, mittleren Porenquerschnittes als Ausgangspunkt für die Beurteilung des Transportes der Feststoffpartikel in der Injektionssuspension im Porenraum stellt, aus Sicht der Bearbeiter, die größte Herausforderung dar, da von Strömungsprozessen auf wenigen, räumlich diskret verteilten, vernetzten Makroporen auszugehen ist. Innerhalb dieser Wegsamkeiten sind die Porenquerschnitte der Verbindungen zwischen den einzelnen Makroporen bestimmend für den strömungstechnischen Widerstand und den Feststofftransport.

Im Ergebnis der CT-Untersuchungen zur Porosität und Porengrößenverteilung an Kernproben aus dem Kontakt Baustoff/ Gebirge ergibt sich für die Kontaktzone eine mittlere Porosität von $0,06 \pm 0,03$ ($0,02 - 0,10$; $N=4$) und eine mittlere Porengröße von $0,83 \pm 0,27$ mm ($0,59 - 1,13$ mm; $N=4$), siehe Anlage 7, Tabelle 32.

Bei den folgenden Abschätzungen wird

- ein mittlerer Porendurchmesser von 830 μm in der Kontaktzone Baustoff/Gebirge und
- eine Porosität mit dem mittleren Porendurchmesser von $0,06 \pm 0,03$ ($0,02 - 0,10$; $N=4$) in der Kontaktzone Baustoff/Gebirge

angenommen.

Der so beschriebene Porenraum steht den Partikelgrößen der Injektionssuspensionen gegenüber. Für die Partikelgrößenverteilung in der Suspension kann aus den durchgeführten Untersuchungen eine Vorstellung zu der bestimmenden Partikelgröße abgeleitet werden. Dabei ist immer davon auszugehen, dass die größten Partikel in der Suspension maßgeblich für Kolmationsprozesse im Porenraum verantwortlich sein werden, d. h.

- die Partikelgröße von ca. 125 μm (d_{95}) für die Styromag-MgO-Suspension und

- die Partikelgröße von ca. 20 μm (d_{95}) für die MFBBa-Suspension.

Die geometrische Beurteilung beruht auf einer vergleichenden Gegenüberstellung der Partikelgrößen in den Injektionsbaustoffen (Abbildung 35 und Abbildung 39) und den Ergebnissen zur Porengrößenverteilung in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge, siehe Kapitel 9 und Anlage 7.

In Abbildung 44 sind die Kurven zur Partikelverteilung der Injektionsmittel und zur Porenradienverteilung des Strömungsraums zusammengeführt. Die Grafik ermöglicht eine Beurteilung der Größenverhältnisse der Partikel in den Suspensionen und der Porendurchmesser, die entlang des Transportweges der Partikel wirksam werden. Die Grafik verdeutlicht, dass die Poren/die Porengrößenverteilung ca. um den Faktor 60 bis 100 größer als die Partikel in der MFBBa-Suspension sind. Das Größenverhältnis der Poren zu den Partikeln in der Styromag-MgO-Suspension ergibt sich mit ca. 20 bis 70. Aus diesen Größenverhältnissen kann rein geometrisch abgeleitet werden, dass ein Transport der Partikel durch die Porenstruktur möglich sein sollte.

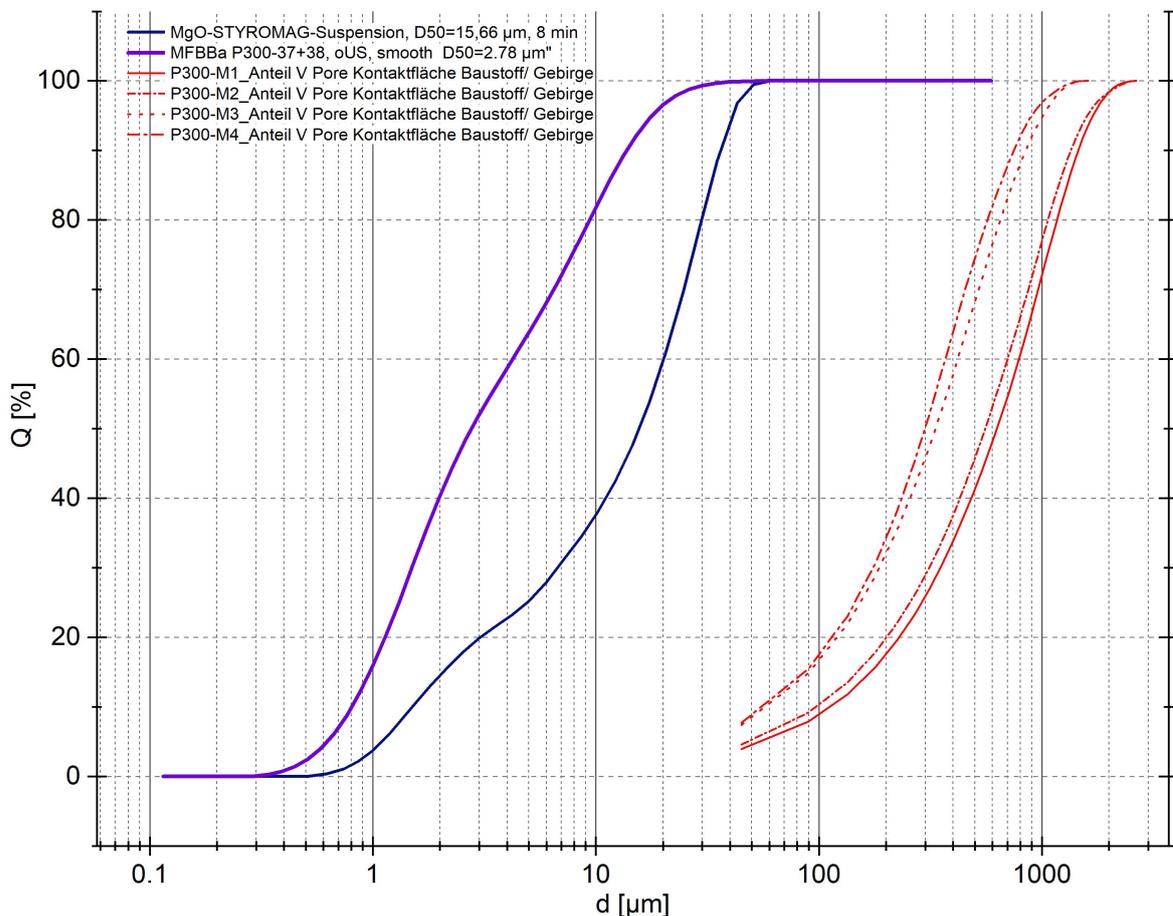


Abbildung 44: Summe Linien der Partikelgrößenverteilung der Injektionsbaustoffe Styromag-MgO und MFBBa (blau) und der Porengrößenverteilung der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge (rot) in Abhängigkeit vom Durchmesser

Die laborativ an Kernproben und modellgestützt aus den Bauwerkstests ermittelten Permeabilitäten für den Kontakt zwischen Baustoff und Gebirge stellen integrale Parameter für die jeweils getesteten Geometrien der Strömungsräume dar. Die ermittelte Permeabilität ist damit immer ein integraler Parameter für den getesteten Strömungsraum. Die Ergebnisse der Permeabilitätsuntersuchungen ergeben für die Testauswertungen für die Kontaktzone der Bauwerkssohle Permeabilitäten im Wertebereich von $2,0\text{E-}15$ - $1,1\text{E-}14$ m^2 (siehe Hauptband)

und für die laborativen Untersuchungen $5,0E-15$ bis $6,5E-12$ m², siehe Teil 5 des Technischen Anhangs. Der Unterschied der Permeabilitäten über mehrere Größenordnungen ist das Ergebnis der lokalen Permeabilitätsverteilung entlang der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge.

Die vergleichsweise kleine Fläche der Kernproben wird als repräsentativer für die Abschätzung der für die Injektion bestimmenden Strömungsvorgänge angesehen. Daher wird für die Abschätzungen zum Injektionsprozess der Permeabilitätsbereich von $5,0E-15$ m² bis $6,5E-12$ m² der Laborproben aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge verwendet, siehe Teil 5.

Für die Beurteilung des rheologischen Verhaltens eines feststoffbeladenen Injektionsmittels bei der Strömung im Porenraum der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge wurde ein vereinfachter Ansatz auf der Basis folgender Parameter angewendet:

- Fließkurve des Injektionsbaustoffs MFBBa unmittelbar nach der Herstellung für den Wertebereich des Schergefälles von 1 s⁻¹ bis 350 s⁻¹,
- Anwendung des an den 8 Kernproben aus dem Kontakt Baustoff/Gebirge ermittelten Permeabilitätsbereiches von $5,0E-15$ m² bis $6,5E-12$ m² für die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge entsprechend den Ergebnissen der Untersuchungen an den Kernproben aus der Kontaktzone der Bauwerkssohle – siehe Kapitel 8.2.3,
- Annahme eines maximal möglichen Injektionsdruckes bis 10 MPa; auch wenn dieser am Halbdamm nicht in der Höhe anwendbar ist,
- Annahme einer Fließweglänge von $1,0$ m.

Den integralen Permeabilitätswerten steht die Kenntnis/Erfahrung gegenüber, dass Strömungsprozesse im Porenraum immer an den lokal, im Maßstab der Poren bzw. der Porenquerschnitte vernetzten Porenraum gebunden sind. Dazu wird unterstellt, dass vorwiegend die vernetzten Makroporen bestimmend für den Strömungsprozess sind. Gerade diese lokalen, räumlich sehr diskreten Wegsamkeiten müssen durch den Injektionsprozess erreicht und verschlossen werden.

Auf der Grundlage der vorstehenden Annahmen und Daten ist es möglich, das geschwindigkeitsabhängige Schergefälle der strömenden Injektionssuspension für die Strömung in einer Kapillare mit einem Durchmesser von 830 µm abzuschätzen. Unter Berücksichtigung der Fließkurve des Injektionsbaustoffs MFBBa kann so die dynamische Viskosität in Abhängigkeit von dem sich, bei veränderlicher Permeabilität und veränderlichem Injektionsdruck, einstellenden Schergefälle (im Wertebereich von 1 s⁻¹ bis 350 s⁻¹) abgeschätzt werden. Der sich ergebende Zusammenhang aus dynamischer Viskosität, Permeabilität und Injektionsdruck ist in Abbildung 45 dargestellt. Aus der Grafik können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Erst ab einer Permeabilität $>1E-12$ m² ist bei Injektionsdrücken >2 MPa von einer Strömungsgeschwindigkeit bzw. einem Schergefälle auszugehen, das zu einer Reduzierung der dynamischen Viskosität der Injektionssuspension führt.
- Durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. des Schergefälles infolge höherer Permeabilität oder infolge der Erhöhung des Injektionsdruckes ist von einer Reduzierung der Viskosität auszugehen.
- Zur Minimierung der Auswirkungen des strukturviskosen rheologischen Verhaltens der Injektionssuspension sollte der Injektionsdruck bzw. der Förderstrom als einzige steuerbare Größen immer so groß wie möglich gewählt werden.

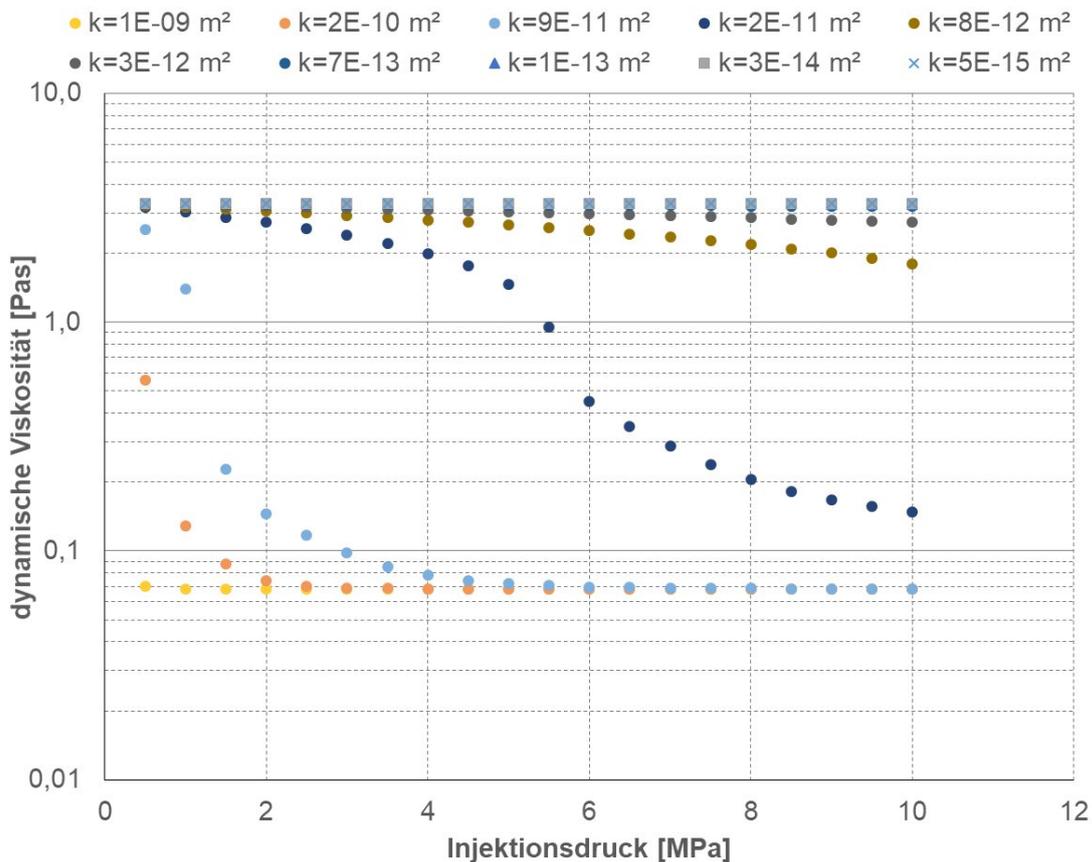


Abbildung 45: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Permeabilität und dem Injektionsdruck für einen mittleren Porendurchmesser von 830 μm und die Fließkurven von MFBBa (unmittelbar nach Herstellung)

Bei dem Epoxidharz Epojet LV handelt es sich um eine molekulardispersive Flüssigkeit. Sie ist nach den diskutierten Prozessvorstellungen in die beschriebenen Porenräume injizierbar, wird aber als Injektionsmittel für eine zweite Injektionsstufe angesehen. Diese wurde nicht weiter untersucht.

5.2 Injektion einer Probe Laborkomposit im Labor

Die Injektion mit der MFBBa-Suspension wurde im Labor an einer künstlich hergestellten Kompositprobe (Laborkomposit mit Kontakt A1-Basisrezeptur/Salinar) getestet. Die Herstellung der Probe erfolgte durch die TUC unter Verwendung der Steinsalzkerne nach der Durchführung der geomechanischen Untersuchungen, siehe Anlage 5. Die axial halbierten Steinsalzkerne sind im Labor in einem KG - Rohr mit einem MgO-Baustoff der A1-Basisrezeptur vergossen worden, siehe Teil 5 des Technischen Anhangs.

Im Rahmen der Injektion erfolgten folgende Schritte:

Untersuchungen vor Injektion:

- Vor der Injektion wurde an der Kernprobe die Permeabilität für Gas im stationären Versuch mit $2,6\text{E-}14 \text{ m}^2$ ermittelt.
- Im Anschluss wurde am HZDR in Auswertung einer CT-Aufnahme der die Porosität und die Porengrößenverteilung ermittelt und visualisiert, siehe Anlage 7.3.3.

Durchführung der Injektion mit MFBBa:

- Die Probe wurde vor der Injektion in einer Triaxialzelle bei einem maximalen Manteldruck von 3,7 MPa über einen Zeitraum von >50 h eingespannt.
- Eine Benetzung oder Befeuchtung des Prüfkörpers vor Injektion zur Beeinflussung der

- Benetzbarkeit erfolgte nicht.
- Im Zuge der Injektion wurde die MFBBa-Suspension über ca. 1 h bei max. 3,0 MPa mit einer Handpumpe in den Prüfkörper gepresst. Nachdem ausgangsseitig Lösung austrat, wurde die Injektion beendet.
- Die Probe verblieb für eine Dauer von 24 h unter Aufrechterhaltung des Manteldruckes eingespannt und wurde dann ausgebaut.

Befunde nach Injektion:

Beim Ausbau der Probe wurde deutlich, dass ein Teil der Injektionssuspension zwischen Mantel und Probe eingedrungen war. Einen visuellen Eindruck dazu geben die Fotos des Prüfkörpers in Abbildung 46. Eine Bilanzierung der in den zugänglichen Porenraum verpressten MFBBa-Suspension war unter diesen Bedingungen nicht sicher möglich. Die nach der Injektion ermittelte Permeabilität für Gas betrug $8,9E-18 \text{ m}^2$. Für den Probenkörper ergibt sich infolge der Injektion eine Reduzierung der effektiven Gaspermeabilität um einen Faktor von ca. 3000.



Abbildung 46: Links vor Injektion / rechts nach Injektion

Im Anschluss an die Injektion erfolgte ein erneuter CT-Scan durch das HZDR und eine Visualisierung des injizierten sowie des noch offenen Porenraumes. Im Ergebnis der CT-Untersuchung kann festgestellt werden, dass die Porosität um ca 1/3 reduziert wurde (siehe Anlage 7.3.3.1, Abbildung 128).

Die Befunde lassen sich wie folgt beschreiben:

Der MFBBa befindet sich überwiegend in den Rissen des Wirtsgesteins, aber ausgehend vom Riss im Wirtsgestein wird auch der Kontaktbereich teilweise verschlossen. Ein Teil der Risse, nämlich gut zugängliche Bereiche mit der größten Öffnungsweite, wurde nahtlos verschlossen. Dadurch verringert sich der Volumenanteil der Zonen mit Öffnungsweite über 1 mm. Der Vergleich der Öffnungsweitenverteilung mit der Schichtdicke des Injektionsmittels zeigt, dass Rissweiten $> 1,8 \text{ mm}$ nahezu komplett gefüllt wurden und zwischen 1 und 1,8 mm mit einem signifikanten Anteil. Kleinere Hohlraumweiten werden dagegen bei dem gegebenen Druck selten gefüllt, vermutlich nur, wenn sie unmittelbaren Kontakt zu Wegsamkeiten mit großer

Öffnungsweite haben. Es fällt auf, dass sich der verbleibende ungefüllte Volumenanteil auf kleine Öffnungsweiten (unter 0,5 mm) beschränkt. Dies ist der Fall, obwohl anscheinend die größeren Porenweiten nicht komplett gefüllt wurden, da die Volumenanteile der ursprünglichen Hohlräume immer größer sind, als die Dicke der Füllung. Ob dieser Effekt ein Artefakt aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens ist, ist offen, könnte aber mittels gezielt entnommener kleiner Teilproben untersucht werden.

Insgesamt ergibt sich, dass in den Zonen, die durch Injektionsmittel erreicht werden, eine sehr gute Vergütung erreicht wird, indem nur Poren unter 0,5 mm erhalten bleiben. Große Anteile des Hohlraumvolumens werden aber im ersten Durchgang nicht erreicht und wären in einem zweiten Durchgang eventuell nur über diese engen verbleibenden Zugänge mit einem lösungsestützten Injektionsmittel und dem entsprechend höheren Druck erreichbar.

6 Technischer Anhang – Teil 3

6.1 MgO-Massenbaustoff A1- Rezepturanpassung

Als MgO-Massenbaustoff wurde als Basis die in der Schachtanlage Asse verwendete Sorelbetonrezeptur A1 gewählt, da diese sich in der praktischen Anwendung bewährt hat [4], [12] [13], [14].

6.1.1 A1-Basisrezeptur und Ausgangsstoffe

Für die Herstellung von Sorelbeton A1 werden die Ausgangsstoffe Magnesiumoxid, Steinsalzgrus und Magnesiumchloridlösung verwendet. Sie wird im Folgenden als A1-Basisrezeptur bezeichnet. Das Massenverhältnis, in welchem die Sorelbeton A1-Basisrezeptur gemischt wird, ist in der folgenden Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Ausgangsstoffe der A1-Basisrezeptur [3]

Ausgangsstoff	Massenanteile in Prozent [Ma.-%]	Kilogramm pro Kubikmeter [kg/m ³]
Magnesiumoxid	11,3	218
Steinsalzgrus	63,7	1237
MgCl ₂ -Lösung	25	485
Gesamt	100	1940

Der Massenanteil des jeweiligen Bestandteils basiert auf den Eigenschaften und der Reinheit der unterschiedlichen Ausgangsstoffe. Für alle diese Ausgangsstoffe liegen Kriterien vor, die erfüllt werden müssen, um verwendet werden zu können. Diese sogenannten Annahmekriterien der einzelnen Ausgangsstoffe sind im Folgenden aufgeführt.

6.1.2 Kriterien Magnesiumoxid

Für den MgO-Beton A1-Basisrezeptur hat das gelieferte MgO eine Reinheit von mindestens 93% aufzuweisen [15]. In der nachstehenden Tabelle 5 sind Grenzwerte für unterschiedliche Bestandteile des MgO spezifiziert. Weiterhin darf der Glühverlust des Magnesiumoxids max. 4,00 Ma.-% und der Feuchtverlust max. 0,50 -Ma.% zu betragen.

Tabelle 5: Grenzwerte für Bestandteile des MgO

Bestandteil	Anteil [Ma.-%]
MgO min.	93,00
CaO max.	2,70
SiO ₂ max.	3,00
Fe ₂ O ₃ max.	0,70
Al ₂ O ₃ max.	0,30

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Reaktivität des MgO, die mit Hilfe des Zitronensäuretests bestimmt wird. Die Reaktivität gibt Auskunft, wie schnell das Material reagiert und ist maßgeblich für die zeitliche Entwicklung der Erhärtung und der Freisetzung der damit verbundenen Erhärtungswärme. Für den geplanten Einsatzzweck wird eine Zitronensäurereaktivität zwischen 150 s und 500 s bis pH 7 angestrebt, um die Verarbeitbarkeit des Baustoffs als Ortbeton zu gewährleisten [15]. Bei der Zitronensäurereaktivität wird die Zeit ermittelt, die die einzelnen Materialproben - in diesem Fall das reine MgO - benötigen, um den pH-Wert 7 zu erreichen. Je weniger Zeit benötigt wird, desto reaktiver ist das Material.

6.1.3 Magnesiumoxid

Zu Beginn des Projektes wurde Magnesiumoxid von der Firma Normag verwendet, welches in Bigbags angeliefert wurde. Dieses Magnesiumoxid (MgO Normag Calvörde) wurde bei allen Voruntersuchungen, die mit der A1-Basisrezeptur durchgeführt wurden, verwendet. Für die Dammerrichtung wurde das MgO zur einfacheren Handhabung in Säcke umgefüllt. Durch die Lagerung von ca. einem Jahr und die Umfüllung des Materials bildeten sich Agglomerate, woraufhin das Material am Tag der geplanten Betonage (01.03.2021) als unbrauchbar verworfen werden musste. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass das MgO in 25 kg-Säcken geliefert werden sollte, um es besser zu handhaben.

Da das von der Normag gelieferte MgO aus China stammte und mit Lieferschwierigkeiten⁵ zu rechnen war, wurde weiteres Magnesiumoxid unterschiedlicher Lieferanten wurde getestet (Tabelle 6).

Die nachstehende Tabelle zeigt die Ergebnisse des Zitronensäuretests der getesteten MgO-Materialproben.

Tabelle 6: Übersicht der Prüfergebnisse zur Reaktivität der getesteten MgO-Materialproben

MgO	Lehmann&Voss Luvomag MO F-2	Magnesia Magnesia 312	Normag MgO Calvörde	Styromag	Normag (CT 20-05)
Zeit [s]	90	237	264	235	235

Das MgO „Lehmann&Voss Luvomag MO F-2“ benötigte im Vergleich die kürzeste Zeit, um den angestrebten pH-Wert zu erreichen. Es kann somit als das reaktivste Material angesehen werden. Es lag außerhalb der als geeignet angesehenen Reaktivitätsbandbreite. Die anderen MgO-Sorten benötigten deutlich länger, um den geforderten pH-Wert von 7 zu erreichen und lagen innerhalb der für die Verarbeitbarkeit als geeignet angesehenen Bandbreite.

So wurde im nächsten Schritt das in Tabelle 6 aufgeführte MgO der Firma Magnesia ausgewählt. Die Reaktivität des zugesandten Musters und dem später tatsächlich gelieferten Material wichen jedoch stark voneinander ab, sodass von der Nutzung abgesehen wurde und abermals neues Material beschafft werden musste.

Es stellte sich heraus, dass die Lieferanten Magnesia und Normag keinen direkten Einfluss auf die Qualität des Produktes hatten. Eine Garantie über eine Reaktivitätsspanne weiterer MgO-Produkte wurde nicht gewährleistet. Hinzu kam, dass die Lieferungen auch ohne Berücksichtigung der Lieferkettenprobleme mehrere Wochen gebraucht hätten, bevor sie in Deutschland hätten beprobt werden können.

Aus diesem Grund wurde der direkte Kontakt zu einem Hersteller gesucht, der eine gleichbleibende Qualität gewährleistete. Der MgO-Produzent Styromag sicherte diese Anforderung zu. Dieses MgO war zuvor nicht in Erwägung gezogen worden, da es das Reinheitskriterium gemäß Tabelle 5 nicht erfüllte. Die beprobte MgO-Materialprobe erreichte bei dem Zitronensäuretest den notwendigen pH-Wert nach 235 Sekunden und wies einen durchschnittlichen MgO-Gehalt von 83,1 % auf. In der Anlage 3.1 befinden sich die Produzentenangaben über die Bestandteile und Eigenschaften des MgO und die ermittelte Reaktivitätsspanne, die zwischen 238 s und 305 s lag. In Absprache mit den Baustoffexperten der Projektbeteiligten wurde daraufhin das MgO-Massenverhältnis der Rezeptur angepasst und die anderen Bestandteile als vernachlässigbar bewertet. Im Vorgriff auf Kapitel 6.2.6 soll angemerkt werden, dass als Entscheidungskriterium zusätzlich die Temperaturentwicklung des Baustoffes bei der Aushärtung herangezogen wurde.

⁵ Bedingt durch die Corona-Pandemie waren die Lieferketten insbesondere nach China unterbrochen oder ganz ausgesetzt.

Zum Vergleich: Im Zuge der Annahme des MgO für das Pilotbauwerk wurden alle Lieferpaletten beprobt. Die Reaktivität lag zwischen 174 s und 199 s, so dass im Ergebnis festzustellen ist, dass alle Proben in der als geeignete angesehenen Bandbreite lagen.

6.1.4 Kriterien Salzgrus

Der Zuschlagstoff Salzgrus hat sowohl Kriterien bezüglich seiner mineralogischen Zusammensetzung als auch seiner Korngrößenverteilung zu erfüllen [15]. In der nachstehenden Tabelle 7 kann die zulässige Korngrößenverteilung für das Salzgrus entnommen werden.

Tabelle 7: Zulässige Bandbreite der Korngrößenverteilung des Zuschlagstoffes Steinsalz [15]

Fraktion[mm]	Siebrückstände [Ma.-%]	Schwankungsbreite [Ma.-%]	Summe der Siebdurchgänge [Ma.-%]
8,0 - 16,0	0,0	± 0,0	100,0
4,0 - 8,0	1,0	± 0,5	99,0
2,0 - 4,0	19,0	± 5,0	80,0
1,0 - 2,0	22,0	± 5,0	58,0
0,5 - 1,0	17,0	± 5,0	41,0
0,25 - 0,5	12,0	+5,0 bis -3,0	29,0
0,125 - 0,25	12,0	+10,0 bis -3,0	17,0
0,063 - 0,125	9,0	+10,0 bis -3,0	8,0
< 0,063	8,0	+10,0 bis -3,0	0,0

Das verwendete Steinsalz hat einen Halitgehalt von mindestens 90 % vorzuweisen. Polyhalit, Anhydrit und Kieserit dürfen zusammen 10 % nicht überschreiten. Der Carnallitanteil muss sogar kleiner als 3 % sein [16].

6.1.5 Salzgrus

Nachdem Salzkornfraktionen verschiedener Bergwerke untersucht worden waren, wurden verschiedene Kornfraktionen der Grube Sondershausen (GSES) ausgewählt, um den Steinsalzgrus zusammenzumischen. Dafür wurden die Kornfraktionen von „Band 6“ und „Band 8“ sowie Feinsalz (Staubsalz) zu eingesetzt [17].

Für die Analyse der einzelnen Kornfraktionen wurden beim Hersteller in der Grube die Förderbänder beprobt (Abbildung 47). Das jeweilige Förderband wurde hierfür angehalten und an drei unterschiedlichen Bandabschnitten Proben entnommen. In einem Abstand von 20 Minuten wurde dies wiederholt.



Abbildung 47: Beprobung einer Bandanlage am 21.01.2020

Die entnommenen Proben wurden anschließend mithilfe von Riffelteilern mehrmals halbiert, sodass die zu analysierende Probe eine Masse zwischen 370 g und 800 g hatte. Anschließend wurde diese Probenmenge mit einem Siebturm des Typs Haver EML 200 digital T auf die Korngröße analysiert. Folgende Siebe mit Maschenweiten wurden benutzt: 4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,125 mm und 0,063 mm.

Das Feinsalz wurde mithilfe eines HELOS (H2387) & RODOS, R5 gemessen, da diese Salzproben zu feinkörnig sind und nicht mit einem Siebturm analysiert werden können. Die kumulativen Korngrößenverteilungen sind in Anlage 3.2 aufgeführt.

Die Salzkornfraktionen von „Band 6“ und „Band 8“ wurden zusammen mit dem Feinsalz so kombiniert, dass eine optimale Anpassung an die Korngrößenverteilung der A1-Basisrezeptur entstand (Abbildung 48).

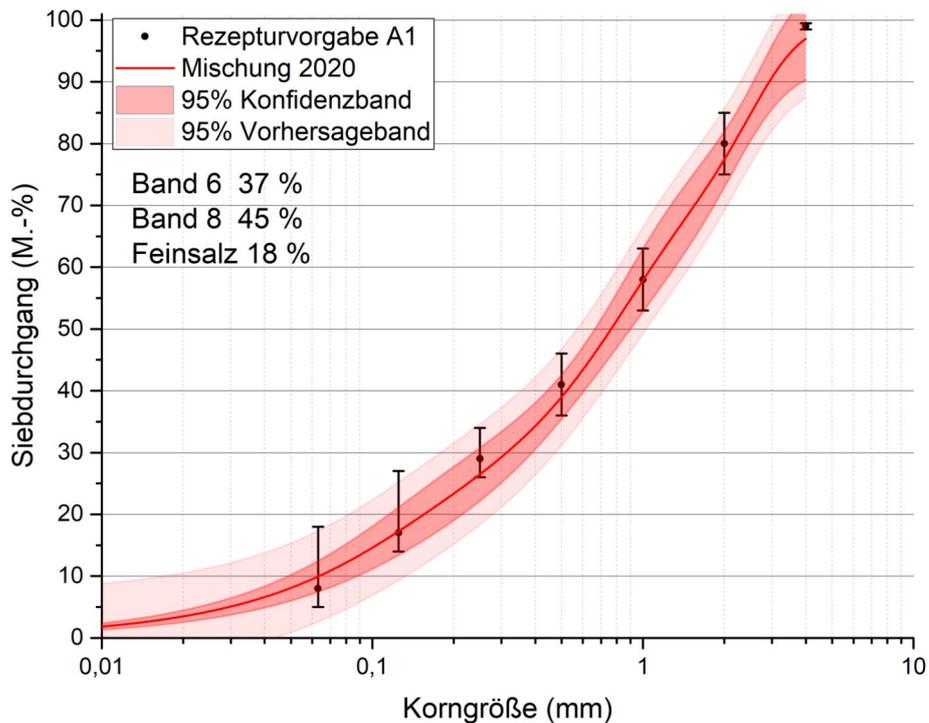


Abbildung 48: Korngrößenverteilung bei einem Anteil von 37 % Band 6, 45 % Band 8 und 18 % Feinsalz

Weiterhin wurden die Bestandteile des Steinsalzes an dem Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal bestimmt. Aus nachfolgender Tabelle 8 kann der Gesamtanteil von Halit, Anhydrit und den wasserunlöslichen Mineralen (WUM) entnommen werden. Die Analyseergebnisse können Abweichungen von bis zu ca. 2 % bezogen auf die Gesamtmasse aufweisen.

Tabelle 8: Mineralbestandteile des Salzes von den verschiedenen Bändern aus Sondershausen

	Gesamt [Ma.-%]	Halit [Ma.-%]	Anhydrit [Ma.-%]	WUM [Ma.-%]	WUM (Minerale)
FS 3.1	99,9	95,7	3,8	0,4	Quarz / Illit-2 / Clinochlor / Magnesit
FS 5.1	100,7	95,3	4,9	0,5	Quarz / Illite-2 / Clinochlor / Magnesit
Band 6.1	101,3	99,7	1,7	-	
Band 6.2	101,8	100,3	1,5	-	
Band 8.1	101,3	100,1	1,2	-	
Band 8.2	100,5	99,4	1,1	-	

Anhydritkörner weisen eine im Vergleich zum Halit relativ geringe Korngröße auf und gelangen in der Aufbereitung durch das Klassieren nach Korngrößen in den Bereich des Feinsalzes. Dies ist einer der Hauptgründe für das vermehrte Auftreten von Anhydrit im Feinsalzbereich. Auch andere Unreinheiten des Steinsalzes kommen nach dem Klassieren vor allem im Feinsalz vor, während diese Minerale auf „Band 6“ und „Band 8“ in einer solch geringen Konzentration vorliegen, dass diese analytisch kaum nachzuweisen sind.

Festzustellen ist, dass der zusammengemischte Salzgrus als Ausgangskomponente die vorgegebenen Spezifikationen erfüllte. Der so zusammengesetzte Salzgrus wurde bei der Durchführung der ersten Mischversuche genutzt. Diese Mischversuche dienten im Rahmen von Vorversuchen vor allem der Gewinnung von Handhabungserfahrungen mit dem Baustoff A1-Basisrezeptur und der verfügbaren Misch- und Fördertechnik.

Zum Vergleich: Für die Errichtung des Halbdammes wurde das Salz in Bigbags angeliefert. Jeder Bigbag enthielt das Salz einer Kornfraktion. Mithilfe eines für Schüttgut geeigneten Probenehmers wurden diese Bigbags stichprobenartig beprobt und auf die Korngrößenverteilung des darin enthaltenen Salzes untersucht.

Die für den Damm gelieferte Menge Steinsalz schwankte leicht in dem Feinkornanteil, sodass eine nachträgliche Erhöhung des Feinsalzanteils um 5 % durchgeführt wurde, während der Anteil von „Band 6“ um 5 % reduziert wurde.

6.1.6 Kriterien Anmachlösung

Die Magnesiumchloridlösung hat die in Tabelle 9 angegebene Zusammensetzung aufzuweisen [15]:

Tabelle 9: Zulässige Bandbreite der Magnesiumchloridlösung

Komponenten der MgCl ₂ -Lösung	Bandbreite
MgCl ₂	375 - 450 g/L
KCl	< 5 g/L
NaCl	3 -10 g/L
MgSO ₄	20 - 40 g/L
CaSO ₄	< 3 g/L
Fe	< 10 mg/L
Dichte (20 °C)	1,300 – 1,350 g/cm ³

6.1.7 Anmachlösung

Die von der DEUSA bezogene SES-30 %-Lösung entsprach bis auf die Dichte allen Anforderungen. Da die Dichte jedoch nur geringfügig unterhalb der Anforderungen lag, wurde die MgCl₂-Lösung nach Absprache mit den Baustoffexperten der Projektpartner genutzt. Das Produktdatenblatt und die Analyseergebnisse finden sich in Anlage 3.3 und Anlage 3.4.

6.2 Vorversuche - Baustoffblöcke und Bohrungsverfüllungen

Anhand von Vorversuchen und dem Betonieren von Baustoffblöcken im Technikumsmaßstab sollten unter Tage in Teutschenthal erste projektinterne Handhabungserfahrungen bezüglich der Misch- und Fördertechnik gewonnen werden. Das betraf die Zugabe der Ausgangsstoffe in den Mischer, die Mischtechnik und -dauer, die Wirkung von Armierungsmatten, die Qualitätssicherung der Suspensions- und der Festkörpereigenschaften sowie die Temperaturentwicklung während der Erhärtung. Hierfür wurden zwei sogenannte Testboxen aus Holz gefertigt, deren Höhe 0,8 m, Breite: 0,8 m; und Länge: 1,0 m betrug. Sie wurden an zwei aufeinander folgenden Tagen (01.07.2020 und 02.07.2020) befüllt. In der Testbox 1 wurde keine Armierung eingebracht, in Testbox 2 erfolgte eine Oberflächenarmierung.

An diesen zwei Tagen wurden weiterhin 300 mm Bohrungen verfüllt. Dabei handelte es sich zum einen um die Bohrungen zur Optimierung des Verbundes (siehe Kapitel 4.3). Auf diese wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Zum anderen erfolgte auch die Verfüllung der Bohrung B01-030 (Abbildung 5, Objekt 2) mit dem Ziel neben dem Vortest zum Überbohren (Kapitel 4.4.1) später Bohrkerne zu gewinnen, die jeweils aus einem Halbzylinder aus Baustoff und Steinsalz bestanden und die Kontaktzone enthielten - Kompositproben. Auch wenn die Kontaktzone einer Bohrungsverfüllung als nicht repräsentativ für ein Dammbauwerk

angesehen wurde, sollten auch hier Handhabungserfahrungen hinsichtlich der Gewinnung von Bohrkernen aus Kontaktzonen gewonnen werden.

Allen Versuchen ist gemeinsam, dass für sie die A1-Basisrezeptur unter Verwendung der MgO Normag Calvörde zum Einsatz kam.

6.2.1 Mischversuche

Die Mischversuche zur Sammlung von Handhabungserfahrungen im Umgang mit den verschiedenen Ausgangsstoffen wurden mit dem Zwangsmischer Filamos m 750 H durchgeführt (Abbildung 49 und Abbildung 50). Dabei wurden erste Erfahrungen zur Mischdauer gewonnen. Darüber hinaus wurde die Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe sowie der Füllungsgrad des Mixers untersucht. Beides hatte wiederum Einfluss auf die Mischtechnik und die Ergebnisse der Qualitätssicherung.



Abbildung 49: Übersicht über die eingesetzte Mischtechnik



Abbildung 50: Befüllung des Zwangsmischers Filamos m 750 H mit Steinsalz

Die ersten Testversuche wurden am 1. und 2. Juli 2020 in der Grube Teutschenthal durchgeführt. Als Ausgangsstoffe wurde das Steinsalzgemisch der GSES, die MgCl₂-Lösung der DEUSA und das MgO der Normag Calvörde verwendet. Die angemischte Suspension entsprach der A1-Basisrezeptur gemäß Tabelle 4.

Im Rahmen der Mischversuche wurde der Einfluss der Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe untersucht. Es wurde zuerst das Salz, anschließend die Flüssigkeit und als letztes das MgO hinzugefügt. Ein Versuch, die Flüssigkeit als erstes in den Zwangsmischer zuzugeben, wurde abgebrochen, da die Flüssigkeit an der Seite des Schiebers, der für den Abfluss der Baustoff suspension dient, auslief.

Letztlich hat sich für die eingesetzte Mischtechnik folgende Reihenfolge bewährt:

1. Salzzugabe
2. Flüssigkeitszugabe
3. Zugabe von MgO

Während dieser Versuche wurde am ersten Tag ein Volumen von 632,5 Litern (50 % des Behältervolumens) angemischt. Mit diesem wurden die beiden Testboxen zur Hälfte gefüllt. Um zu verhindern, dass sich Salzstaub auf dem angemischtem Material absetzt, wurden die Testboxen mit Plexiglasfolie abgedeckt.

Anmerkungen: Verschiedene Ideen wurden aufgegriffen, um die Mischzeit zu reduzieren. So wurden in Laborversuchen das Steinsalz und das MgO bereits zuvor zusammengemischt. Bei der Flüssigkeitszugabe auf das Stoffgemisch traten Agglomerationen auf. Aus diesem Grund wurde das MgO wieder nach der Flüssigkeit zugegeben.

6.2.2 Sedimentationstabilität der Baustoffsuspension

Für die Errichtung des STROEFUN-Halbdammes war ein lagenweises Betonieren unter Inkaufnahme von Betonierfugen – keine frisch in frisch Betonage - angedacht.

Um die Anbindung von zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingebrachten Betonierchargen zu untersuchen, wurde die angemischte Baustoffsuspension für die Baustoffblöcke in einem zeitlichen Abstand von 24 Stunden eingebracht. Hierdurch sollte ermittelt werden, ob ein tageweises Betonieren durchgeführt werden kann.

Zu Beginn des zweiten Befüllungstages wurden in der Testbox 1 eine ungefähr 4 mm dicke Flüssigkeitsschicht bemerkt, die sich vom darunter befindlichen Material abgeschieden hatte. Auch befand sich Überstandslösung auf weiteren, in KG-Rohren abgegossenen Probekörpern (Abbildung 51 und Abbildung 52). Auf der Oberfläche der zweiten Testbox wurde keine Überstandslösung festgestellt. Hierzu ist anzumerken, dass die Holzschalungen ggf. ein Abseigern der Überstandslösung zulassen, was im im Falle des KG-Rohrs nicht zutrifft.



Abbildung 51: Bildung einer Überstandslösung in Testbox 1



Abbildung 52: Überstandslösung auf einem Probekörper nach einem Tag.

Vor dem vollständigen Befüllen der Testbox 2 wurde dort die Oberflächenarmierung eingehängt, sodass sie sich 3 cm unter der späteren Betonoberfläche befand. Anschließend wurden die Testboxen vollständig aufgefüllt, wobei die Ausgangsstoffe in gleicher Reihenfolge wie an Tag 1 in den Zwangsmischer gefüllt wurden und das gleiche Volumen angemischt wurde.

Fünf Monate später wurde aus dem Bereich der Betonierfuge der Testbox 1 eine Kernbohrung gezogen mit dem Resultat, dass der Kern an der Stelle der Betonierfuge auseinanderfiel. Die Kanten, an denen der Bohrkern auseinanderfiel, wiesen eine glatte Oberfläche auf, sodass die Annahme naheliegt, dass zwischen den beiden zeitlich versetzt eingebrachten Chargen kein Vermischen oder keine Anbindung des Materials stattgefunden hat.

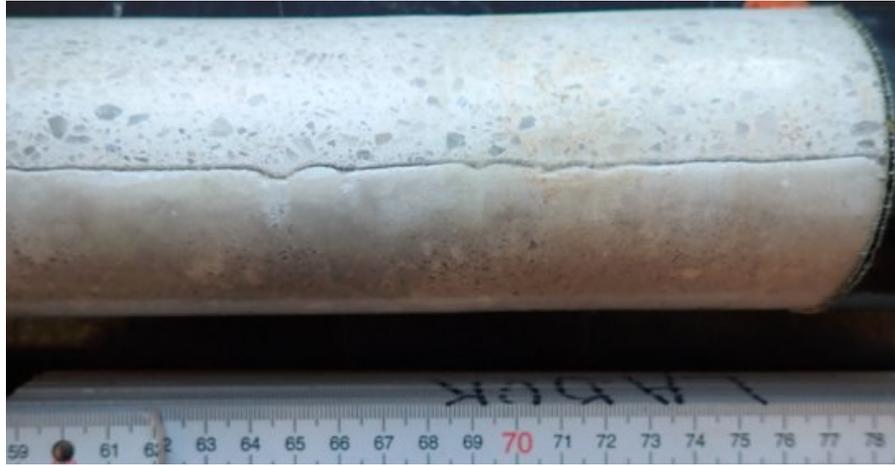


Abbildung 53: Bohrkern aus der Betonierfuge der Testbox 1

Die Abbildung 53 zeigt die Kontaktbereich zwischen den beiden Betonierlagen. Der Bohrkern befindet sich in diesem Bild noch eingeschweißt in der Kunststoffolie, dennoch ist der Kontaktbereich der Betonierlage deutlich zu erkennen. Es zeigt sich, dass vor der Erstarrung des Baustoffs eine Sedimentation stattgefunden hat. Obwohl beide Chargen die gleichen Ausgangsstoffe und die gleiche Rezepturzusammensetzung besaßen sowie auf die gleiche Weise hergestellt wurden, weist die obere Lage des Bohrkerns einen hohen Anteil an grobkörnigen Zuschlagspartikeln auf. In den darunter befindlichen Lagen sind keine groben Zuschlagpartikel zu erkennen.

In der Testbox 2 sollte die integrale Permeabilität des Kontaktbereichs zwischen den beiden Betonageschichten gemessen werden. Diese Messung scheiterte jedoch, da es bereits beim Bohren des erforderlichen Bohrlochs senkrecht zur Kontaktfläche zu einer Ablösung der beiden Betonageschichten gekommen ist.

Fazit: Die A1-Basisrezeptur erwies sich bei Einsatz der gewählten Ausgangsstoffe und der Mischtechnik am Standort Teutschenthal als nicht sedimentationsstabil, was auf den geringen Feinkornanteil des Salzgruses zurückgeführt wurde, der eher an der Untergrenze der Bandbreite lag (Abbildung 48). Aus diesem Befund wurde geschlussfolgert, dass der Feinkornanteil erhöht werden muss.

6.2.3 Wirkung von Armierungsmatten

Des Weiteren wurde die Wirkung der Armierungsmatten [18] auf die Ausbildung von oberflächennahen Rissen getestet. Es sollte ermittelt werden, ob diese Armierungsmatten als inneres Widerlager rissbeschränkend wirken können und die Bildung von Rissen durch die Abtragung des Expansionsdruckes im Baukörper reduzieren können. Die ausgewählten Armierungsmatten haben eine Maschenweite von 10 x 10 mm. Weitere Produktinformationen befinden sich in Anlage 4. Wie bereits erwähnt wurde vor dem vollständigen Befüllen der Testbox 2 die Oberflächenarmierung eingehängt, sodass sie sich 3 cm unter der späteren Betonoberfläche befand.

Der Einfluss von Armierungsmatten auf die Oberfläche wird durch die nachstehenden Abbildungen verdeutlicht. Die Testbox 2, in welche eine Oberflächenarmierung eingebracht war, weist deutlich weniger Oberflächenunebenheiten und Oberflächenrisse auf als die Testbox 1.



Abbildung 54: Oberfläche der Testbox 1



Abbildung 55: Oberfläche der Testbox 2

Wie in Abbildung 54 erkennbar hat sich auf der Testbox 1 eine unregelmäßige poröse Schicht gebildet. Auch sind einige Risse zu erkennen, wie beispielsweise in dem linken unteren Bereich. Die Testbox 2 weist eine glatte Oberfläche auf (Abbildung 55). Im Bereich der Testbox 2 kann ebenfalls ein oberflächennaher Riss erkannt werden. Jedoch wies die Testbox 2 mit den Armierungsmatten im Vergleich zur Testbox 1 eine homogenere Oberflächenausbildung und deutliche Rissreduktion auf.

Aufgrund dieses Ergebnisses wurden die Armierungsmatten wie geplant bei der späteren Errichtung des Damms verwendet.

6.2.4 Qualitätssicherung des Baustoffs

Begleitend zu den Versuchen im Technikumsmaßstab wurde die Qualitätssicherung des Baustoffs vorgenommen.

Suspensionseigenschaften

Es wurden die Suspensionsdichte (DIN EN 12350-6), die Temperatur der Suspension und das Fließmaß der Suspension mittels Fließrinne (DIN EN 13395-2) bestimmt.

Die Suspension wies eine Dichte von $1,85 \text{ g/cm}^3$ auf die Suspensionstemperatur betrug $29,3 \text{ °C}$ und die Suspension wurde als sehr fließfähig eingestuft, vgl. auch Tabelle 11.

Quasiadiabatische Temperaturerhöhung während des Abbindens

Da während der Erhärtung von Magnesiabindern Wärme entsteht, ist die Temperaturentwicklung des Baustoffs während der Erhärtung eine aussagekräftige Kenngröße für die Qualitätssicherung. Im Labor wird idealerweise die adiabatische Temperaturerhöhung des Baustoffs aufgezeichnet und dokumentiert [19]. Da adiabatische Kalorimeter allerdings nicht baustellentauglich sind, wird auf die quasiadiabatischen Tonnen (siehe Abbildung 56) zurückgegriffen. Diese Tonnen sind mit Isolationsmaterial ausgekleidet, sodass die Wärmeabfuhr reduziert wird. In die Mitte des Isolationsmaterials wird Baustoff suspension in einem KG-Rohr platziert. In die Suspension werden Temperaturfühler eingebracht, mit welchen die Daten aufgezeichnet werden. Gegebenenfalls können die ermittelten Temperaturkurven in der Folge mit Hilfe der im Labor gemessenen adiabatischen Temperaturerhöhung korrigiert werden, was für eine baubegleitende Qualitätssicherung allerdings nicht nötig ist. Viel mehr dienen Temperaturkurven einer gleichen Baustoffrezeptur als Referenzkurven für den Vergleich. Die Kurven vergleichbarer Baustoffrezepturen bieten eine Möglichkeit, das verwendete Magnesiumoxid vergleichend zu bewerten und somit die Qualität dieses Baustoffbestandteils sicherzustellen.



Abbildung 56: Quasiadiabatisches Kalorimeter im untertägigen Einsatz

Die Abbildung 57 stellt beispielhaft die Temperaturentwicklung des angemischten Materials vom 01.07.2020 dar. Nach dem Mischen und Einfüllen der Suspension wurde nach ca. 1400 Minuten die maximale Temperaturdifferenz zur Starttemperatur erreicht. Die maximale Temperaturdifferenz zur Ausgangstemperatur dieser Messung betrug 21,8 K. Nach Erreichen des Maximums sank die Temperatur in dem Probenkörper und die Temperatur der Probe passte sich nach ca. 8500 Minuten der Umgebungstemperatur an.

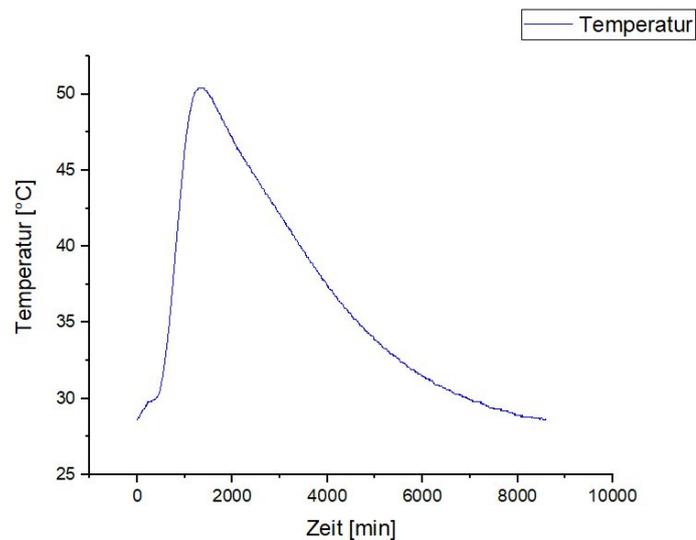


Abbildung 57: Quasiadiabatischer Temperaturverlauf des verwendeten MgO Normag Calvörde

Anmerkung: Das Ergebnis der Maximaltemperatur der quasiadiabatischen Messung war im Vergleich zu den Erfahrungswerten aus der Asse gering [3], vgl. Tabelle 10, während die Zeitdauer, in der das Maximum erreicht wurde, nicht stark abwich und sich die Unterschiede auf die leicht geringere Starttemperatur zurückführen lassen.

Tabelle 10: Messdaten zur quasiadiabatischen Temperaturerhöhung der A1-Basisrezeptur - Starttemperatur, maximale Messtemperatur und Temperaturerhöhung

Messung	Starttemperatur	Maximale Messtemperatur	Temperaturerhöhung
1	28,3 °C	74,6 °C	46,3 K
2	30,5 °C	85,7 °C	55,2 K
3	31,1 °C	81,7 °C	50,6 K
4	31,4 °C	84,4 °C	53,0 K
5	33,9 °C	75,1 °C	41,2 K
6	34,4 °C	92,5 °C	58,1 K
7	37,1 °C	86,1 °C	49,0 K
8	37,1 °C	86,4 °C	49,3 K

Festkörpereigenschaften

Nach 7 und 28 Tagen sind einaxiale Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit des ausgehärteten Betons zu ermitteln (DIN EN 196-1). Dazu wurde Baustoffsusension in Formen abgegossen. Das Prüfverfahren ist schematisch in Abbildung 58 dargestellt.

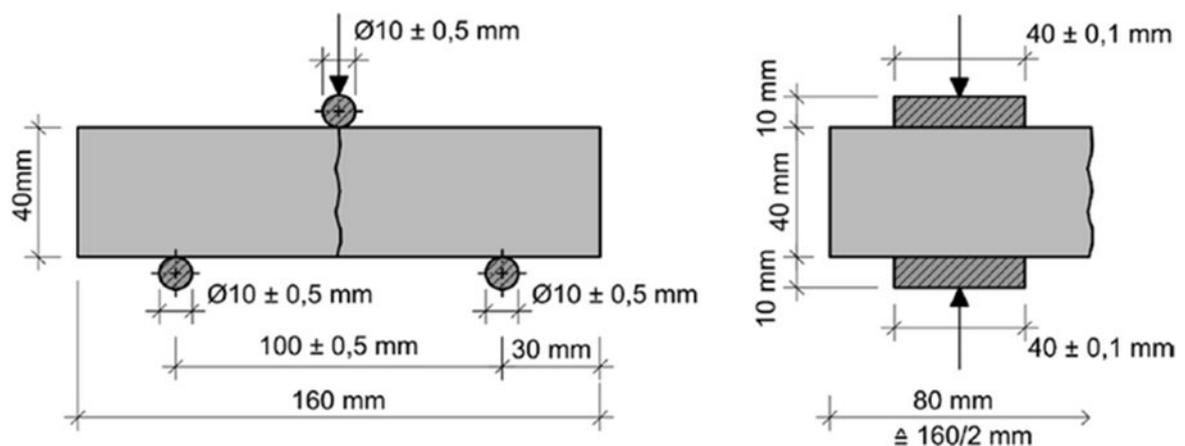


Abbildung 58: Schematische Darstellung der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen

Die entnommenen Proben wiesen im Durchschnitt eine Druckfestigkeit von 42,0 MPa (n=6) nach sieben Tagen auf. Nach 28 Tagen betrug die Druckfestigkeit 49,6 MPa (n=12). Die Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen betrug 10,6 MPa (n=3) und nach 28 Tagen 10,3 MPa (n=6). Diese Werte wurden als ausreichend erachtet und keine Änderung der Rezeptur aufgrund der mechanischen Eigenschaften angestrebt.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Qualitätssicherung aus den Vorversuchen zusammengefasst.

Tabelle 11: A1-Basisrezeptur – Übersicht über die durchschnittlichen Kenngrößen der Qualitätssicherung

Parameter	Bemerkung	Einheit	
Suspensionsdichte		g/cm ³	1,85
Suspensionstemperatur		°C	29,3
Fließmaß nach 30 s / max. (Probenahme aus Leitung)	Fließrinne	mm	656/730
Quasiadiabatische Temperaturerhöhung		K	21,8/17,7
Biegezugfestigkeit (Prisma) 7d, Lagerung bei ca. 27 °C		MPa	10,6
Einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 7d, Lagerung bei ca. 27 °C		MPa	42,0
Biegezugfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 23 °C		MPa	10,3
Einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 23 °C		MPa	49,6

6.2.5 Reaktion auf die Ergebnisse zur Sedimentationsstabilität - Materialtechnik

Im Ergebnis der Untersuchungen zur Sedimentationsstabilität zeigte sich die Notwendigkeit, den Feinkornanteil des Salzzuschlags zu erhöhen. Da nicht ausreichend Staubsalz zur Verfügung stand, wurde stattdessen – wie auch in der Praxis üblich – Anhydritmehl zur Erhöhung des Feinkornanteils genutzt.

Zusätzlich zu den vorgeschriebenen drei Ausgangsstoffen wurde Anhydritmehl der Baustoffrezeptur zugemischt, denn, wie bereits in Kapitel 6.1.5 erwähnt, kann Anhydrit auch als Verunreinigung im Steinsalz vorkommen und ist in begrenzter Menge zulässig. Das Anhydritmehl wurde von der Firma Casea bezogen, in der Anlage Anlage 3.5 befindet sich das Produktdatenblatt.

Am Institut für Aufbereitung und Deponietechnik der TU Clausthal wurden ein Glühverlust von 1,6 % und keine weiteren Bestandteile neben dem Anhydrit festgestellt.

Die folgenden Aufnahmen Abbildung 59 und Abbildung 60 aus Laborversuchen zeigen ein deutlich homogeneres Erscheinungsbild des A1-Betons bei der Zugabe von Anhydritmehl.



Abbildung 59: Linke Mischung: Sorelbeton ohne Anhydritmehl, rechte Mischung: mit Anhydritmehl (8% zusätzlich) [20]



Abbildung 60: Linke Mischung: Sorelbeton mit Anhydritmehl (8% zusätzlich), rechte Mischung: Sorelbeton ohne Anhydritmehl [20]

Durch die Zugabe von 8 % Anhydrit wurde die Sedimentationsstabilität verbessert und das Auftreten einer Überstandsflüssigkeit minimiert. Nach weiteren Versuchen und unter Berücksichtigung der auch durch den Wechsel des MgO zusätzlich bedingten Anpassung wurde der erforderliche Anteil an Anhydritmehl wieder auf 4 % reduziert.

6.2.6 Reaktion auf die Ergebnisse - Temperaturentwicklung

Wie bereits in Kapitel 6.1.3 ausgeführt, wurde nach den Vorversuchen das MgO unterschiedlicher Lieferanten getestet. Zusätzlich zur Zitronensäurereaktivität erfolgte die Messung der quasiadiabatischen Temperaturentwicklung des Baustoffs beim Erhärten. Hierfür wurden sowohl Versuche in den Laboren der beteiligten Projektpartner als auch in Teutschenthal durchgeführt.

Im Folgenden sind sieben aufgezeichnete Temperaturverläufe dargestellt (Abbildung 61). Sieht man von der Variante Teutschenthal Bau 7/27/2021 ab, wurde in allen Fällen die gleiche Baustoffrezeptur – A1-Basisrezeptur - verwendet und nur die MgO-Sorte variiert. Nicht nur für die Vergleichbarkeit der MgO-Sorten sind diese Messungen von Relevanz, vielmehr stellt die quasiadiabatische Temperaturentwicklung auch eine wichtige Kenngröße für die Qualitätssicherung des Baustoffes dar.

Von ihrer Ausgangstemperatur startend zeigen die Kurven im Allgemeinen einen ähnlichen Verlauf. Nach einem leichten Anstieg zu Beginn der Messungen steigen die Messkurven steiler an bis die Maximaltemperatur erreicht wird. In der Folge sinken die Temperaturen und die Kurven flachen ab. Der Temperaturabfall lässt sich im Allgemeinen als Abkühlphase bezeichnen. Abhängig von der Isolation und allgemeinen Beschaffenheit des quasiadiabatischen Kalorimeters unterscheidet sich der Temperaturverlauf in der Abkühlphase. Dieser Teil der Kurven ist für die Qualitätssicherung und die Vergleichbarkeit allerdings nur von nachgeordneter Bedeutung. Wichtige Kennwerte der unterschiedlichen Kurven sind die Maximaltemperatur bzw. die maximale Temperaturdifferenz zwischen Start- und Maximaltemperatur, die Dauer bis zum Erreichen des Temperaturmaximums sowie der Zeitpunkt des Beginns der Temperaturentwicklung.

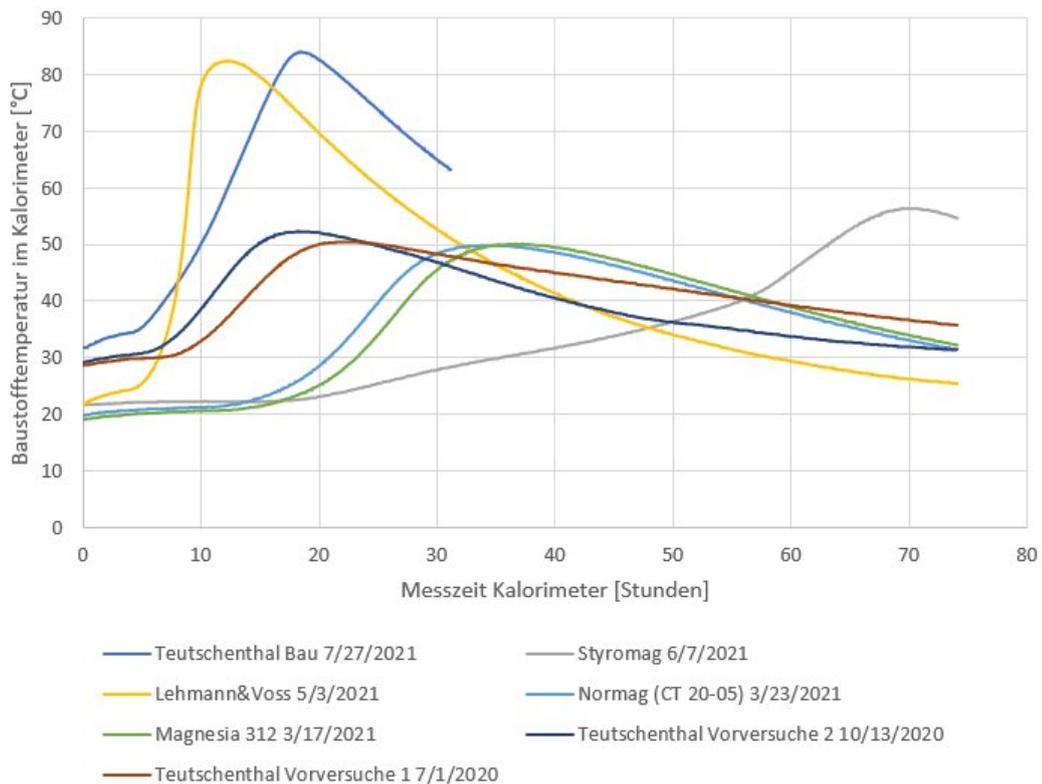


Abbildung 61: Aufzeichnungen der Temperaturverläufe von verschiedenen quasiadiabatischen Versuchen

Die Kurven mit der Bezeichnung Magnesia 312 und Normag (CT20-05) haben anfänglich einen sehr ähnlichen Verlauf. Da beide Messungen im Baustofflabor und nicht in der Grube durchgeführt wurden, liegt die Starttemperatur nur bei ca. 20 °C. Nach ca. 12 Stunden ist in der Graphik ein deutlicher Temperaturanstieg zu erkennen und nach ca. 35 Stunden ist die Maximaltemperatur von ca. 50 °C erreicht. In der Folge ist ein Abflachen der Kurven erkennbar und die Abkühlphase beginnt.

Die Kurve, welche als Lehmann & Voss 03.05.2021 bezeichnet ist, hebt sich durch eine sehr hohe Maximaltemperatur von 82 °C von den anderen Kurven ab. Dieses Maximum wird auch unter Laborbedingungen nach ca. 13 Stunden erreicht und auch hier folgt darauf die Abkühlphase bis zurück auf die Ausgangstemperatur von ca. 22°C. Ein im Vergleich schnelleres Erreichen der Maximaltemperatur war aufgrund der geringen Reaktivität (Tabelle 6) zu erwarten.

Die eingesetzte Baustoffmischung unter Verwendung des MgO von Styromag „Styromag 06.07.2021“ weist einen deutlich langsameren Temperaturanstieg auf. Dies lässt auf eine höhere Reaktivität im Vergleich zu den anderen MgO-Sorten schließen. Ausgehend von einer Starttemperatur von ca. 22 °C wird nach ca. 70 Stunden die Maximaltemperatur von ca. 56 °C erreicht. Auffällig ist, dass sie trotz der langen Zeitdauer bis zu ihrem Erreichen im quasiadiabatischen Kalorimeter über den anderen Werten liegt. In diesem Fall wurde schon kurz nach dem Erreichen des Temperaturmaximums der Versuch beendet, sodass der Temperaturverlauf der Abkühlphase nicht vollends aufgezeichnet wurde. Da der Temperaturverlauf der Baustoffmischung mit Styromag MgO im Vergleich zu den anderen MgO-Sorten ebenfalls auf eine ausreichende Verarbeitungszeit hinwies, wurde dieses – wie bereits ausgeführt - aufgrund der Zusicherung der gleichbleibenden Qualität gewählt.

Auffällig ist, dass die Mischungen, die unter Tage in Teutschenthal angemischt wurden, deutlich schneller das Temperaturmaximum erreichten als die anderen Messungen. Die Messungen aus Teutschenthal haben allerdings auch höhere Ausgangstemperaturen.

Anmerkung zum Vergleich: Der Temperaturverlauf, welcher als Qualitätssicherungsmaßnahme beim Bau des Dammes (27.07.2021) aufgezeichnet wurde, erreicht die höchste Baustofftemperatur aller Messkurven. Die Maximaltemperatur belief sich in diesem Fall auf ca. 84 °C, allerdings liegt hier mit ca. 32 °C auch die höchste Ausgangstemperatur vor. Nach Erreichen des Temperaturmaximums, das nach ca. 18 Stunden erreicht wurde, sank die Temperatur stark und die Temperaturerfassung wurde nach 32 Stunden beendet. Insgesamt ist dieser im Rahmen der Bauüberwachung gemessene Verlauf zu begrüßen, da damit das Verhalten näher an den in Tabelle 10 dokumentierten Werten für die in der SchachanlageASSE verwendete Baustoffrezeptur liegt.

6.2.7 Ergebnis der Rezepturanpassung

Im Ergebnis der beschriebenen Vorversuche und begleitender Versuche im Labor wurde die in Tabelle 12 aufgeführte modifizierte A1-Rezeptur für den Bau des Halbdamms verwendet.

Tabelle 12: Übersicht und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe der modifizierten A1-Rezeptur pro Charge (Mischerfüllung)

Ausgangsstoff	Masse [kg]	Massenanteil [%]
Steinsalzgrus	771	60,6
MgCl ₂ -Lösung	302	23,7
MgO	150	11,8
Anhydritmehl	50	3,9
Gesamt	1273	100

Diese Suspension weicht wie beschrieben von dem vorgegeben Mischverhältnis der A1-Basisrezeptur ab. Der Anteil von 3,9 % Anhydritmehl wurde aus praktischen Gründen gewählt. Das Anhydritmehl wurde in 25 kg Säcken angeliefert, wobei ein Sack dabei ca. 2 % der Gesamtmasse des im Mischer angerührten Baustoffes entspricht. Auch bei den Laborversuchen wurde im Ergebnis der abschließenden Rezepturanpassung die Zugabe von ca. 3,9 % Anhydritmehl als geeignet angesehen.

7 Technischer Anhang - Teil 4

7.1 Simulation der Temperaturentwicklung

Aufgrund der geometrischen Daten des Halbdamms (Tabelle 1) und der frisch in frisch Betonage darf die durch die Erhärtung bedingte Wärmefreisetzung nicht vernachlässigt werden. Da für die Sorelbeton A1-Basisrezeptur ein Parametersatz verfügbar ist, wurde dieser für eine Prognose der Temperaturentwicklung unter Ansatz des geplanten Bauablaufes verwendet [21], [22], [25]. Nach der Betonage wurde das Prognosemodell unter Zugrundelegung des tatsächlichen Bauablaufes an die vorhandenen Temperaturmessdaten angepasst. Das Vorgehen bei den Simulationsberechnungen ist im Folgenden beschrieben.

7.1.1 3D-Modellgeometrie

Die Berechnungen wurden mit dem Programmcode FLAC3D Version 5.0 der Itasca Consultants GmbH durchgeführt. FLAC3D nutzt hierfür die Methode der Finiten Volumen mit einem expliziten Verfahren. Für die Beschreibung thermischer Prozesse wird als Gleichgewichtsbedingung der Energieerhaltungssatz und als Transportgleichung die Wärmeleitungsgleichung nach Fourier angesetzt. Darüber hinaus wird ein vereinfachtes Modell für die Konvektion berücksichtigt. Für die Temperaturfeldberechnung werden lineare Ansätze verwendet.

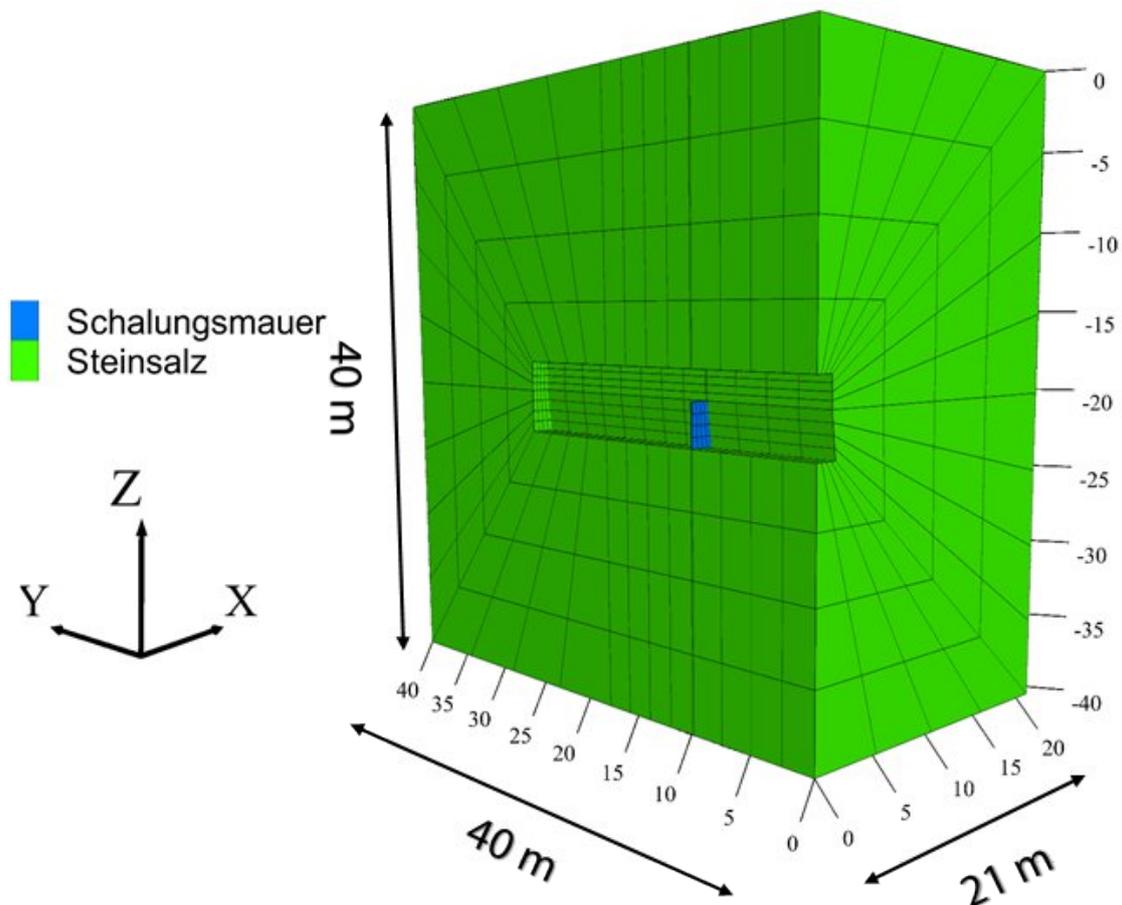


Abbildung 62: Geometrische Abmessungen des numerischen Modells des Standortes (um eine bessere Darstellung zu erhalten, wurde die Geometrie hier grob vernetzt)

Im numerischen Modell wird das gesamte Bauwerk sowie das umgebende Salzgebirge bis in eine Entfernung von ca. 20 m von der Streckenkontur bzw. ca. 14 m von der Ortsbrust erfasst. Die geometrischen Abmessungen des Modells sind in Abbildung 62 dargestellt. Das

numerische Modell besteht aus 498484 Zonen (8-Knoten Hexaeder) und 517094 Knoten. Hierbei wird ein geologisch homogener Gebirgsbereich aus Steinsalz angenommen. Andere geologische Einheiten werden bei der Modellbildung nicht berücksichtigt.

Nach Fertigstellung der Streckenauffahrung wurde die Geometrie der Strecke anhand eines 3D-Scans erfasst und der geplante Halbdamm in dem Streckenmodell positioniert (Abbildung 4). Da es sich hier um eine reine thermische Analyse handelt, wird die Geometrie der Grundstrecke in einigen Bereichen idealisiert. Beispielsweise werden Unebenheiten in der Streckenkontur geglättet oder auch die Ortsbrustform rechteckig abgebildet, wie in der Abbildung 63 zu entnehmen ist. Für die Idealisierung der Geometrie wurde das Verfüllvolumen des Frischbetons herangezogen. Darauf basierend wurden einige Bereiche im Modell lokal so angepasst, dass das Gesamtvolumen mit der in der Strecke verfüllten Betonmenge übereinstimmt. Für die thermische Analyse werden vereinfachend Symmetriebedingungen bezüglich der vertikalen XY-Ebene angenommen. Für die durchgeführten Berechnungen wird daher lediglich die Hälfte des Gesamtmodells betrachtet.

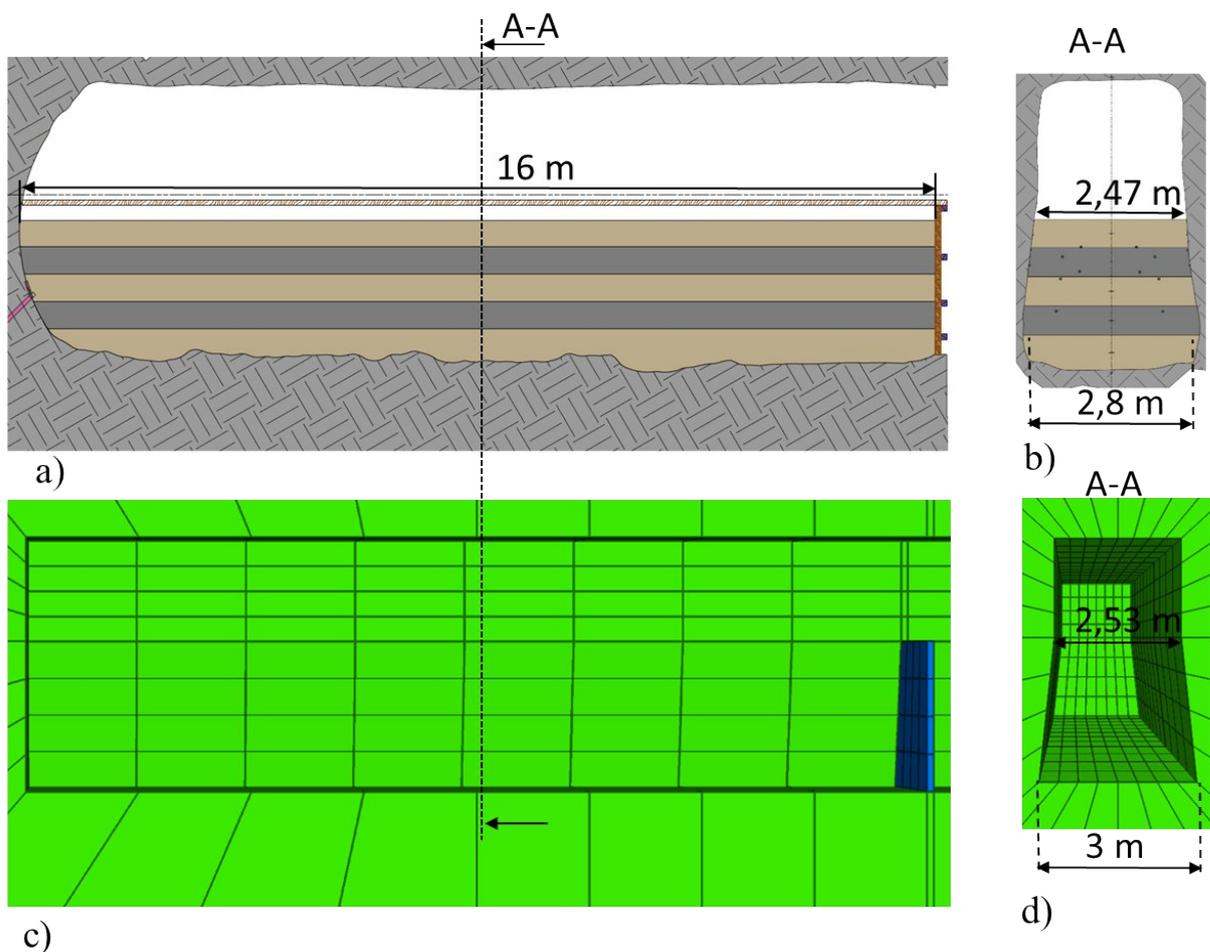


Abbildung 63: Geometrie und Querschnittsform der Stummelstrecke erfasst durch Scannermessung in a), b) und abgebildet im Simulationsmodell in c), d)

Um die Temperaturentwicklung während der Betonage zu ermitteln, wurden 8 Temperatursensoren (PT100) installiert. Damit die Maximaltemperatur des Sorelbeons erfasst wird, wurden die Sensoren in der Mitte der Verfüllstrecke positioniert (siehe Abbildung 64). Die Sensoren T01, T06 und T08 wurden 5 cm tief in die Kontur des Salzgebirges eingebracht, um die Erwärmung des Salzgesteins durch den Effekt der Wärmeleitung zu erfassen. Die Messdaten der Temperatursensoren werden zur Überprüfung der Simulationsberechnungen herangezogen. Deshalb werden an den Positionen der Temperatursensoren Auswertepunkte

im das numerische Modell angeordnet, die die Ausgabe derr rechnerischen Temperaturentwicklung als Funktion der Zeit ermöglichen.

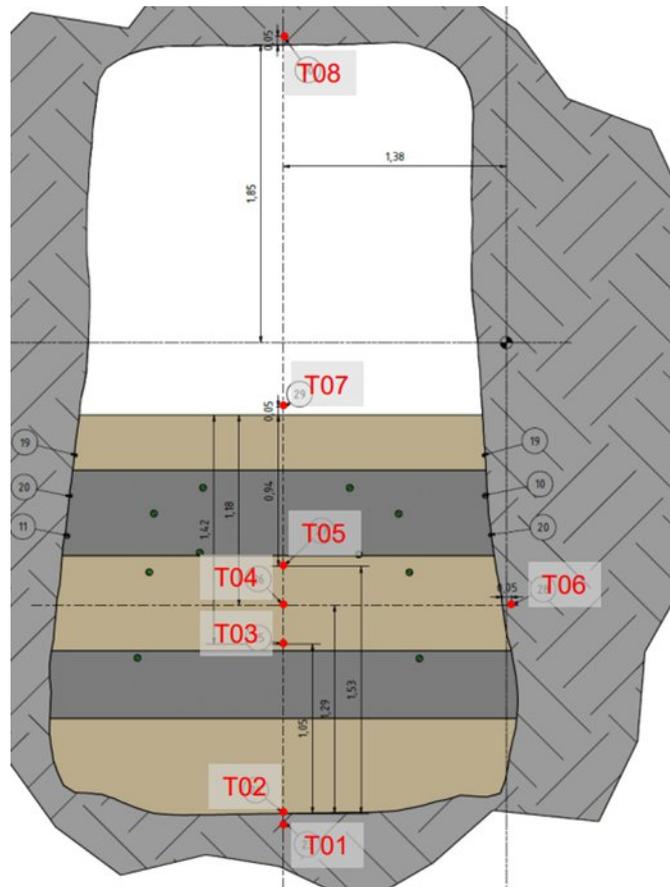


Abbildung 64: Streckenquerschnitt mit Darstellung der Lage der Temperatursensoren

7.1.2 Randbedingungen und Berechnungsannahmen

Basierend auf den kurz vor der Betonage registrierten Temperaturdaten, werden die Gebirgs- und Luftbereiche im Modell mit einer Anfangstemperatur von 27,0 °C initialisiert. Auf den Ansatz eines geothermischen Tiefengradienten wird verzichtet. Auf den Randflächen werden adiabate Randbedingungen angesetzt. Die Lage der Modellränder wird so gewählt, dass aus ihnen keine Beeinflussung des streckennahen Temperaturfeldes erwächst.

Die mittlere Einbringtemperatur des Baustoffes beträgt 31,7 °C. Dies wurde anhand der bei der Verfüllung gemessenen Temperatur der Suspension ermittelt. Eine Durchmischung des Baustoffs infolge des Verfüllvorganges bzw. eine Vorerwärmung der Baustoffsuspension während des Ausbreitungsvorgangs wurden nicht berücksichtigt. Im Rahmen der Berechnung wird der Verfüllvorgang lagenweise bzw. diskontinuierlich simuliert.

Bei dem instantanen Einbringen der Bauabschnitte wird die Temperatur an den gemeinsamen Modellknoten zwischen dem neu eingebrachten Bauabschnitt, dessen Temperatur der Einbringtemperatur der Betonsuspension entspricht, und dem darunter liegenden Bauabschnitt, in dem die Wärmeentwicklung bereits eingesetzt hat, gemittelt.

Die Wärmeübertragung wird in den Berechnungen durch Wärmeleitung abgebildet. Der konvektive Anteil wird durch einen vereinfachten Ansatz berücksichtigt. Hierbei werden die Luftmaterialparameter aus den Literaturangaben [24] mit einem Erhöhungsfaktor multipliziert.

7.1.3 Materialmodell zur Beschreibung der Hydratationswärmeentwicklung

Als Stoffmodell für die Temperaturentwicklung wird das im Folgenden beschriebene und für hydraulisch abbindende Baustoffe entwickelte Materialmodell verwendet [21], [22].

Die über der Zeit t entstehende Reaktionswärme $Q_c(t)$ ist die Ursache für die Erwärmung des Sorelbetons während der Erhärtungsphase. Sie wird primär vom Bindemittelgehalt C und von der Reaktionswärmeentwicklung $Q_{ce}(t)$ beeinflusst:

$$Q_c(t) = C \cdot Q_{ce}(t) . \quad (1)$$

Unter adiabatischen Verhältnissen führt die Reaktionswärmeentwicklung zu der Temperaturerhöhung ΔT

$$\Delta T(t) = \frac{C \cdot Q_{ce}(t)}{C_p \cdot \rho} , \quad (2)$$

mit

ρ : Dichte des Sorelbetons

C_p : massespezifische Wärmekapazität

Die zur vollständigen Erhärtung gehörende Temperaturerhöhung ΔT^{max} lässt sich analog ausdrücken:

$$\Delta T^{max} = \frac{C \cdot Q_{ce}^{max}}{C_p \cdot \rho} . \quad (3)$$

Eine Normierung des realen Materialalters t erfolgt mit der Einführung des wirksamen Betonalters t_e , indem die thermische Entwicklung über die Zeit integriert wird. Mit dem wirksamen Betonalter besteht die Möglichkeit, eine in der Realzeit unterschiedlich ablaufende Erhärtung einheitlich zu beschreiben. Dafür wird eine Referenztemperatur angenommen, die den Erhärtungsprozess eines Betons bei einer Temperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ beschreibt. Für eine andere beliebige Temperatur wird die benötigte Erhärtungszeit, bei der ein Beton den gleichen Erhärtungszustand wie bei $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht, durch das wirksame Betonalter t_e angegeben:

$$t_e = \int_0^t e^{\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T} \right)} dt , \quad (4)$$

mit

E_A : Aktivierungsenergie des Bindemittelsystems

R : Universelle Gaskonstante $R = 8,31443 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

T : absolute Temperatur

T_{Ref} : Bezugstemperatur $T_{Ref} = 293,15 \text{ K}$

Die Aktivierungsenergie ist ein wesentlicher Parameter des Materialmodells, der die Temperaturabhängigkeit des Erhärtungsfortschritts und damit die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung beschreibt. Die Aktivierungsenergie wird unter Verwendung der Arrhenius-Gleichung bestimmt, wobei insbesondere in der logarithmischen Formulierung die Aktivierungsenergie als Steigung der Reaktionsgeschwindigkeit über der reziproken Temperatur deutlich wird

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}} \longrightarrow \ln(k) = \ln(A) - E_A \cdot \frac{1}{R \cdot T} , \quad (5)$$

mit

k : Reaktionsgeschwindigkeitskonstante

A : Frequenzfaktor oder „Stoßzahl“

Eine wesentliche innere Zustandsvariable des Materialmodells ist der Hydratationsgrad α . Er beschreibt das Verhältnis der Masse der bereits reagierten Bindemittelanteile zur Gesamtmasse der reaktionsfähigen Ausgangssubstanzen, so dass er im Bereich $\alpha = [0;1]$ gültig ist

$$\alpha(t_e) = \frac{C \cdot Q_{ce}(t_e)}{C \cdot Q_{ce}^{max}} = \frac{\Delta T(t_e)}{\Delta T^{max}} \quad (6)$$

Der Hydratationsgrad wird in Abhängigkeit der beiden materialspezifischen Parameter b und t_1 wie folgt beschrieben:

$$\alpha(t_e) = e^{-\left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right)^b} \quad (7)$$

7.1.4 Verwendete thermische Materialparameter

Für alle Materialien wird von thermisch isotropem Verhalten ausgegangen. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 13 zusammengefasst [3], [23], [24].

Tabelle 13: Verwendete Materialparameter. ϑ Temperatur in °C / T Temperatur in K.

	Sorelbeton A1 (Basisrezeptur)	Steinsalz	Luft
Dichte ρ [kg/m ³]	1.900	2158.0	1,12
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	$\lambda(\vartheta) = 1,876 + 0,002 \vartheta$	$\lambda = 6,1$	0,025
Spez. Wärmekapazität c_p [J/(kgK)]	$c_p(\alpha, \vartheta) = 1211 - 317,6 \alpha + 0,89 \vartheta$	$c_p = 872$	1007

7.1.5 Berechnungsablauf

In der thermischen Berechnung wird der Verfüllprozess simuliert und die Berechnung für einen Zeitraum von 40 Tagen nach Abschluss der Verfüllung fortgesetzt. Hierbei wird das lagenweise Erstellen des Dammes durch ein konstantes Einbringen von 25 Betonierabschnitten abgebildet. Die Einbringzeit und das Verfüllvolumen dieser Abschnitte wurde an den realen Verlauf der Betonage angepasst, wie in Abbildung 65 dargestellt ist.

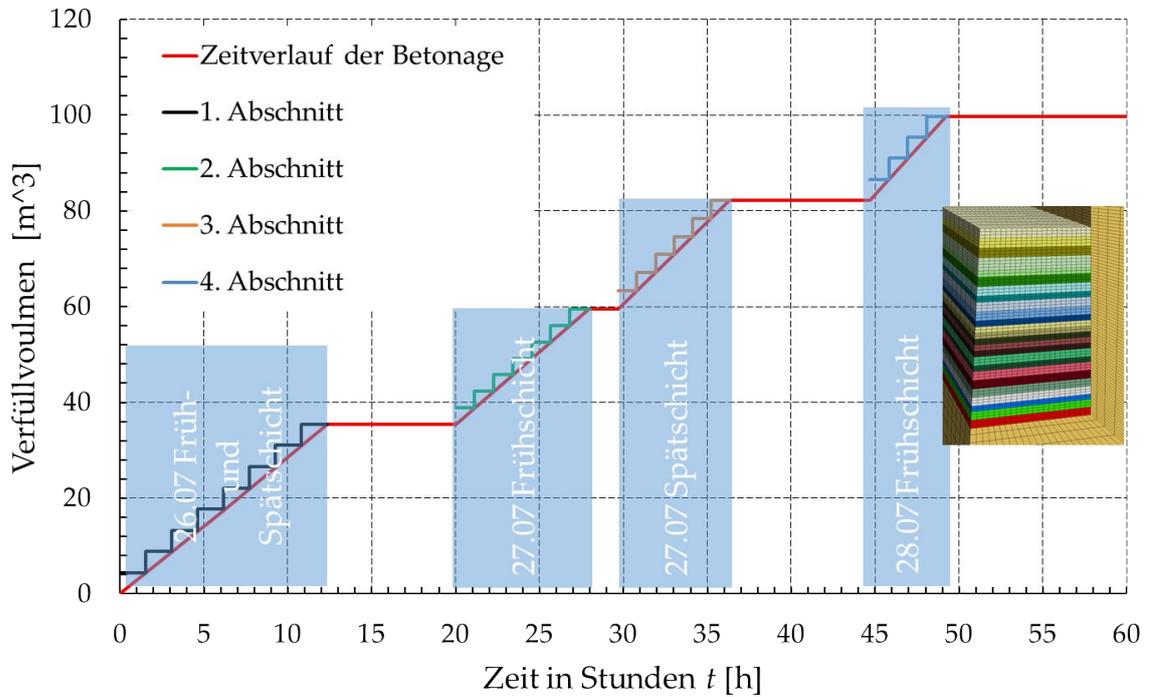


Abbildung 65: Diskretisierung der Betonierabschnitte in den Simulationen basierend auf dem zeitlichen Verlauf des Verfüllprozesses während der Betonage

7.2 Zusammenstellung der Ergebnisse

7.2.1 Zusammenstellung der Ergebnisse des Prognosemodells

In diesem Abschnitt werden zuerst die Ergebnisse des Prognosemodells, die vor der Betonage ermittelt worden sind, vorgestellt. Die Simulationen wurden mit den Materialparametern des Sorelbetons A1-Basisrezeptur durchgeführt. Diese Parameter wurden auf der Basis von experimentellen Untersuchungen ermittelt [3], [25].

In Abbildung 66 sind die gemessenen Temperaturverläufe der Sensoren T03, T04 und T05 im Vergleich zur Prognose dargestellt. Daraus ist deutlich zu erkennen, dass die Verläufe der Prognose den gemessenen Temperaturen nacheilen. Dies deutet darauf hin, dass der verwendete Beton im Rahmen dieses Projekts eine schnellere Erhärtungsgeschwindigkeit hat. Demzufolge setzt die Erhärtungsphase dieses Betons im Vergleich zur bekannten Sorelbeton A1-Basisrezeptur früher ein. Deshalb wurde eine Anpassung der Materialparameter an das gemessene thermische Verhalten vorgenommen.

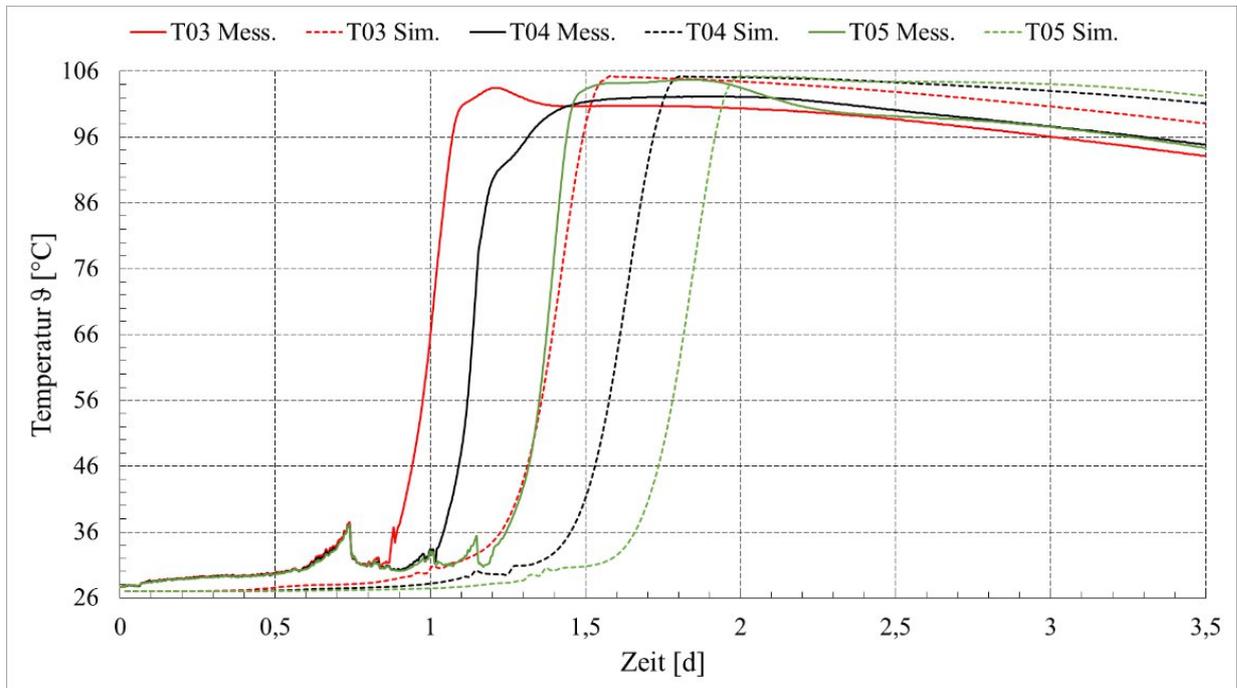


Abbildung 66: Gegenüberstellung der Messungen und der Prognoseberechnungen an den Temperatursensoren T03, T04 und T05 simuliert mit dem Parametersatz des Sorelbeton A1

7.2.2 Anpassung des Prognosemodells an die Messdaten

In Abbildung 67 sind die zeitlichen Verläufe der gemessenen Daten im Kern des Bauwerks dargestellt. In diesem Bereich herrscht für einige Zeit einen adiabatischen Zustand, der mit dem in Kapitel 7.1.4 beschriebenen Hydratationsmodell approximiert werden kann. Aus Abbildung 67 (a) kann man erkennen, dass die Abbindezeit des verwendeten Betons kürzer als beim Sorelbeton A1 ist. Die Anpassung erfolgt durch Modifikation der in Kapitel 7.1.3 aufgeführten Parameter zu $t_1 = 0,4535$ d und $b = -1,5$.

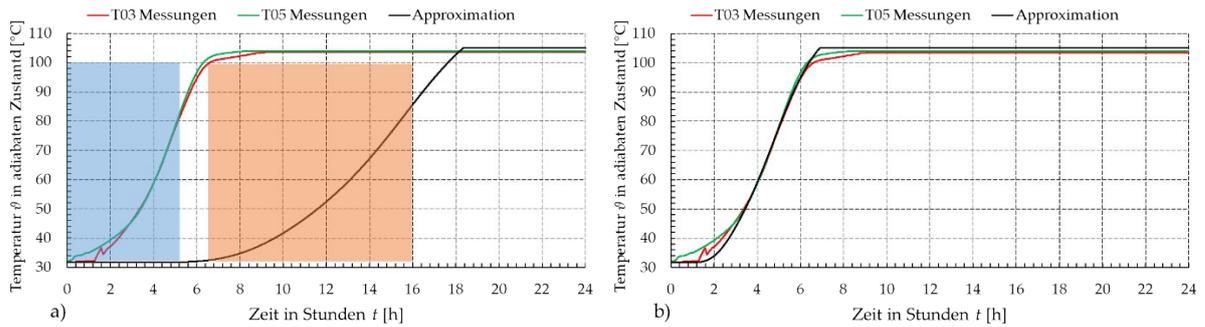


Abbildung 67: Gemessener und berechneter Verlauf der adiabatischen Temperaturentwicklung in Abhängigkeit der Zeit

Auf Basis der angepassten Parameter erfolgte eine erneute Simulationsberechnung. Abbildung 68 zeigt die Gegenüberstellung der Mess- und der Berechnungsergebnisse an den für die Kalibrierung herangezogenen Temperatursensoren. Die Messwerte und Berechnungsergebnisse weisen eine hohe Übereinstimmung aus. Daher wurde die Anpassung für die weiterführende Simulation genutzt.

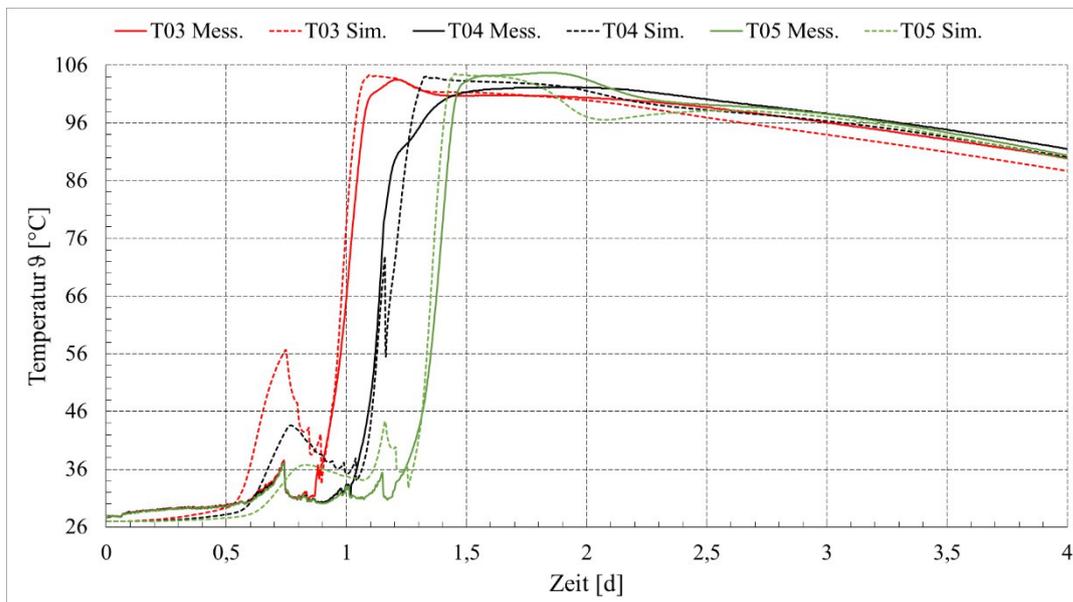


Abbildung 68: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe an den Sensoren T03, T04 und T05, am Kern des Baustoffes

7.2.3 Simulationsergebnisse nach Anpassung

Die nach der Anpassung erzielten Simulationsergebnisse wurden mit den an allen vorhandenen Temperatursensoren gemessenen Temperaturverläufen verglichen, siehe Abbildung 69 bis Abbildung 72. Die gemessenen und die errechneten Maximaltemperaturen sind in Tabelle 14 angegeben.

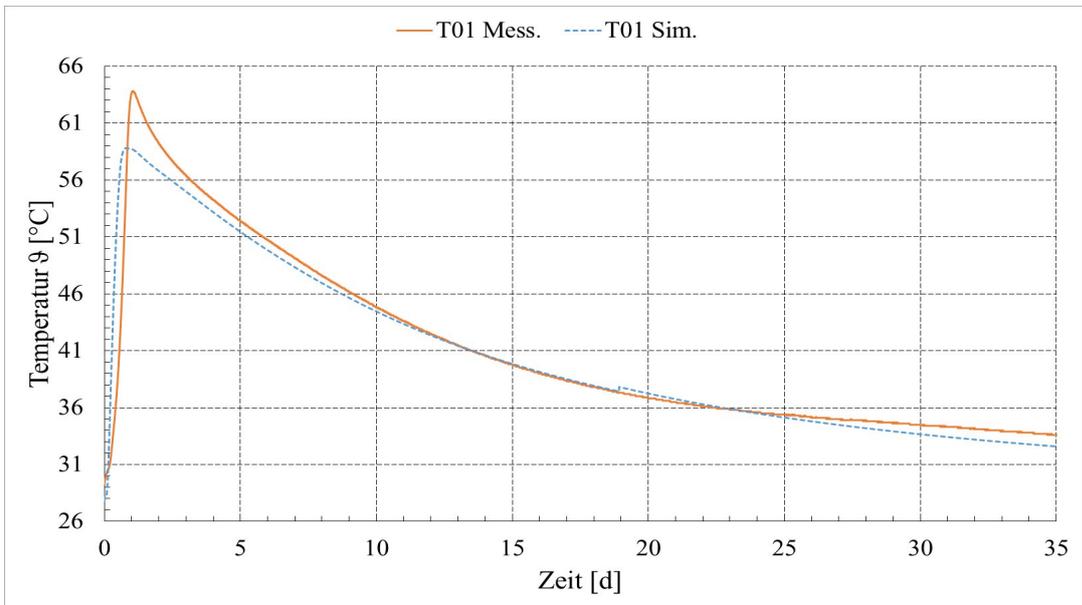


Abbildung 69: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am T03, Sohle

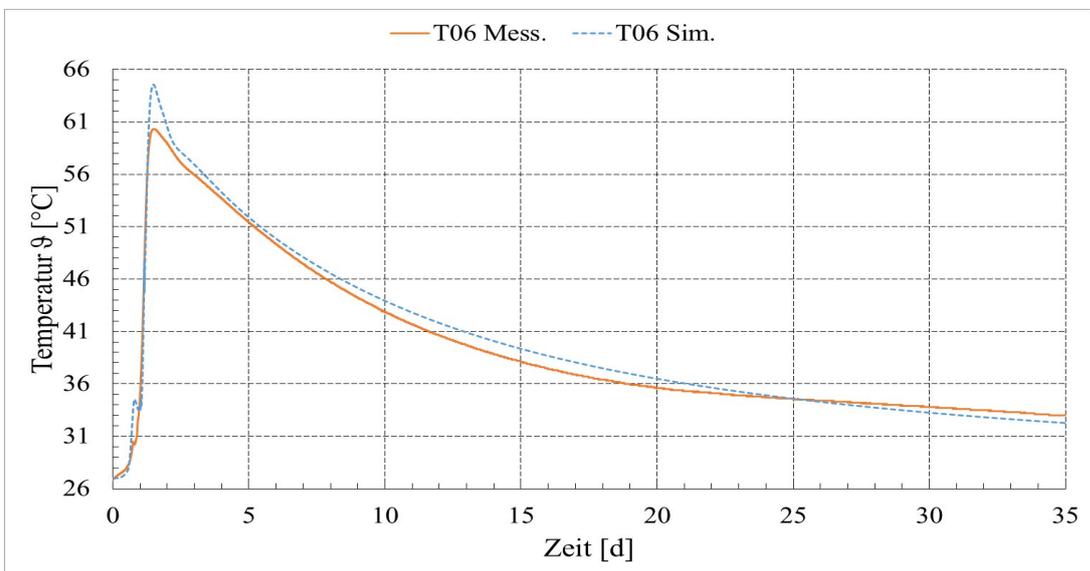


Abbildung 70: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am T06, Stoß

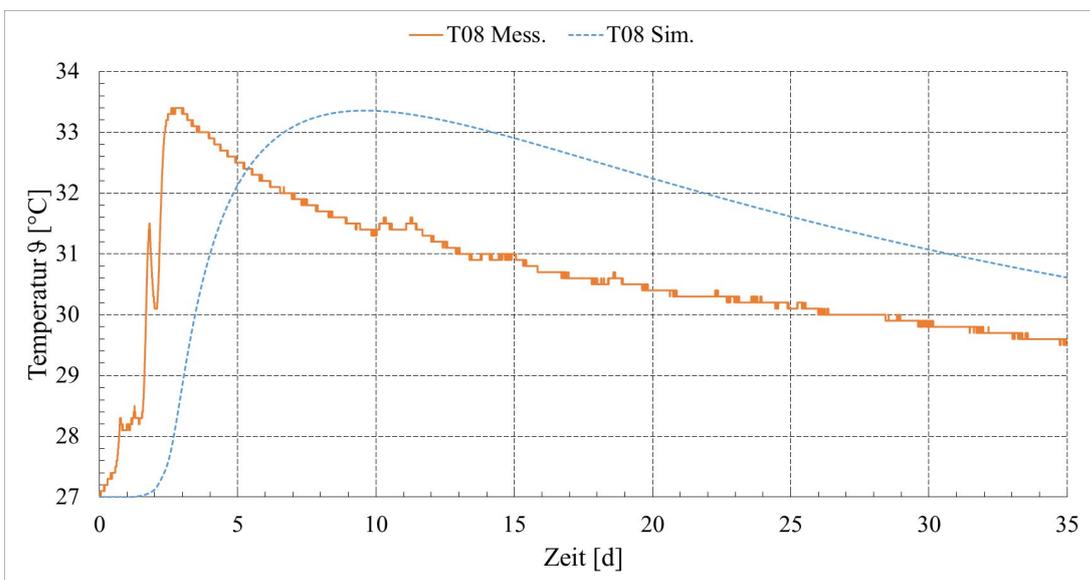


Abbildung 71: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am T08, Firste

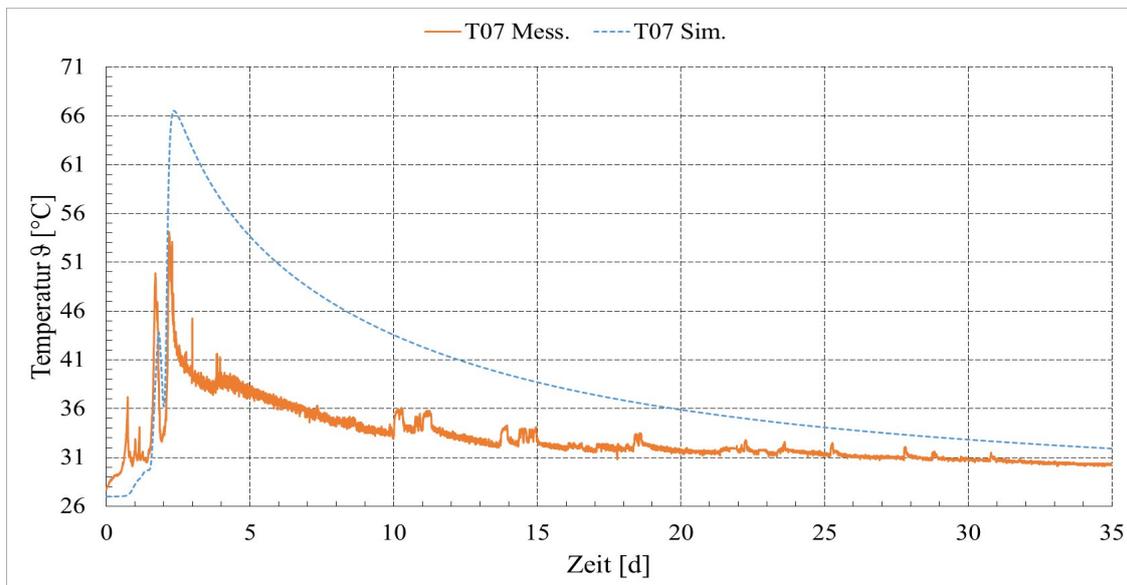


Abbildung 72: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am Sensor T07

Tabelle 14: Vergleich der gemessenen und simulierten Maximaltemperaturen

Temperatur [° C]	T01	T03	T04	T05	T06	T07	T08
Messung	63,8	103,5	102,2	104,7	60,3	54,1	33,4
Simulation	58,8	104,3	104,1	104,6	64,6	66,5	33,36
Differenz	5	-0,8	-1,9	0,1	-4,3	-12,4	0,04

Die in der Sohle (T01) gemessene Maximaltemperatur von 63,8 °C wird in der Modellrechnung um 5 K unterschritten. Im Gegensatz dazu wird die gemessene Maximaltemperatur am Stoß (Sensor T06), die bei 60,3 °C liegt, um 4,3 K überschritten. An der Firste wird der am Sensor T08 gemessene Temperaturverlauf und die Maximaltemperatur von 33,4 °C gut getroffen (Unterschätzung um 0,04 K), wobei zu berücksichtigen ist, dass die Temperaturerhöhung hier insgesamt unter 10 K bleibt.

In der Firste ist deutlich zu erkennen, dass der Temperaturverlauf sowohl während der Erwärmung als auch in der Abkühlphase rechnerisch langsamer verläuft, siehe Abbildung 72. Der Grund für dieses Verhalten liegt darin, dass der Energiefluss der Konvektion vereinfacht durch das Wärmeleitungsprinzip (Konduktion) abgebildet wird.

7.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Für die Simulation der Temperaturentwicklung und -ausbreitung bei der Errichtung des Halbdammes wurde auf Basis der geometrischen Scandaten ein 3D-Prognosemodell erstellt. Für das Prognosemodell wurde das für die A1-Basisrezeptur entwickelte Hydratationsmodell genutzt. Der Vergleich gemessener Temperaturverläufe und der Berechnungsergebnisse zeigte eine schnellere Erhärtung des Baustoffs. Deshalb mussten zuerst die Materialparameter der Sorelbeton A1-Basisrezeptur an die bei der Betonage verwendete modifizierte A1-Rezeptur angepasst werden. Nach der Anpassung stimmten die gemessenen Temperaturverläufe gut mit den berechneten Verläufen überein.

Der Wärmetransport wurde in dem Simulationsmodell durch Wärmeleitung modelliert. Der konvektive Anteil wird durch einen vereinfachten Ansatz abgebildet. Die Grenze des vereinfachten Ansatzes für Konvektion zeigt sich deutlich am Verlauf der Temperatur am Sensor T07. Hier erfährt der Sensor einen ständig veränderten Verlauf der Lufttemperatur, der sich nicht vollständig durch Wärmeleitung beschreiben lässt. Ggf. sollte dieser Sachverhalt weiterverfolgt werden.

Auffällige Unterschiede zwischen der Messung und der Berechnung liegen in der Phase vor dem Umschließen der Temperatursensoren mit dem Baustoff an allen Messorten, mit Ausnahme von T06, vor. Diese Abweichung kann auf die Wetterschwankungen während der Betonage zurückgeführt werden. Hier bietet sich die Möglichkeit, in einer zukünftigen Variationsberechnung zu untersuchen, wie sich die Verwendung eines Wettertuches während der Betonage auswirkt.

8 Technischer Anhang – Teil 5

8.1 Laboruntersuchungen an Kompositproben

Zur mechanischen und hydraulischen Charakterisierung von Steinsalz und Baustoff mit Kontaktzone wurden Kompositproben genutzt. Sie wurden sowohl im Labor hergestellt als auch in situ erbohrt. Die an ihnen gewonnenen Ergebnisse sind im Folgenden beschrieben.

Auf die an Kompositproben gewonnenen Ergebnisse zur Scherfestigkeit wird in diesem Technischen Anhang nicht eingegangen. Sie finden sich in der Dissertation von Julius Bauermeister „Untersuchung der Scherfestigkeit an Kompositproben aus Sorelbeton und Steinsalz“. Daher beschränkt sich die folgende Darstellung auf die hydraulische Charakterisierung.

8.1.1 Herstellung von Laborkompositproben

Für die Herstellung von Laborkompositproben wurden die als Halbzylinder ausgebildeten Bohrkernhälften aus Spaltzugversuchen sowie die A1-Basisrezeptur genutzt (Anlage 5).

Nach dem Spalten der Bohrkernproben wurden diese Hälften in HT-Rohrabschnitte mit einem Durchmesser von 99 mm an die Innenseite des HT-Rohres gedrückt und die freie Volumenhälfte mit Suspension der A1-Basisrezeptur (MgO Normag Calvörde) aufgefüllt. Die Länge des HT-Rohrabschnittes variierte je nach Länge der Bohrkernhälfte (siehe Anlage 5). Die beiden Öffnungen des HT-Rohrabschnittes wurden mithilfe passender Deckel verschlossen. Bei dem Befüllen des Rohrabschnittes wurde darauf geachtet, dass die eingefüllte Suspension mindestens der Höhe der Salzprobe entsprach. Anschließend wurden die HT-Rohre in einen Klimaschrank gestellt und bei einer Temperatur von 27 °C und einer relativen Luftfeuchte von 60 % über 28 Tage gelagert. Anschließend wurden die Proben aus der Ummantelung herausgelöst.

8.1.2 Gewinnung von in situ-Kompositproben aus der 300 mm Bohrung

Im Rahmen der Vorversuche wurde die Bohrung B01-30 mit 300 mm Durchmesser unter Tage erstellt (Abbildung 5, Objekt 2) und mit dem MgO-Baustoff der A1-Basisrezeptur verfüllt. Die Bohrung diente mehreren Zwecken, vgl. Kapitel 4.2 und Kapitel 6.2. Aus den mit der A1-Basisrezeptur verfüllten 300 mm Bohrungen wurden durch Überbohren in situ-Kompositproben gewonnen.

8.1.3 Gewinnung von in situ-Kompositproben aus dem Halbdamm

Für einen Kerngewinn aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge wurden im Bereich der unterschiedlichen bearbeiteten Oberflächen drei Horizontalbohrungen mit einem Durchmesser von 300 mm in den Sohlbereich gestoßen - siehe Abbildung 73. Wie im Hauptband ausgeführt wurde in diesem Bereich bereits vor der Betonage eine Oberfläche mit unterschiedlichem Grad der Rauheit hergestellt. Mit Blick auf die Ortsbrust war der linke, südöstliche Bereich der Sohle grob bearbeitet ($R_a=1,4$ mm), der mittlere Bereich der Sohle wurde mäßig bearbeitet ($R_a=1,1$ mm) und der rechte, nordwestliche Bereich wurde glattgeschliffen ($R_a=0,1$ mm).

Aus den gewonnenen Kernproben wurden Prüfkörper für die Laboruntersuchungen präpariert. Bedingt durch die für die Betonage des Halbdamms verwendeten modifizierten A1-Rezeptur, bestanden diese Kompositproben aus Steinsalz und modifizierter A1-Rezeptur.



Abbildung 73: Lage der Bohrungen im Sohlbereich (Durchmesser 300 mm)

8.2 Hydraulische Kennwerte der Kompositproben

In Ergänzung zu den in situ Permeabilitätsmessungen mit dem neu entwickelten Messsystem (siehe Hauptband) wurden begleitende Laboruntersuchungen zur strömungstechnischen Charakterisierung an den Kompositproben vorgenommen. Im Rahmen des Laborprogramms wurden Gaspermeabilitätswerte an 4 Probekörpern des Laborkomposits, an 4 Probekörpern des in situ Komposits der 300 mm Bohrung und an 8 Probekörpern des in situ-Komposits aus dem Halbdamm ermittelt.

Weiterhin wurde der Kontaktbereich A1-Basisrezeptur /Salinar und modifizierte A1-Rezeptur durch das HZDR mit dem CT visualisiert. Ergebnisse sind im Zusammenhang mit den Permeabilitätsmessungen exemplarisch dargestellt. Die Beschreibung weiterer am HZDR durchgeführter Untersuchungen und ihrer Ergebnisse ist in Anlage 7 gegeben. Um diese Ergebnisse der Gaspermeabilitätsmessungen an den Kompositproben einordnen zu können, erfolgte auch die strömungstechnische Charaktersisierung von Laborproben des konturnahen Steinsalzes sowie der verwendeten MgO-Baustoffe – A1-Basisrezeptur und modifizierte A1-Rezeptur.

Die erzielten Messergebnisse sind in diesem Teil 5 des Technischen Anhangs zusammengestellt und werden abschließend bewertet.

8.2.1 Permeabilität Laborkomposit

8.2.1.1 Effektive Gaspermeabilität - Laborkomposit

Als Ergebnisse der Untersuchungen der im Labor hergestellten Kompositproben aus MgO-Baustoff der A1-Basisrezeptur und Steinsalz wurden effektive Permeabilitäten für Gas von $9,3\text{E-}15\text{ m}^2$, $1,2\text{E-}14\text{ m}^2$, $2,6\text{E-}14\text{ m}^2$ und $2,0\text{E-}12\text{ m}^2$ (N=4) ermittelt, siehe Abbildung 74. Die Gaspermeabilität der injizierten Probe P300-21/1 nach Injektion von $8,9\text{E-}18\text{ m}^2$ wurde bereits in Kapitel 5.2 genannt.

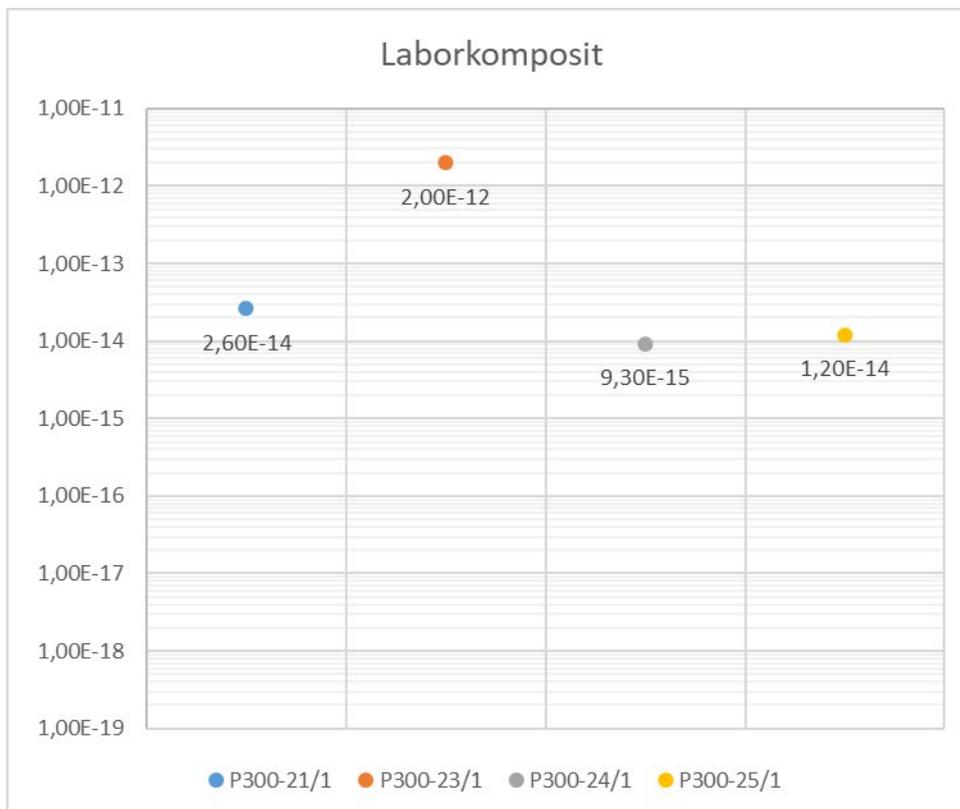


Abbildung 74: An Laborkompositproben ermittelte effektive Gaspermeabilität [m²]

8.2.1.2 Lösungsp permeabilität - Laborkomposit

Im Anschluss an die Ermittlung der Gaspermeabilität für die Kompositprobe P300-24/1 wurde an dem Probekörper ein Versuch zur Ermittlung der Lösungsp permeabilität für MgCl₂-haltige, NaCl-gesättigte Salzlösung durchgeführt. Die Aufsättigung der Probe mit der Versuchslösung erfolgte während der Anfangsphase des Versuches. Während des Versuchsverlaufs gelang es trotz 17 Wiederholungsversuchen nicht, in aufeinanderfolgenden Tests reproduzierbare Druckganglinien nachzuweisen. Daher wurde der Versuch beendet. Eine Auswahl von Druckganglinien der durchgeführten Tests ist in Abbildung 75 dokumentiert.

Es wird vermutet, dass es im Probekörper ein räumlich begrenztes, mit Gas gefülltes Volumen gab. Dieses wurde möglicherweise im Verlauf der Aufsättigung nicht gefüllt. Durch die Druckbeaufschlagung mit einem Flüssigkeitsdruck wird das Gasvolumen komprimiert und wirkt strömungstechnisch - aufgrund der Kompressibilität des Gases - als Druckspeicher. Im Ergebnis der Entspannung des Gases kommt es zu einer Beeinflussung der im Testverlauf erfassten Druckganglinien. Eine Berücksichtigung dieses Prozesses und der damit verbundenen Zweiphasenströmung ist in der Testauswertung nicht möglich. Daher konnte für den Probekörper keine Lösungsp permeabilität ermittelt werden.

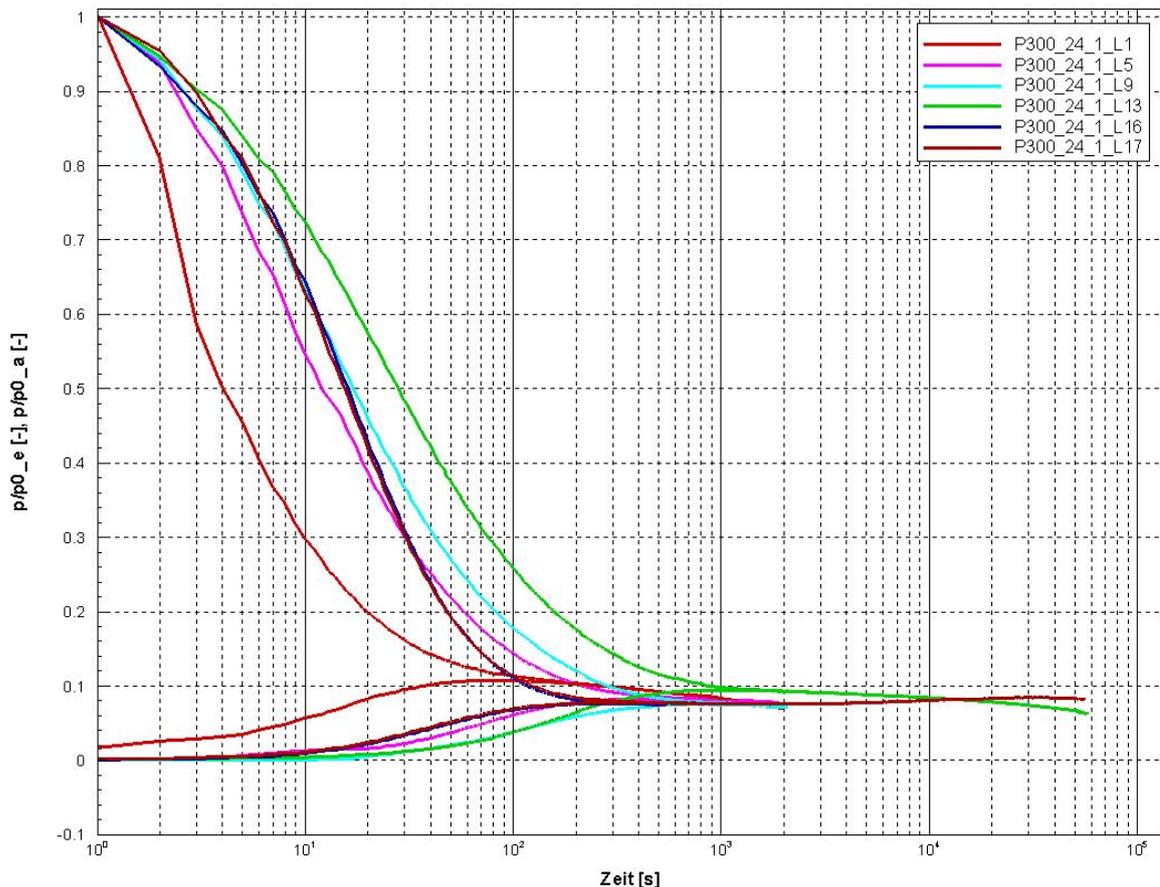


Abbildung 75: Probe P300-24/1 – Zeitverlauf ausgewählter Druckabfälle

8.2.2 Effektive Gaspermeabilität - in situ-Komposit aus der 300 mm Bohrung

Zur Beurteilung der Anbindung des Baustoffes an die Steinsalzkontur wurden in den südöstlichen Stoß der Versuchsstrecke die Bohrung B01-030 (Abbildung 5, Objekt 2) mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Tiefe von ca. 3 m gestoßen. Diese Bohrungen wurden mit MgO-Baustoff der A1-Basisrezeptur (siehe Technischer Anhang – Teil 3 Kapitel 6.1) verfüllt. Aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge wurden aus der Bohrung Kernproben

gewonnen. An den gewonnenen Probekörpern wurden ebenfalls Permeabilitätsmessungen zur Charakterisierung der Kontaktzone Baustoff/ Steinsalz durchgeführt.

Es wurden effektive Gaspermeabilitäten von $2,3\text{E-}17 \text{ m}^2$, $1,26\text{E-}16 \text{ m}^2$, $7,7\text{E-}16 \text{ m}^2$ und $1,2\text{E-}15 \text{ m}^2$ (N=4) bestimmt, siehe Abbildung 76.

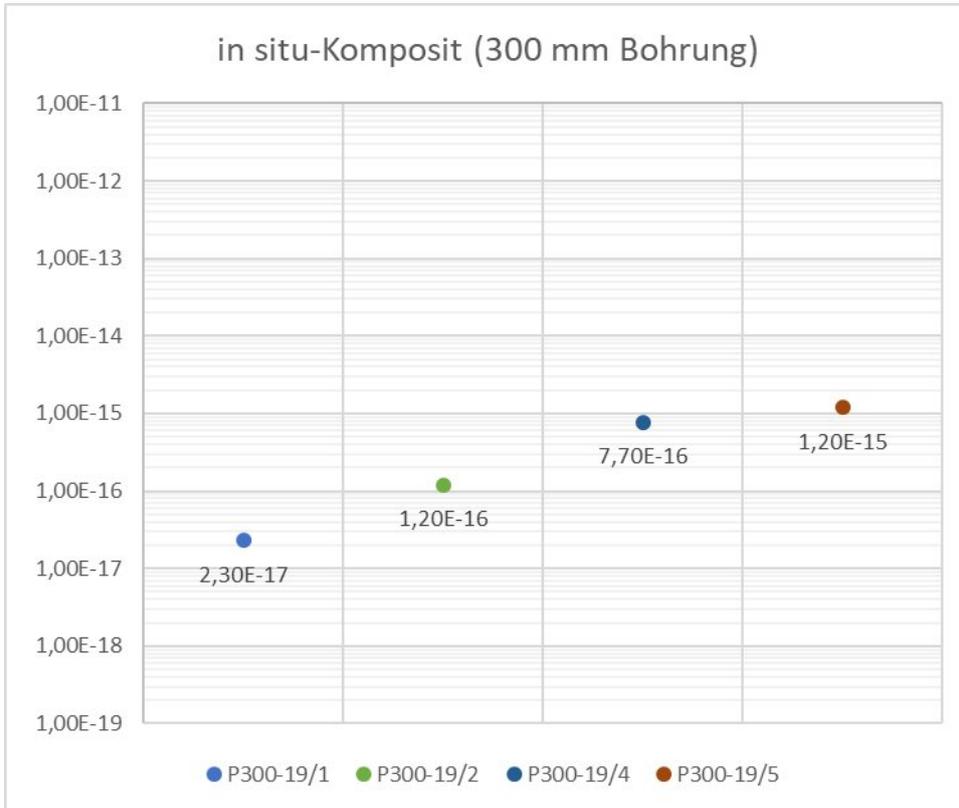


Abbildung 76: An in situ-Kompositproben der 300 mm Bohrung ermittelte effektive Gaspermeabilität [m²]

8.2.3 Effektive Gaspermeabilität - in situ-Komposit aus dem Bauwerk

Darüber hinaus wurden Proben aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge durch drei Bohrungen parallel zur Längsachse in die Sohle des Halbdammes, der mit der modifizierten A1-Rezeptur betoniert wurde, gewonnen, siehe Abbildung 73.

In diesem Bereich wurden bereits vor der Betonage die Oberflächen mit unterschiedlichem Grad der Rauheit hergestellt (siehe Hauptband). Mit Blick auf die Ortsbrust war der linke, südöstliche Bereich der Sohle grob bearbeitet ($R_a=1,4 \text{ mm}$), der mittlere Bereich der Sohle wurde mäßig bearbeitet ($R_a=1,1 \text{ mm}$) und der rechte, nordwestliche Bereich wurde glatt geschliffen ($R_a=0,1 \text{ mm}$). Die Bohrungen in die Kontaktzone haben einen Durchmesser von 300 mm. Die Kernproben für die strömungstechnische Charakterisierung wurden für die Permeabilitätsuntersuchungen im Labor auf einen Durchmesser von 90 mm durch die TUC abgedreht.

Insgesamt wurden 8 Prüfkörper aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge mit unterschiedlicher Rauheit der Kontur im Labor mit Gas durchströmt. Die ermittelte Permeabilität lag für diese Prüfkörper im Bereich von $5,0\text{E-}15 \text{ m}^2$ bis $6,5\text{E-}12 \text{ m}^2$ (N=8). Die Ergebnisse sind in Abbildung 77 zusammengefasst.

Einzelne Kerne aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge mit unterschiedlicher Rauheit sind beispielhaft in den folgenden Abbildungen - Abbildung 78 bis Abbildung 80 - dargestellt.

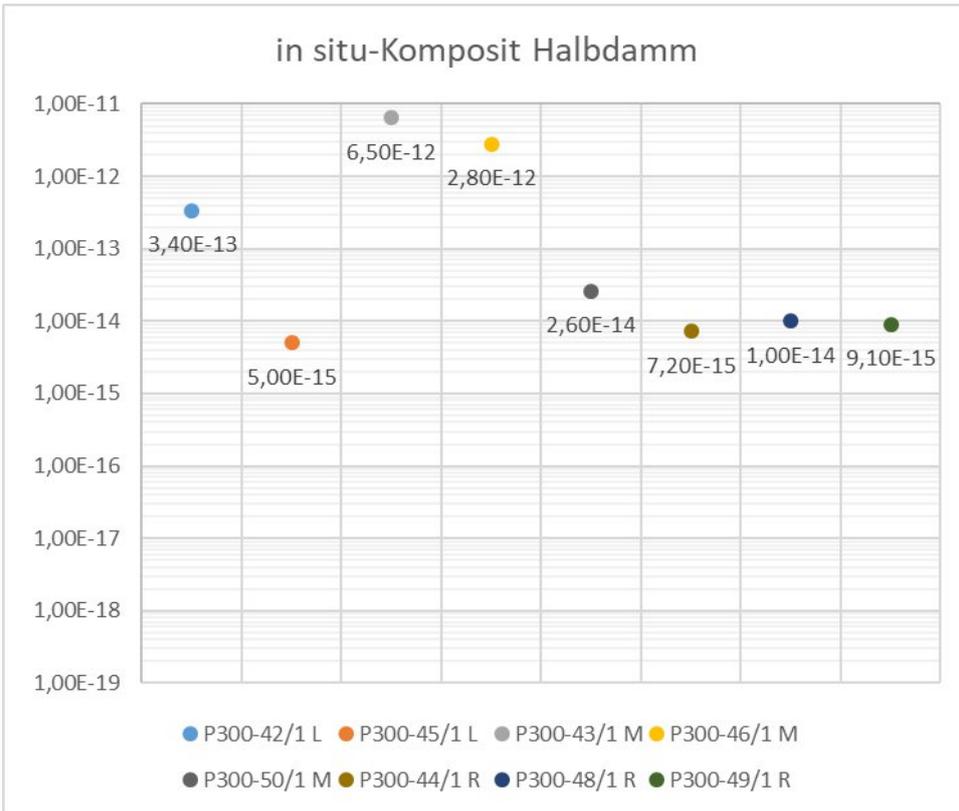


Abbildung 77: An in situ-Kompositproben aus der Sohle des Halbdammes ermittelte effektive Gaspermeabilität [m²], links (L), Mitte (M) und rechts (R)

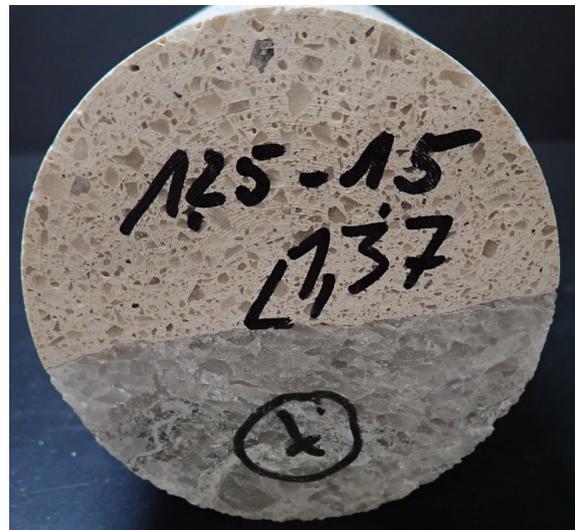


Abbildung 78: P300-47 Bereich linke Sohle -
rauh



Abbildung 79: P300-46 Bereich Mitte Sohle –
mäßig bearbeitet

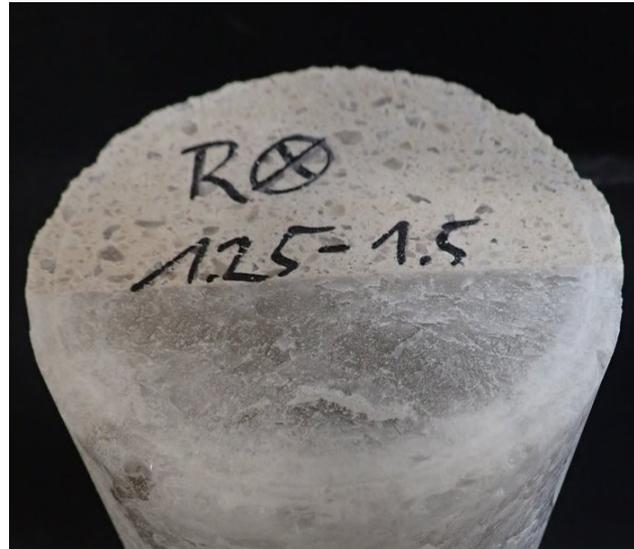


Abbildung 80: P300-48 Bereich rechte Sohle -
geschliffen

8.3 CT-Charakterisierung des Kontakts

Sowohl an laborativ mit der A1-Basisrezeptur hergestellten Kompositproben als auch an einzelnen Bohrkernen aus der Kontaktzone des Bauwerks wurden nach der Projektlaufzeit CT-Aufnahmen gewonnen, siehe Anlage 7.3.

Die CT-Aufnahmen der Prüfkörper und die augenscheinlichen Beobachtungen an den Kernproben aus dem Sohlbereich des Bauwerkes weisen, neben einer lokalen, sehr festen und wahrscheinlich geringpermeablen Anbindung des MgO-Baustoffs an die Steinsalzkontur, sichtbare Wegsamkeiten mit Spaltweiten bis zu etwa 1 mm nach – siehe Abbildung 81.

Für die Ursache dieser lokalen Wegsamkeiten sind verschiedene Interpretationen möglich. So kann möglicherweise die Benetzung der Steinsalzoberfläche und der konturnahen Porenstruktur im Steinsalz durch die Baustoffsuspension bzw. die Salzlösung aus der Baustoffsuspension dazu führen. Für die Porosität im konturnahen Steinsalzgebirge von $0,022 \pm 0,018$ (0,002-0,064; N= 11, Tabelle 18) ist von einer Größenordnung der Porenraumsättigung von $0,027 \pm 0,026$ (0,006-0,084; N=11, Tabelle 19) auszugehen. In dem ungesättigten Porenraum gelten die Gesetzmäßigkeiten der Zweiphasenströmung. Aufgrund der Grenzflächenspannungen und dem sich ergebenden Kapillardruck ist von einer Benetzung der Porenwandung und einer Aufsättigung des Porenraumes mit Salzlösung aus der Suspension auszugehen. Das initial enthaltene Gas wird durch diesen Prozess verdrängt. Möglicherweise sammelt sich dieses Gasvolumen im Sohlbereich an der Grenzfläche zwischen Baustoffsuspension und Streckensohle und kann nicht oder nur begrenzt entweichen. Dieses Gasvolumen könnte eine Ursache für die nachgewiesenen Wegsamkeiten an der Bauwerkssohle darstellen.

Neben diesem Erklärungsansatz wird auch die Ansammlung von Anmachlösung im Kontakt Baustoff/Gebirge diskutiert.

Aufgrund der großen anfänglichen Bedeutung derartiger Wegsamkeiten für die strömungstechnische Wirkung der Kontaktzone sollten weitere Untersuchungen zur Klärung der Ursachen und der zugrundeliegenden Prozesse sowie zur Beurteilung des Auftretens entsprechender Wegsamkeiten an den Streckenkonturen durchgeführt werden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse sollten die Ursachen dieser Wegsamkeiten geklärt sowie Handlungsoptionen zur ihrer Vermeidung entwickelt und getestet werden. Aus Sicht der Bearbeiter sollte in diesem Zusammenhang die vorlaufende Benetzung der Bauwerkssohle mit $MgCl_2$ -Lösung untersucht werden.



Abbildung 81: Beispiel für die Anbindung im Kontakt MgO-Baustoff/Steinsalzgebirge, links: augenscheinlich gute Anbindung, Mitte: sichtbare Wegsamkeiten und unzureichende Anbindung, , rechts: Darstellung des Porenraumes im Kontakt im Ergebnis einer CT-Aufnahme (HZDR, Herr Dr. J. Kulenkampff, 25.08.2022)

8.4 Hydraulische Kennwerte von Steinsalz und Sorelbetonen

Da der Komposit aus den Materialien Steinsalz und Baustoff besteht und die Kontaktzone beinhaltet, werden im Folgenden auch Untersuchungsergebnisse am Steinsalz, dem Baustoff A1-Basisrezeptur und der modifizierten A1-Rezeptur beschrieben, um die Gaspermeabilitätsergebnisse der Kompositproben später besser einordnen zu können. Auch diese Materialien wurden im Labor strömungstechnisch charakterisiert. Dies bedeutet die Ermittlung von effektiver Gaspermeabilität, Porosität und Lösungssättigung. Die laborative Ermittlung der Gaspermeabilität ist in Anlage 6.1 beschrieben. Die Ermittlung von Porosität und Sättigung erfolgt im Standardprogramm in den Schritten Feuchtdichte, Trocknung der Probe (Bestimmung des Lösungsgehaltes), Trockendichte, Reindichte, Errechnung der Porosität und der Lösungssättigung, siehe Anlage 6.2. Bei der Ermittlung von Porosität und Porenraumsättigung gingen neuere Erkenntnisse zur Trocknungstemperatur von Sorelbaustoffen ein [26].

Da das Steinsalz im Zusammenhang mit der Herstellung der Laborkompositproben stand, wurde das Kernmaterial aus der Auflockerungszone genutzt, da die Zielsetzung in der Bestimmung der strömungstechnischen Eigenschaften des an die Kontaktzone angrenzenden Salzes lag. Diese Standarduntersuchungen werden üblicherweise auch im Rahmen der Qualitätssicherung von in situ Gaspermeabilitätsmessungen durchgeführt.

Auch die Baustoffe A1-Basisrezeptur und modifizierte A1-Rezeptur wurden analog zum Steinsalz strömungstechnisch charakterisiert. Für die Untersuchungen an Proben der A1-Basisrezeptur kamen Proben zum Einsatz die im Rahmen eines Mischversuches unter Tage baubegleitend in ein KG-Rohr gegossen wurden. Für die Untersuchungen an Proben der modifizierten A1 - Rezeptur kamen Proben zum Einsatz, die aus dem Kernmaterial der Bohrungen B14-164 und B15-164 gewonnen wurden. Weiterhin wurden auch Proben der modifizierten A1-Rezeptur untersucht, die baubegleitend gegossen wurden.

8.4.1 Laboruntersuchungen – Ergebnisse zur effektiven Gaspermeabilität

Für die im Bauwerk eingesetzten Baustoff (A1-modifizierte Rezeptur) wurden wurden 11 Prüfkörper gewonnen und die effektive Permeabilität für Gas an diesen Prüfkörpern ermittelt. Diese liegt im Bereich von $9,0E-18 \text{ m}^2$ bis $2,4E-13 \text{ m}^2$ ($N=11$). Die Permeabilitätswerte der Proben P300-30/6, P300-30/7 und P300-30/8 weisen für einen Sorelbeton mit Gaspermeabilitätswerten zwischen $2,1E-15 \text{ m}^2$ und $2,4E-13 \text{ m}^2$ außergewöhnlich hohe Werte auf und werden als Ausreißer angesehen. Auffällig ist dabei, dass diese 3 Proben alle dem gleichen KG-Rohr zugeordnet werden. Deshalb werden die ermittelten Gaspermeabilitäten für die modifizierte A1-Rezeptur einmal unter Berücksichtigung aller Prüfergebnisse ($N=11$) und einmal ohne die 3 genannten Proben ($N=8$) dargestellt.

Für die A1-Basisrezeptur wurden zwei Werte ($N=2$) bestimmt. Sie weisen mit $7,0E-19 \text{ m}^2$ und $1,2E-18 \text{ m}^2$ Werte auf, die in der typischen Bandbreite der A1-Basisrezeptur liegen.

Die an den 8 Steinsalzproben bestimmte Bandbreite der Gaspermeabilität von $3,1E-16 \text{ m}^2$ bis $8,1E-18 \text{ m}^2$ ist charakteristisch für das entspannte bzw. geschädigte konturnahe Steinsalz.

Das geometrische Mittel und das durch die Min-Max-Werte gegebene Intervall sind in Abbildung 82 dargestellt.

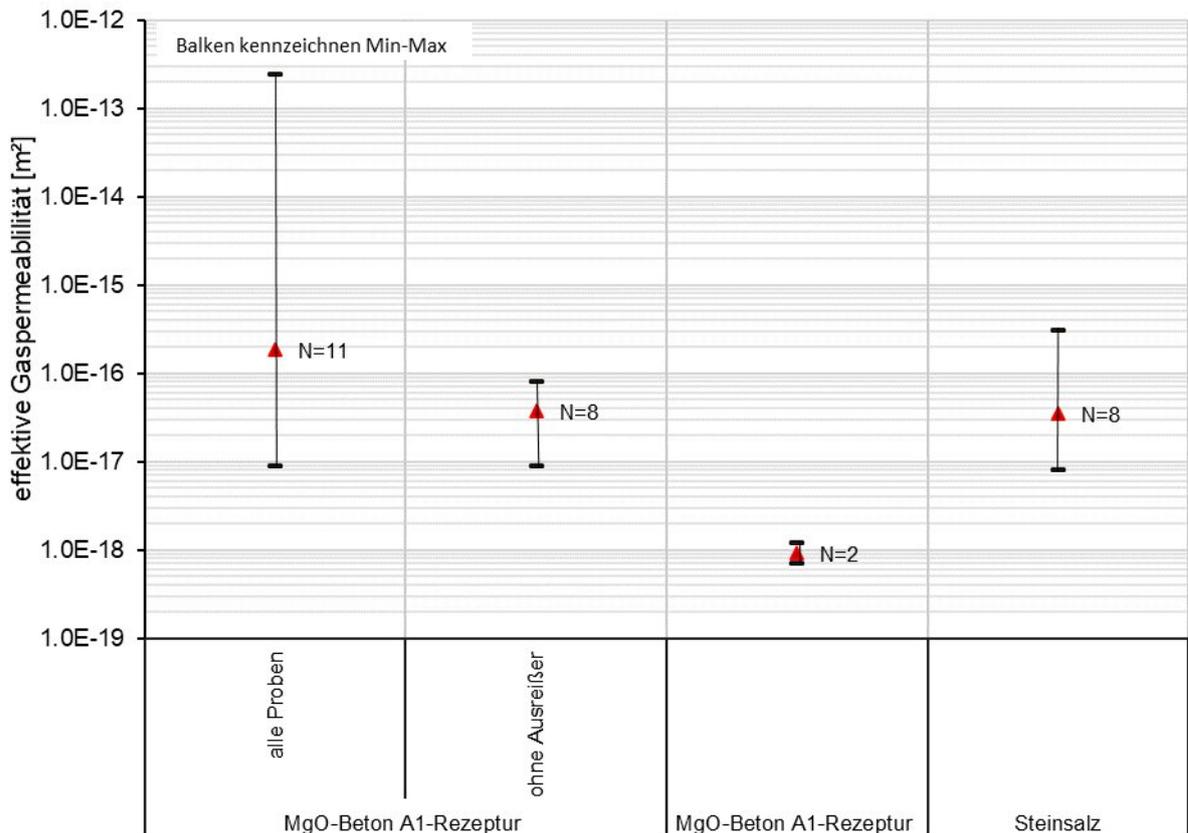


Abbildung 82: An den A1-Rezepturen und Steinsalz ermittelte effektive Gaspermeabilität

8.4.2 Laboruntersuchungen - Ergebnisse zu Porosität und Porenraumsättigung

8.4.2.1 Lösungsgehalt

Zur Bestimmung der Lösungsgehalte wurden Baustoffproben und Steinsalzproben getrocknet. Die Trocknung erfolgte bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen [26].

Als Ergebnis der Trocknung wurde für den Baustoff ein Lösungsgehalt unter der Annahme berechnet (Anlage 6.2.1), dass es sich bei der Porenlösung um eine $MgCl_2$ -gesättigte Porenlösung mit einer Dichte von $1,30 \text{ g/cm}^3$ und einer Gesamtmineralisation $0,43 \text{ g/cm}^3$ (20°C) handelt.

Als Ergebnis der Trocknung für Proben aus dem Gebirge (Steinsalz) wurde ein Lösungsgehalt unter der Annahme berechnet (Anlage 6.2.1), dass es sich bei der Porenlösung um eine $NaCl$ -gesättigte Porenlösung mit einer Dichte von $1,20 \text{ g/cm}^3$ und der Gesamtmineralisation von $0,32 \text{ g/cm}^3$ (20°C) handelt.

Die Trocknungen wurden bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. In der folgenden Abbildung 83 sind die Ergebnisse materialspezifisch mit Angabe der Trocknungstemperatur zusammengefasst.

Aus dem Ergebnis für die Lösungsgehalte ist abzuleiten, dass es sich bei den in Abbildung 82 dargestellten Permeabilitätswerten für die Baustoffproben und die Steinsalzproben um effektive Gaspermeabilitäten handelt.

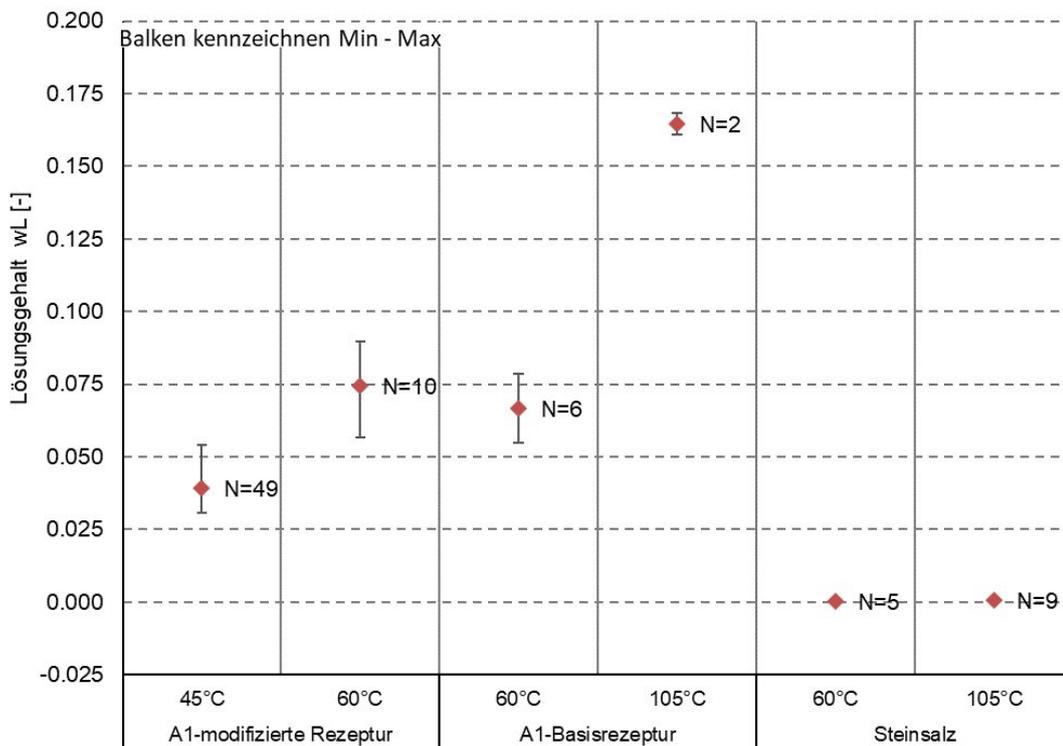


Abbildung 83: Am Baustoff und Steinsalz ermittelter Lösungsgehalt für unterschiedliche Trocknungstemperaturen

Tabelle 15: Ergebnisübersicht der ermittelten Lösungsgehalte mit Angabe der Trocknungstemperatur

Material	Trocknung [°C]	MW±Standardabweichung (Min-Max)	N
A1-modifizierte Rezeptur	45	0,039±0,004 (0,031-0,054)	N=49
	60	0,074±0,013 (0,057-0,090)	N=10
A1-Basisrezeptur	60	0,067±0,010 (0,055-0,079)	N=6
	105	0,165±0,005 (0,161-0,168)	N=2
Steinsalz	60	<0,001	N=5
	105	<0,001	N=9

8.4.2.2 Dichte

Mit dem Ziel, die totale Porosität zu berechnen, wurden an dem Probenmaterial die Feuchtdichte, die Reindichte und die Trockendichte bestimmt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Größen ist in Anlage 6.2.2 beschrieben. Die Ergebnisse für die Reindichte und die Trockendichte finden sich in Abbildung 84 und Tabelle 16 sowie Abbildung 85 und Tabelle 17.

8.4.2.2.1 Reindichte

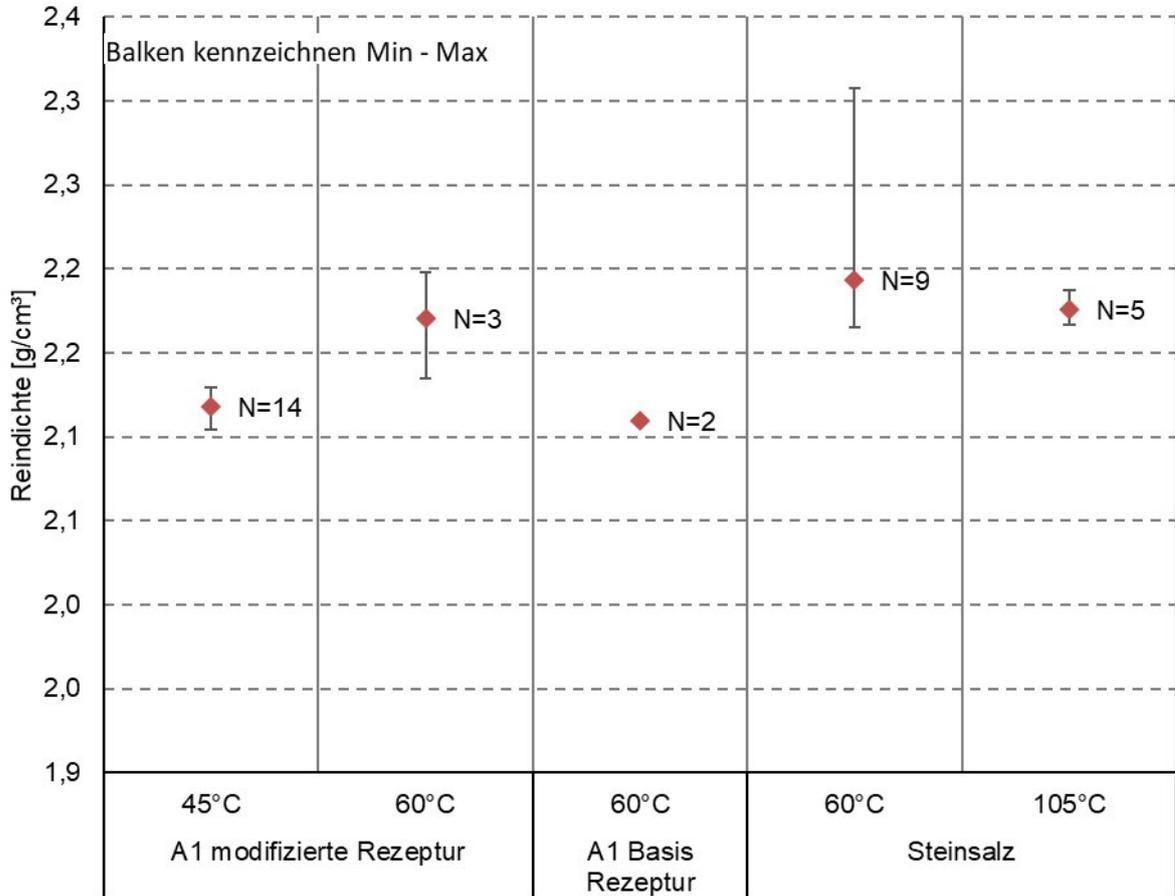


Abbildung 84: Am Baustoff und Steinsalz ermittelte Reindichte für unterschiedliche Trocknungstemperaturen

Tabelle 16: Ergebnisübersicht der ermittelten Reindichten

Material	Trocknung [°C]	F _R [%]	MW±Standardabweichung (Min-Max)	
			Mittelwert	N
A1-modifizierte Rezeptur	45	~8	2,118±0,007 (2,104-2,129)	N=14
	60	~3	2,171±0,032 (2,135-2,198)	N=3
A1-Basisrezeptur	60	~3	2,110±0,001 (2,109-2,111)	N=2
Steinsalz	60	~3	2,193±0,044 (2,165-2,308)	N=9
	105	0	2,176±0,009 (2,166-2,187)	N=5

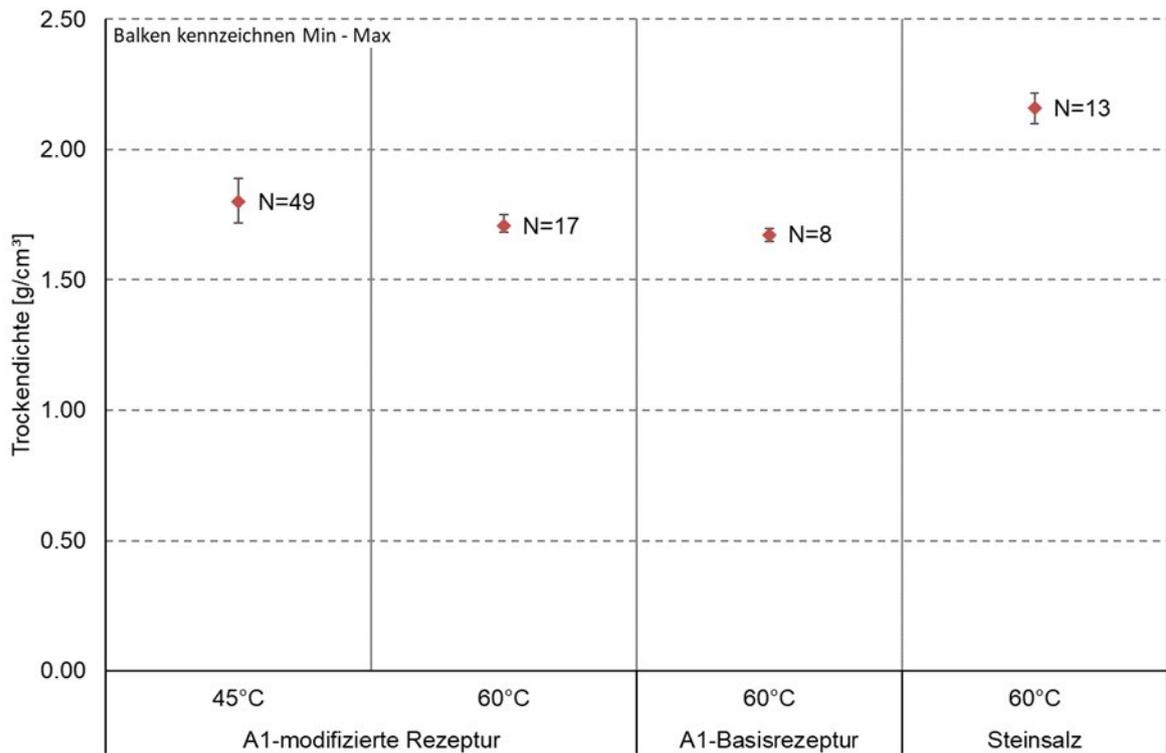


Abbildung 85 Am Baustoff und Steinsalz ermittelte Trockendichte

Tabelle 17 Ergebnisse der Trockendichteberechnung

Material	Trocknung [°C]	F _R [%]	MW±Standardabweichung (Min-Max)	N
A1-modifizierte Rezeptur	45 °C	~8	1,801±0,041 (1,717-1,888)	N= 49
	60 °C	~3	1,706±0,021 (1,681-1,749)	N= 17
A1-Basisrezeptur	60 °C	~3	1,673±0,018 (1,647-1,696)	N= 8
Steinsalz	60 °C	~8	2,159±0,032 (2,099-2,215)	N= 13

8.4.2.3 Porosität aus den Dichten

Die totale Porosität wird wie in Anlage 6.2.3 beschrieben aus der Trockendichte und der Reindichte berechnet. Die errechneten totalen Porositäten finden sich in Abbildung 86 und Tabelle 18.

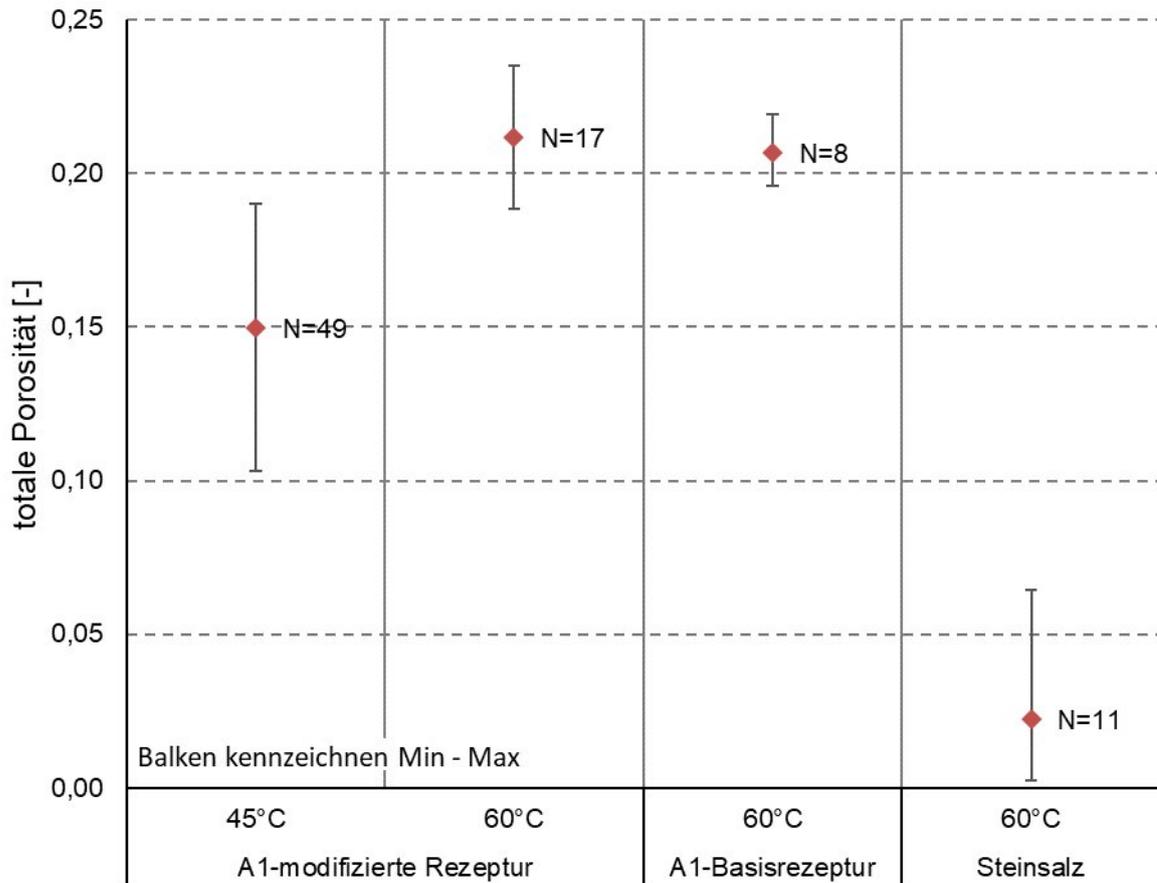


Abbildung 86: Aus den Dichten berechnete totale Porosität für Baustoff und Steinsalz

Tabelle 18: Ergebnisse der Porositätsberechnung aus Messwerten der Dichtemessung

Material	Trocknung [°C]	F _R [%]	MW±Standardabweichung (Min-Max)	N
A1-modifizierte Rezeptur	45 °C	~8	0,150±0,020 (0,103-0,190)	N= 49
	60 °C	~3	0,212±0,012 (0,188-0,235)	N= 17
A1-Basisrezeptur	60 °C	~3	0,207±0,009 (0,196-0,219)	N= 8
Steinsalz	60 °C	~3	0,022±0,018 (0,002-0,064)	N= 11

8.4.2.4 Porenraumsättigung

Die Größe der effektiven Gaspermeabilität hängt von der Porenraumsättigung ab, vgl. Anlage 6.1. Deshalb ist die Kenntnis der Porenraumsättigung für die verschiedenen Materialproben maßgeblich für die Bewertung von Gaspermeabilitätswerten.

Die Porenraumsättigung wird wie in Anlage 6.2.4 beschrieben berechnet. Die errechneten Ergebnisse sind in Abbildung 87 dargestellt und in Tabelle 19 zahlenmäßig angegeben.

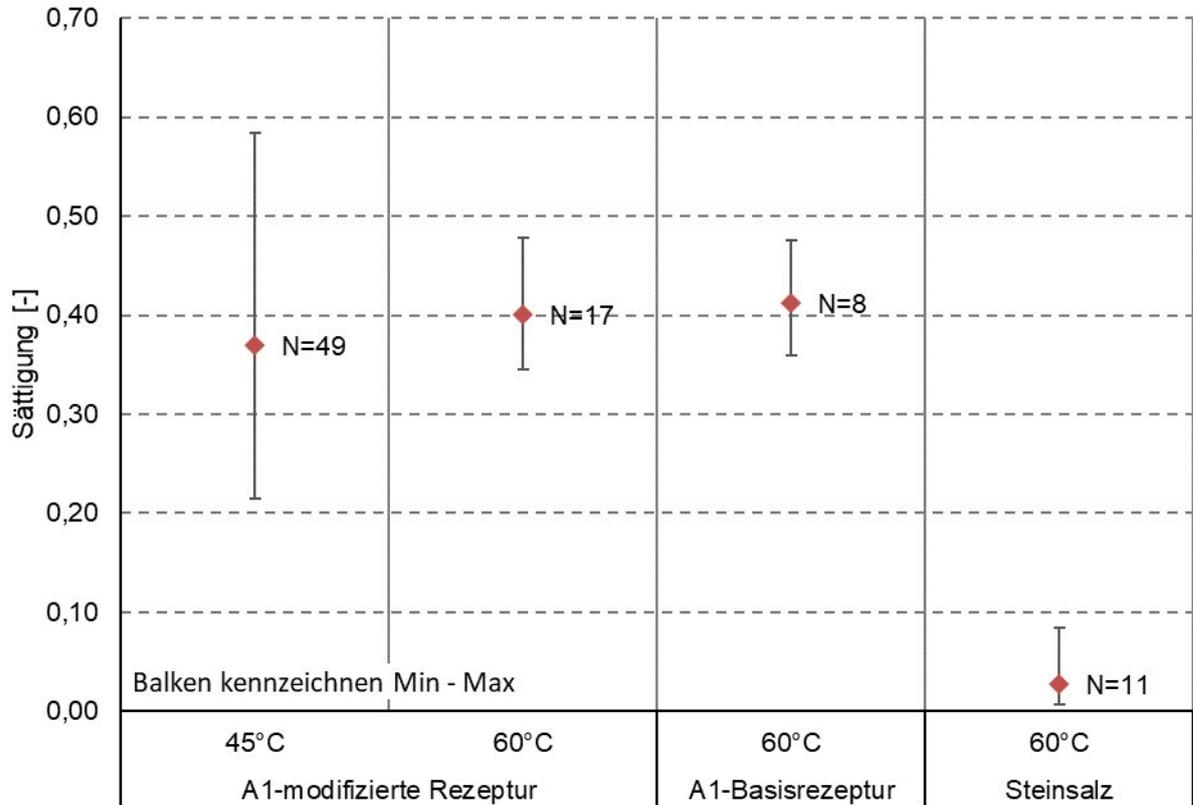


Abbildung 87: Aus dem Lösungsgehalt und der totalen Porosität berechnete Sättigung für Baustoff und Steinsalz

Tabelle 19: Ergebnisübersicht der berechneten Sättigung

Material	Trocknung [°C]	F_R [%]	MW ± Standardabweichung (Min-Max)	
A1-modifizierte Rezeptur	45 °C	~8	0,370 ± 0,072 (0,215-0,584)	N= 49
	60 °C	~3	0,400 ± 0,030 (0,345-0,478)	N= 17
A1-Basisrezeptur	60 °C	~3	0,413 ± 0,047 (0,360-0,476)	N= 8
Steinsalz	60 °C	~3	0,027 ± 0,026 (0,006-0,084)	N= 11

8.5 Einordnung der Permeabilitätswerte und Schlussfolgerungen

Die Befunde aller Gaspermeabilitätsmessungen im Labor sind in Abbildung 88 für die Steinsalzproben, die MgO-Baustoffproben und die Kompositproben zusammengestellt. Da die Kompositproben aus Steinsalz und MgO-Baustoff zusammengesetzt sind (siehe Abbildung 78 bis Abbildung 80) ist die Kenntnis der Ergebnisse zu den einzelnen Bestandteilen für die Einordnung der Ergebnisse an den Kompositproben notwendig. Im Vorfeld ist festzuhalten, dass es sich bei den angegebenen Permeabilitäten um effektive Gaspermeabilitäten handelt, siehe Abbildung 87.

Die Messergebnisse für die Steinsalzproben, die aus dem konturnahen Bereich der Versuchsstrecke stammen und als entspannt bzw. geschädigt anzusehen sind, zeigen eine Bandbreite der Permeabilität von $8,1\text{E-}18\text{ m}^2$ bis $3,1\text{E-}16\text{ m}^2$. Diese Werte ordnen sich in die Bandbreite der in situ gemessenen Permeabilitätswerte der Versuchsstrecke ein, siehe Hauptband. Vergleichbare Bandbreiten wurden auch an anderen Standorten festgestellt [27], [28], [29], [30], [31].

In Bezug auf die Permeabilitätswerte des Sorelbetons werden die beiden Sorelbetonrezepturen A1-Basisrezeptur und modifizierte A1-Rezeptur unterschieden. Die beiden exemplarischen Messwerte von $7,0\text{E-}19\text{ m}^2$ und $1,2\text{E-}18\text{ m}^2$ für die A1-Basisrezeptur geben das typische Permeabilitätsniveau dieser Rezeptur in situ wieder, vgl. [3], [4]. Die Gaspermeabilitätswerte für die modifizierte A1-Rezeptur aus den in KG-Rohren baubegleitend gegossenen Proben liegen in der Bandbreite zwischen $9,0\text{E-}18\text{ m}^2$ und $2,4\text{E-}13\text{ m}^2$. Die drei Werte zwischen $2,1\text{E-}15\text{ m}^2$ und $2,4\text{E-}13\text{ m}^2$ sind untypisch und werden, da die drei Proben zusätzlich aus demselben KG-Rohr stammen, als Ausreißer angesehen. Die übrigen Proben der modifizierten A1-Rezeptur zeigen Werte in der Bandbreite von $9,0\text{E-}18\text{ m}^2$ bis $7,2\text{E-}17\text{ m}^2$ und liegen damit am oberen Ende der Bandbreite, die die A1-Basisrezeptur charakterisiert. Dieses Ergebnis ist mit Bezug auf die Verschiebung der Porenraumstruktur hin zu höheren Porendurchmessern für die modifizierte A1-Rezeptur plausibel, siehe Kapitel 9.1.2.

Die A1-Basisrezeptur wurde zur Verfüllung der 300 mm Bohrung B01-30 eingesetzt. Die aus der Bohrung gewonnenen Kompositproben, deren Permeabilität in der Bandbreite von $2,3\text{E-}17\text{ m}^2$ bis $1,2\text{E-}15\text{ m}^2$ liegt, bestehen dementsprechend aus der A1-Basisrezeptur und dem entspannten bzw. geschädigten Steinsalz, das durch die Erstellung der Bohrung zusätzlich beansprucht wurde. Die an diesen Proben gemessenen Permeabilitätswerte liegen nur wenig oberhalb der für das Steinsalz festgestellten Bandbreite und innerhalb der Bandbreite, die für das an die Versuchsstrecke angrenzende Salz in situ festgestellt wurde (siehe Hauptband). Der Einfluss der Auflockerungszone der Bohrung sowie der Kontaktzone zwischen der Verfüllung und der Steinsalzkontur heben sich vom umgebenden Steinsalz nicht ab. Dies bestätigt die begrenzte Repräsentativität der Kontaktzone in einer Bohrung für die Kontaktzone eines Streckenverschlussbauwerkes. Wesentliche Ursachen dafür werden in der Rauheit der Bohrlochwandung und dem abweichenden Flächen/Umfang-Verhältnis gesehen – 300 mm-Bohrung: $13,3\text{ m}^{-1}$; Halbdamm: $2,4\text{ m}^{-1(6)}$. Im Hinblick auf die Bewertung des Rauheitseinflusses ist anzumerken, dass die Bohrungswandung aufgrund der Herstellung glatt ist

Die Laborkompositproben wurden aus gespaltenen Steinsalzkernen und A1-Basisrezeptur hergestellt. Die in situ-Kompositproben aus dem Bauwerk bestehen aus konturnahem Steinsalz und der modifizierten A1-Rezeptur. Die Bandbreite der Gaspermeabilitätswerte für die Laborkompositproben – die injizierte Probe ausgenommen – beträgt $9,3\text{E-}15\text{ m}^2$ bis $2,0\text{E-}12\text{ m}^2$. Der Wertebereich für die in situ-Kompositproben aus der Sohle des Bauwerkes beträgt $5,0\text{E-}15\text{ m}^2$ bis $6,5\text{E-}12\text{ m}^2$. Offensichtlich liegen die ermittelten Bandbreiten sowohl für den Laborkomposit als auch den in situ-Komposit aus der Bauwerkssohle so deutlich über

⁶ Nur Umfang mit Kontakt Baustoff/ Gebirge

den Gaspermeabilitätswerten ihrer Bestandteile, dass von der Dominanz der Kontaktzone für das Permeabilitätsniveau ausgegangen werden kann. Weiterhin deutet sich an, dass die Bandbreiten von Laborkomposit und in situ-Komposit aus dem Sohlbereich durchaus vergleichbar sind. Auch wenn dieses Ergebnis noch durch weitere Messungen zu untermauern ist, würde seine Bestätigung bedeuten, dass Laborkompositproben prinzipiell repräsentativ für in situ-Kompositproben aus der Bauwerksohle sein können.

Eine Gegenüberstellung zu in situ-Kompositproben aus den Streckenstößen des Bauwerkes steht noch aus.

Die in situ-Kompositproben wurden aus den Bereichen gewonnen, in denen die Salzkontur so bearbeitet wurde, dass diese unterschiedliche Rauigkeit aufwies. Auf der linken Seite (L) wurde die Oberfläche rau belassen, in der Mitte (M) mäßig bearbeitet und rechts (R) feingeschliffen, siehe Hauptband. Während für die Kernproben aus der rauhen, linken Seite zwei Werte von $5,0E-15 \text{ m}^2$ und $3,4E-13 \text{ m}^2$ ermittelt wurden, reicht die Bandbreite der Permeabilitätsergebnisse für die mäßig bearbeitete Mitte von $2,6E-14 \text{ m}^2$ bis $6,5E-12 \text{ m}^2$. Dem gegenüber sind die für die glatt geschliffene rechte Seite ermittelten Permeabilitäten von $7,2E-15 \text{ m}^2$ bis $1,0E-14 \text{ m}^2$ geringer und weisen eine geringere Variationsbreite auf.

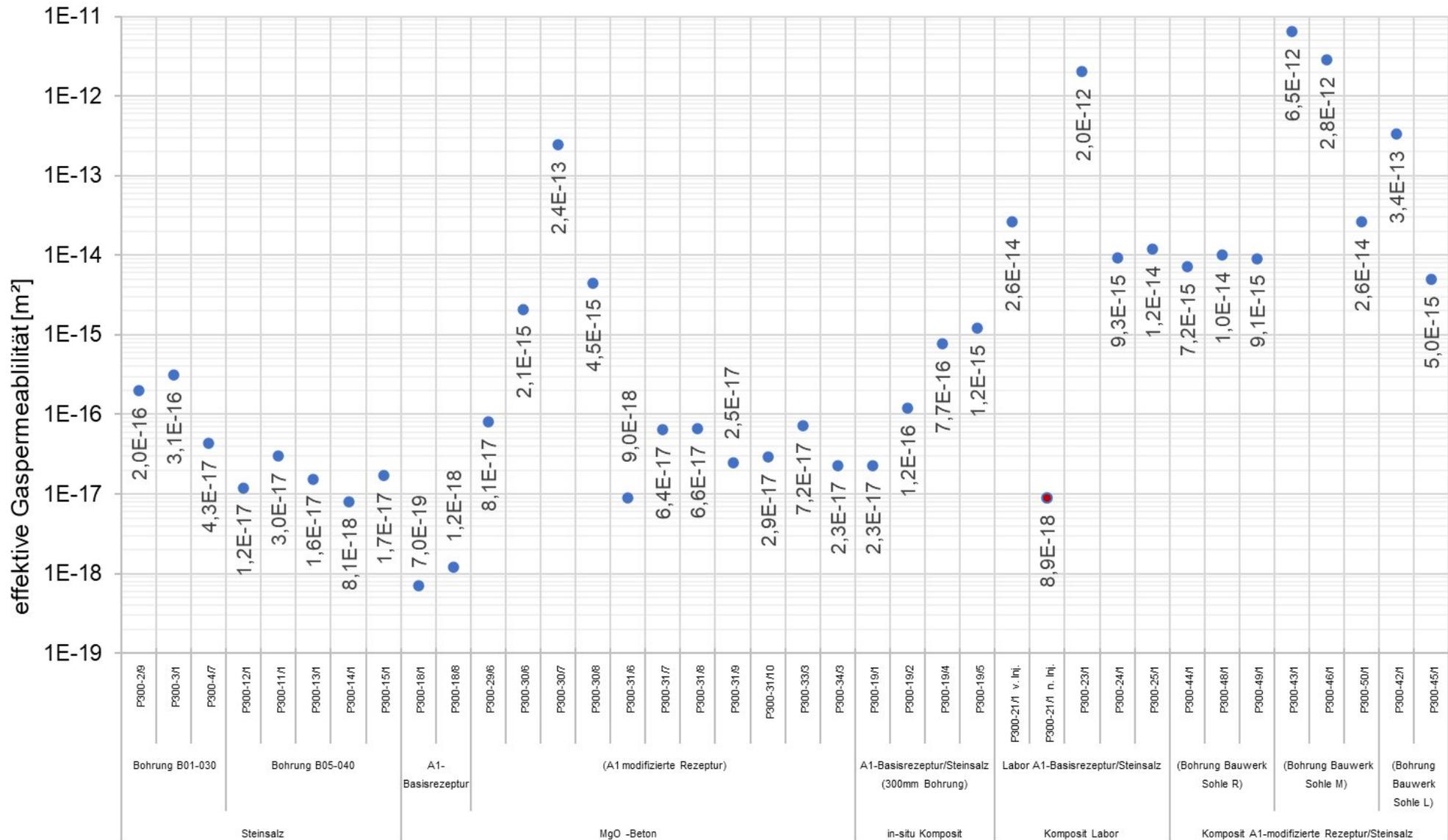


Abbildung 88: Zusammenstellung der ermittelten effektiven Gaspermeabilitätswerte an Probekörpern aus Steinsalz, der Sorelbeton A1-Basisrezeptur und der modifizierten A1-Rezeptur sowie an im Labor hergestellten und in situ gewonnenen Kompositproben

Die Gegenüberstellung der an den in situ-Kompositproben aus dem Bauwerk ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten zu den im Ergebnis der Auswertung der Bauwerkstestung identifizierten Permeabilitäten für die Kontaktzone der Bauwerkssohle ($2,0E-15 \text{ m}^2$ bis $1,1E-14 \text{ m}^2$) ergibt eine relativ gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 89. Der aus den Tests des Bauwerkes interpretierte Permeabilitätsbereich für die Kontaktzone in der Bauwerkssohle ordnet sich in die Ergebnisse der aus dem Bauwerk gewonnenen Kompositproben aus diesem Bereich ein.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Maßstäbe der modellgestützten Testauswertung und die Abmessungen der untersuchten Kernproben um Größenordnungen auseinander liegen.

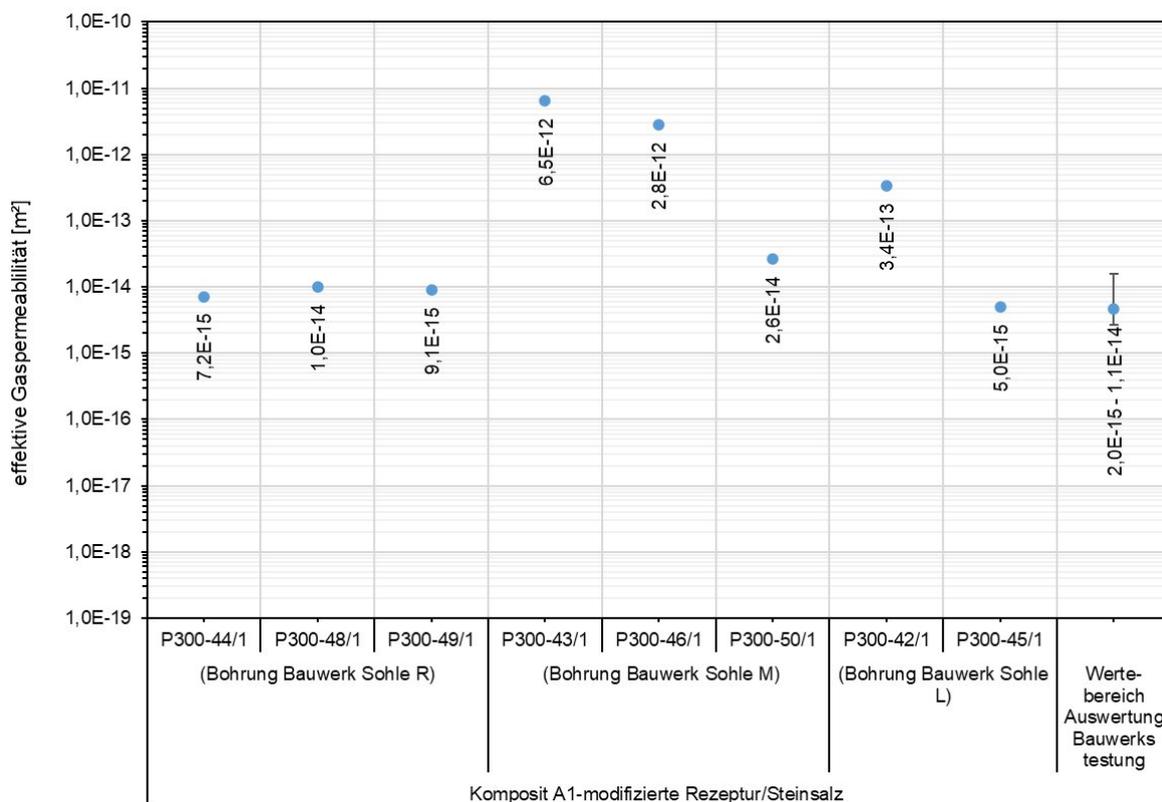


Abbildung 89: Vergleichende Gegenüberstellung der effektiven Gaspermeabilitäten der in situ-Kompositproben und der Ergebnisse der Testauswertung für die Kontaktzone Sohle

Die hohen Gaspermeabilitätswerte für einzelne in situ-Kompositproben, die eher für Spaltströmungen typisch sind, legen die Frage nahe, ob die im Labor verwendete Probengröße ausreicht, um die Kontaktzone repräsentativ abzubilden, vgl. dazu die Untersuchungen in [32] zur Repräsentativität der Permeabilitätswerte an Salzkernen in Abhängigkeit der Probengröße.

Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass sich aus den CT-Untersuchungen an den zwei Kernproben mit 90 mm Durchmesser und ca. 40 mm Länge, die kombiniert werden, eine qualitative Vorstellung zur Verteilung und Größe von Wegsamkeiten in der Kontaktzone der Bauwerkssohle (siehe Kapitel 8.3) ergibt. Die beurteilbare Kontaktfläche (Abbildung 81) der Probenkörper beträgt ca. 72 cm², so dass die Beobachtungen an den untersuchten Prüfkörpern als repräsentativ für das Vorhandensein, die Größe und die Verteilung der Wegsamkeiten in der Kontaktzone angesehen werden.

Weiterhin ist der Einfluss der Einspannung der Kontaktzone zu beachten, siehe [33]. Dieser Aspekt wurde bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht systematisch verfolgt und wird an dieser Stelle deshalb nicht bewertet, sollte aber bei zukünftigen Betrachtungen berücksichtigt werden.

Auch wenn hinsichtlich der Repräsentativität der Laborkompositproben noch Untersuchungsbedarf besteht, ist positiv festzustellen, dass die Klärung dieser Frage erst durch den Vergleich mit dem neu entwickelten Testsystem belastbar möglich ist.

In jedem Fall ergibt sich für die Testauswertung in der Bauwerkssohle das Permeabilitätsniveau der Kompositproben aus dem geglätteten Sohlbereich des Bauwerkes.

Indirekt kann daraus auf einen plausiblen Modellansatz für die Auswertung der Bauwerkstests geschlossen werden. Dies gilt umso mehr, da die Ergebnisse der Komposituntersuchungen erst nach den Testauswertungen vorlagen und bei der Testauswertung nicht berücksichtigt wurden.

Die in Auswertung der Bauwerkstestung ermittelte Permeabilität für die Kontaktzone in der Sohle ist ein integraler Parameter⁷ für die Bauwerksabschnitte zwischen den Ringkammern. Die Größe dieser integralen Permeabilität wird vom Niveau der geringsten Permeabilität entlang des Strömungsweges in der Kontaktzone bestimmt. Die Übereinstimmung des Permeabilitätsniveaus im Ergebnis der Testauswertung mit der unteren Grenze der Permeabilitäten für die Proben aus Kontaktzone kann strömungstechnisch also als plausibel angesehen werden.

⁷ integral für die angeströmte Fläche und die durchströmte Länge in der Kontaktzone

9 Technischer Anhang – Teil 6

9.1 Weiterführende Untersuchungen zur Porenraumstruktur

Üblicherweise wird die Porengrößenverteilung mittels Quecksilberporosimetrie (MIP) bestimmt. Das Verfahren ist in Anlage 6.2.5 beschrieben. Im Bereich der Porendurchmesser $>100\ \mu\text{m}$ wird die Quecksilberporosimetrie i. d. R. unscharf. Damit werden ggf. große Poren nicht erfasst, womit Information über möglicherweise transportwirksamen Porenraum verloren geht. Weiterhin werden geschlossene Poren durch Quecksilberporosimetrie ebenfalls nicht erfasst. Deshalb wurde über die Quecksilberporosimetrie hinaus ergänzend CT eingesetzt, um den Porenraum des Steinsalzes und des Baustoffs zu charakterisieren. Weiterhin wurde versucht, durch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Verfahren (MIP/CT) am selben Prüfkörper, die Interpretation der Ergebnisse der beiden Verfahren zu optimieren, siehe Anlage 7.1 und Anlage 7.2.

Zuerst erfolgten die CT – Untersuchungen hinsichtlich Porosität und Porengrößenverteilungen (Anlage 7), anschließend wurden dieselben Probenkörper mittels Quecksilberporosimetrie ebenfalls hinsichtlich Porosität und Porengrößenverteilung charakterisiert. Diese Untersuchungsreihenfolge ist deshalb notwendig, um auszuschließen, dass die Quecksilberporosimetrie den Porenraum beeinflusst hat.

Für die MIP-Untersuchungen wurden folgende Porosimeter verwandt:

Die Proben des Steinsalzes und der A1-Basisreptur wurden mit dem Porosimeter AutoPore V9600 1.03 der Firma Micromeritics bei einem maximalen möglichen Druck von ca. 420 MPa und einem messbaren Porendurchmesser bis ca. 700 μm , Micromeritics GmbH untersucht. Je nach Versuchsdurchführung erlaubt dieses Porosimeter laut Hersteller Micromeritics sogar maximale Porendurchmesser von 900 μm , jedoch werden die Messergebnisse im Bereich der großen Porendurchmesser unscharf, siehe Anlage 6.2.5.

Die Proben der modifizierten A1-Rezeptur wurden mit den Geräten Pascal 140 und Pascal 240 der Firma Porotec untersucht, die den üblichen Messbereich für die Porendurchmesser bis 100 μm besitzen.

9.1.1 Steinsalz

9.1.1.1 Porosität und Porengrößenverteilung aus CT - Steinsalz

Für die vergleichenden Untersuchungen am geschädigten Steinsalz wurden Steinsalzwürfel mit einer Kantenlänge von ca. 20 mm präpariert und durch das HZDR mit Hinblick auf Porosität und Porenradienverteilung mittels CT untersucht. Die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise ist in Anlage 7.1 gegeben.

Im Ergebnis wurden im Steinsalz einige rissartige Porenstrukturen festgestellt, die wie folgt beschrieben werden:

Lokal erscheinen Ausweitungen der Strukturen (um 100 μm) luftgefüllt anhand des Grauwertes. Der größte Teil hebt sich wenig vom Grauwert des umgebenden Materials ab. Es könnte sich deshalb um Poren handeln, die entweder mit Lauge oder Kristallisaten gefüllt sind. Im letzteren Fall müssen sie als poröse Strukturen kleiner als das CT-Auflösungsvermögen (20 μm) verstanden werden. Da alle Bereiche, deren Grauwert signifikant unterhalb der jeweiligen Umgebung liegt, als Poren interpretiert werden, werden derartige Strukturen ebenfalls den Poren zugeordnet. Grundsätzlich wird durch CT die Porosität also eher überschätzt. Im Mittel ergibt sich eine CT-Porosität von $0,025\pm 0,006$. Die geringe Schwankungsbreite der Porosität weist darauf hin, dass die Probengröße ausreichend repräsentativ ist, obwohl nur vereinzelte Risse im CT-Bild ausgemacht werden können.

Als weiteren wichtigen Befund hat die Auswertung der CT-Aufnahmen der Proben hat gezeigt, dass eine Berücksichtigung der Oberflächenrauheit der Prüfkörper für die Ermittlung der Porengrößenverteilung notwendig ist (Anlage 7.1.2). Im Ergebnis der Berücksichtigung der Rauheit kann gezeigt werden, dass im (geschädigten) Steinsalz keine Poren mit einem Durchmesser $>200\ \mu\text{m}$ vorhanden sind (Anlage 7.1.3.2).

9.1.1.2 Porosität und Porengrößenverteilung aus MIP - Steinsalz

Für die Untersuchungen zur Porengrößenverteilung über Quecksilberporosimetrie (Mercury intrusion porosimetry – MIP) wurden die bereits erwähnten würfelförmigen Proben aus dem Kernmaterial der Erkundungsbohrungen mit einer Kantenlänge von ca. 20 mm nach den CT-Untersuchungen genutzt. Die für das Steinsalz angewendete Versuchsmethodik der MIP ermöglicht die Ermittlung von Porendurchmessern bis ca. $900\ \mu\text{m}$. In Anlage 6.2.5 ist das Verfahren der Quecksilberporosimetrie beschrieben. Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Messung im Bereich der Makroporen (Porendurchmesser laut Micromeritics bis $900\ \mu\text{m}$) bei sehr kleinen Druckdifferenzen (Druckhöhe des Quecksilbers im Messaufbau) einer wachsenden Unsicherheit unterliegt.

Der ermittelte Verlauf des Porenvolumenanteils für die vier Steinsalzproben (gestrichelte Kurven) findet sich in Abbildung 90. Die Darstellung der ursprünglich ermittelten Porengrößenverteilungen zeigt für den Bereich der Porengrößen $>200\ \mu\text{m}$ einen zum Teil sehr steilen Anstieg des Porenvolumenanteils. Dieser ungewöhnliche Verlauf und die Interpretationen der CT-Aufnahmen führen zu der Vermutung, dass auch für die Interpretation der MIP-Ergebnisse eine Berücksichtigung der Oberflächenrauheit der Probenkörper erforderlich ist. Entsprechend den Ergebnissen der CT-Auswertung wurde der Volumenanteil der Poren $>200\ \mu\text{m}$ auch aus dem Ergebnis der Quecksilberporosimetrie herausgerechnet. Die entsprechend korrigierten Porenvolumenanteile sind in ebenfalls in Abbildung 90 (durchgezogene Kurven) dargestellt. Es zeigt sich eine wesentlich bessere Übereinstimmung der Porengrößenverteilungen für die 4 Prüfkörper. In Abbildung 91 ist die korrigierte Porositätsverteilung über den Porendurchmesser dargestellt. Die an 4 Steinsalzproben ermittelte mit Quecksilber injizierbare Porosität liegt im Bereich von 0,005 bis 0,010 (N=4).

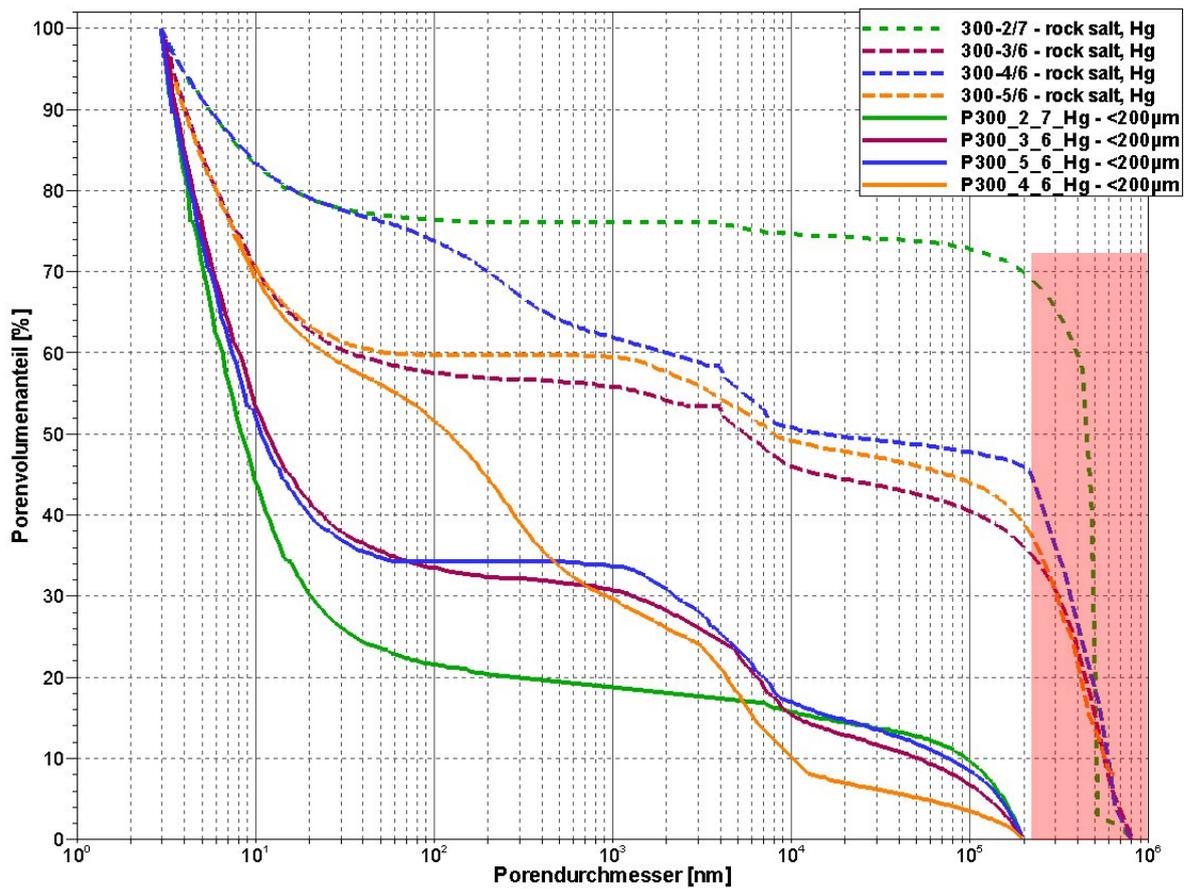


Abbildung 90: An 4 Steinsalzproben mit MIP ermittelter Porenvolumenanteil in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und vergleichend unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne den Porenvolumenanteil der Poren >200 μm

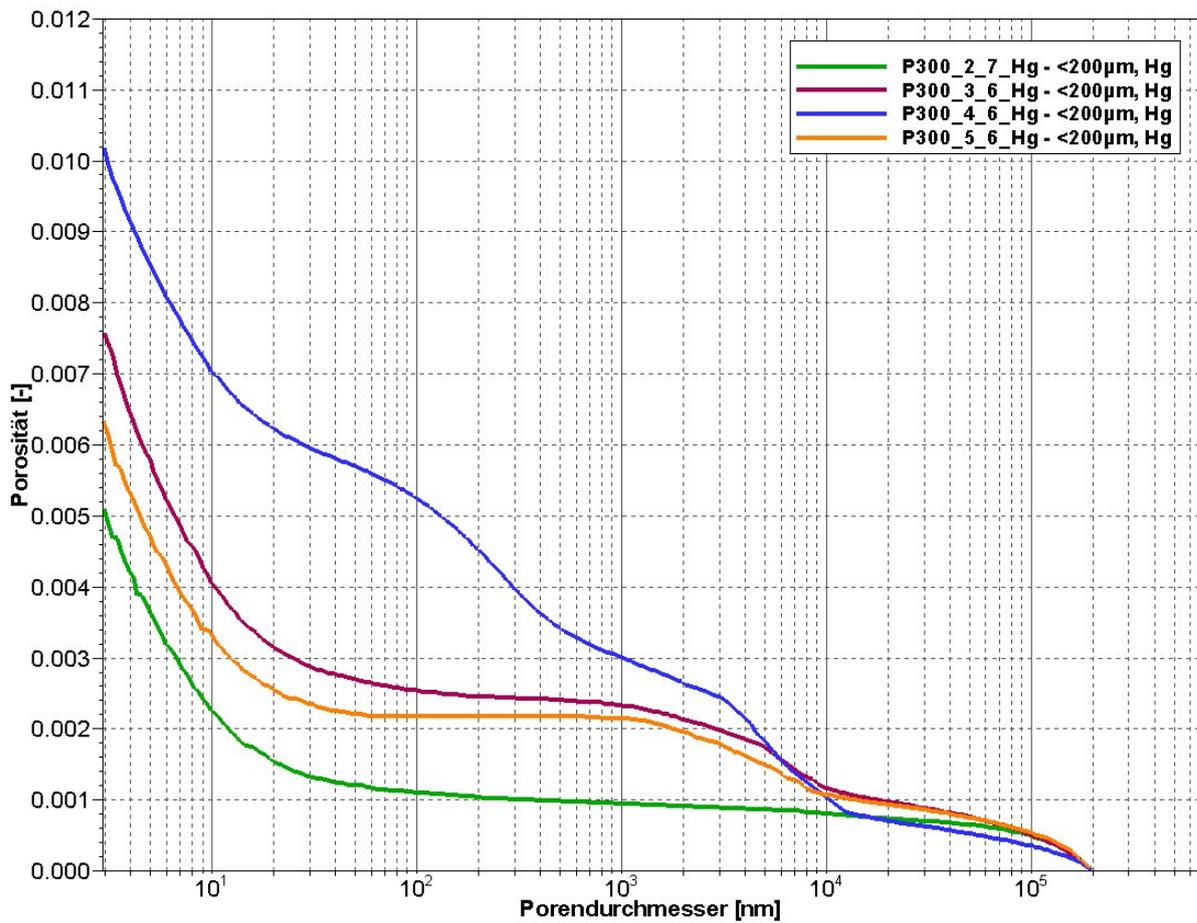


Abbildung 91: An Steinsalzproben mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne Poren >200 µm

Die den jeweiligen Porenklassen zugeordnete Porosität ist in Abbildung 92 dargestellt.

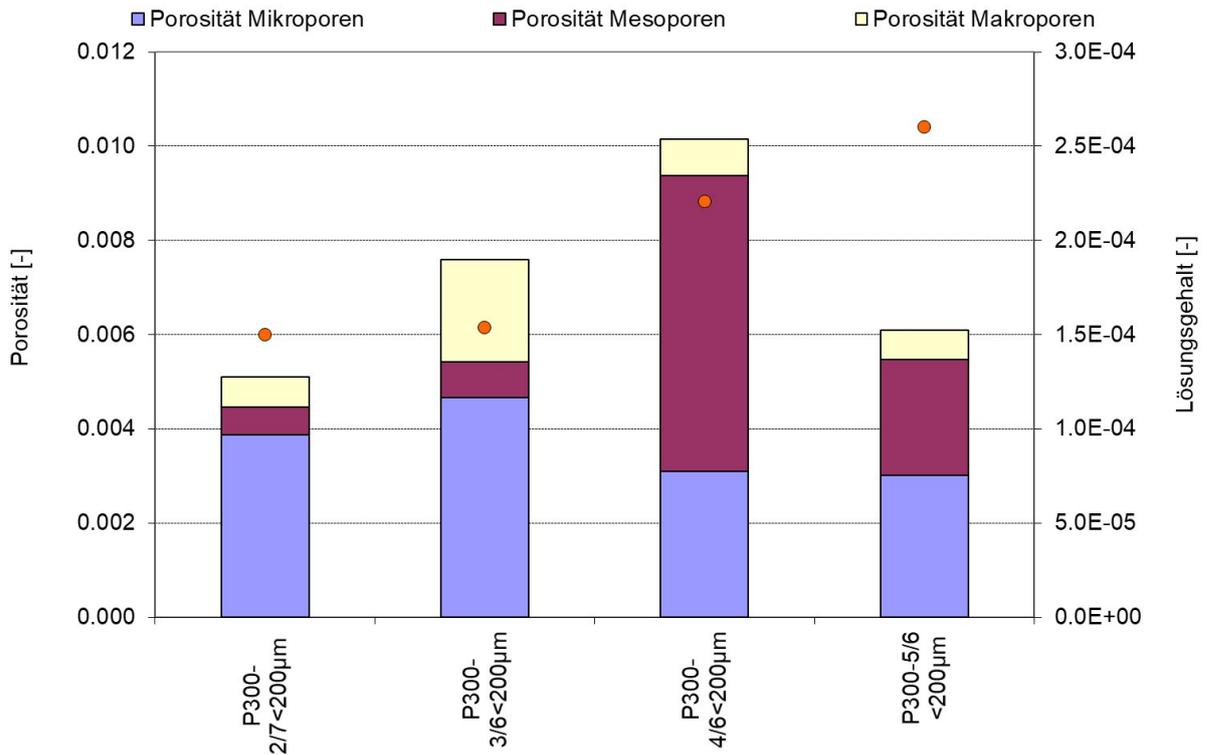


Abbildung 92: An Steinsalzproben ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen; die Punkte markieren die Lösungsättigung

9.1.1.3 Diskussion der Ergebnisse CT /MIP - Steinsalz

Wie bereits erwähnt, sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Messung im Bereich der Makroporen (Porendurchmesser laut Micromeritics bis 900 µm) bei sehr kleinen Druckdifferenzen (Druckhöhe des Quecksilbers im Messaufbau) einer wachsenden Unsicherheit unterliegt. In diesem Bereich ist die Erfassung mittels CT dagegen sehr sicher. In einem kleinen Überlappungsbereich von 50 µm bis 200 µm stimmen im CT und MIP weitgehend überein.

Aufgrund der unterschiedlichen Methodik der Ermittlung der Porengrößenverteilungen ist diese Übereinstimmung nicht selbstverständlich. Die MIP „verknüpft“ das für eine Druckdifferenz injizierte Quecksilbervolumen mit einem äquivalent gefüllten Porenvolumen, wobei der Durchmesser der Poren aus dem angewendeten Druck und den Benetzungseigenschaften des Quecksilbers berechnet wird. Der erforderliche Druck wird durch die injizierten Porenhälse/Porenverbindungen bestimmt. Das insgesamt injizierte Volumen berücksichtigt jedoch auch die mit Quecksilber aufgefüllten Porenräume. Diese Porenhälse bleiben bei der CT-Auswertung unberücksichtigt. MIP- und CT-Auswertungen stimmen dann überein, wenn es keine Größenvariationen in Injektionsrichtung (Porenhälse) gibt, also einfache Kapillarbündel oder vernetzte Poren mit konstanter Weite angenommen werden können. Derartige Risse legen auch die Ergebnisse der CT-Untersuchungen (Anlage 7.1.3.1) nahe. Es ist somit anzunehmen, dass der Porenanteil im Überlappungsbereich der Verfahren auf solchen Rissen beruht.

Feinere Poren als 1 µm, die entsprechend den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie einen großen Anteil am Porenvolumen ausmachen (siehe Abbildung 90), werden in der Auswertung der CT-Aufnahmen nicht erfasst. Die Existenz dieser Poren ist aufgrund der Schädigung der Prüfkörper durch Entspannung und Präparation unvermeidlich. Für die unmittelbare Streckenkontur, im Bereich weniger Zentimeter, sind diese Effekte in gleicher Weise zu erwarten.

Abschließend sind in Tabelle 20 und Abbildung 93 sind die Auswertungen zur Porosität aller Verfahren für die vier Probekörper zusammengestellt.

Tabelle 20: Auswertung der Porositätsergebnisse verschiedener Verfahren; Quecksilberporosimetrie ohne Poren >200 µm

Probe	n Mikro-poren	n Meso-poren	n Makro-poren	n Hg-injizierbar	n total aus Dichte	n CT	n _{surf} CT
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
P300-2/7	0,004	0,001	0,001	0,005	0,025	0,029	0,05
P300-3/6	0,005	0,001	0,002	0,008	0,021	0,025	0,066
P300-4/6	0,003	0,006	0,001	0,010	0,040	0,018	0,073
P300-5/6	0,003	0,002	0,001	0,006	0,019	0,019	0,065

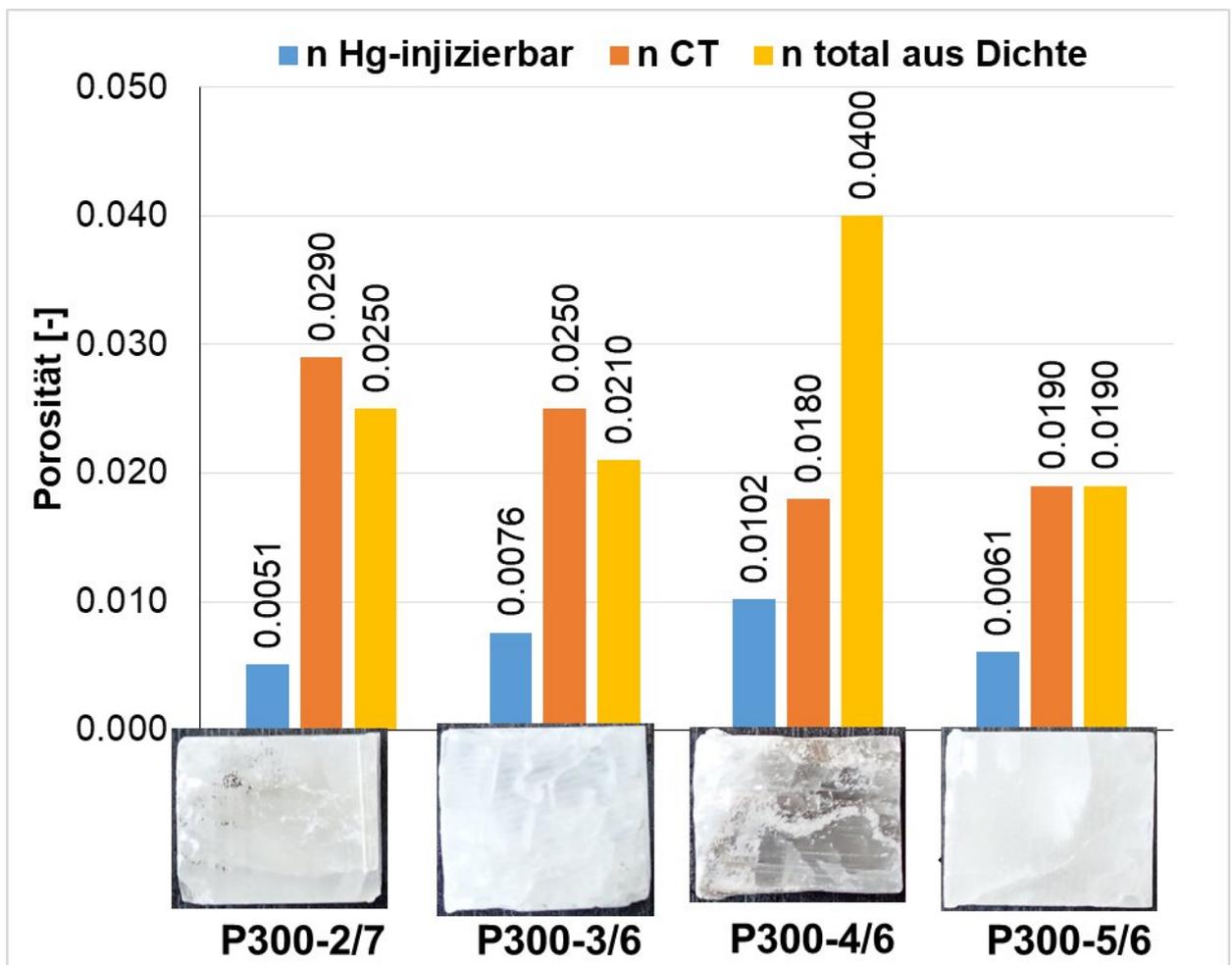


Abbildung 93: An Steinsalzproben bestimmte Porositäten durch MIP (Poren >200 µm vernachlässigt), CT und rechnerisch ermittelte totale Porosität

9.1.2 Sorelbetone

Für die beiden Sorelbetonrezepturen erfolgten ebenfalls Untersuchungen zur Porosität und Porengrößenverteilung. Im Falle der A1-Basisrezeptur wurden CT-Aufnahmen und Quecksilberporosimetrie durchgeführt. Für die modifizierte A1-Rezeptur kam ausschließlich Quecksilberporosimetrie zur Anwendung. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Folgenden beschrieben. Wieder erfolgten die CT-Untersuchungen vor der MIP, um Einflüsse durch eine mögliche Veränderung des Porenraumes durch die Injektion des Quecksilbers unter hohem Druck auszuschließen.

9.1.2.1 Porosität und Porengrößenverteilung aus CT - A1-Basisrezeptur

Für die Untersuchungen wurden aus den Kernproben der A1-Basisrezeptur zylindrische Prüfkörper ca. 20 mm Durchmesser präpariert, um ein möglichst großes Probenvolumen für die Quecksilberporosimetrie einzusetzen. Die zylindrische Geometrie wurde gewählt, um eine Optimierung für Untersuchungen der Prüfkörper mit CT zu ermöglichen.

Diese Proben wurden durch das HZDR mit Hinblick auf Porosität und Porenradienverteilung im CT untersucht. Die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise ist in Anlage 7.2 beschrieben.

In Befunde der CT-Untersuchungen an den Prüfkörpern aus MgO-Beton der A1-Basisrezeptur lassen sich wie folgt beschreiben:

Im Gegensatz zu den Steinsalzproben enthalten die Proben des MgO-Betons erhebliche Volumenanteile mit großen Porendurchmessern. Dadurch ist der Einfluss der Oberflächenrauheit hier zu vernachlässigen. Im Überlappungsbereich von 20 µm bis 700 µm stimmen die CT und MIP Radienverteilungen weitgehend überein. Darunter lassen sich mittels CT keine Poren detektieren. Allerdings zeigt der Verlauf der Quecksilber-Kapillardruckkurven deutlich, dass ein erheblicher Anteil feinerer Poren vorliegt, wodurch die CT nur etwa 30 % der vorhandenen Porosität erfasst.

Allerdings legen die CT-Bilder eine qualitative Präzisierung der MIP-Ergebnisse nahe: Die CT zeigt überwiegend im Rahmen des Auflösungsvermögens isolierte, blasenförmige Poren. Gleichzeitig weisen die Quecksilber-Kapillardruckkurven eine sehr starke Hysterese bzw. nach der Dekompression verbleibende Quecksilbersättigung auf. Dieser Effekt resultiert aus der Kompressibilität des Testaufbaus und deutet darauf hin, dass ein erheblicher Anteil größerer Poren über kleinere Zugänge gefüllt wird und somit dem kleineren Radius des Zugangs zugeordnet wird.

Es ist anzunehmen, dass der Radius dieser Zugänge im Bereich unter 0,1 µm liegt und mit einem starken Anstieg der Kapillardruckkurve gekoppelt ist. Der Volumenanteil der über diesen Zugang gefüllten Poren ist eher blasenförmigen größeren Poren zuzuordnen, das heißt, in geometrischer Hinsicht wird der Anteil feinerer Poren deutlich überschätzt, der Anteil großer Poren wird unterschätzt. Dies hat keinen Einfluss auf die ermittelte Porosität, kann aber vergleichsweise erhöhte Permeabilitäten erklären.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein Teil der mittels CT detektierten isolierten Poren hydraulisch nicht angeschlossen sind. Dies ist aber nicht wahrscheinlich, weil die mit MIP und aus der Dichte ermittelten Porositäten die CT-Porosität weit überschreiten.

Aus der CT-Phasenanalyse, aufgegliedert in Poren, Zement und Zuschlagskörnung, ergibt sich, dass die CT-Porosität des Baustoffes im Mittel $0,068 \pm 0,011$ beträgt. Da die MIP-Porosität etwa 0,17 und die aus den Dichten berechnete Porosität etwa 0,21 beträgt, bedeutet dies, dass etwa 70 % des Porenraums auf Porengrößen unterhalb des Auflösungsvermögens des CT zurückgeht, also $< 20 \mu\text{m}$ ist. Diese feinere Porosität befindet sich innerhalb der

Zementphase, die 60 % des Gesamtvolumens ausmacht. Die übrigen 32 % des Volumens sind Zuschlagskörnung, die weitgehend keine Poren enthält.

9.1.2.2 Porosität und Porengrößenverteilung aus MIP - A1-Basisrezeptur

An 4 Kernproben aus dem Baustoff A1-Basisrezeptur wurden Untersuchungen zur Porengrößenverteilung und Porosität über Quecksilberporosimetrie (maximaler Porendurchmesser ca. 900 μm) durchgeführt. Die Methodik ist in Anlage 6.2.5 erläutert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an der A1-Basisrezeptur sind in Abbildung 94 und Abbildung 95 aufgeführt. Die an den 4 Baustoffproben ermittelte mit Quecksilber injizierbare Porosität liegt im Bereich von 0,05 bis 0,18 (N=4).

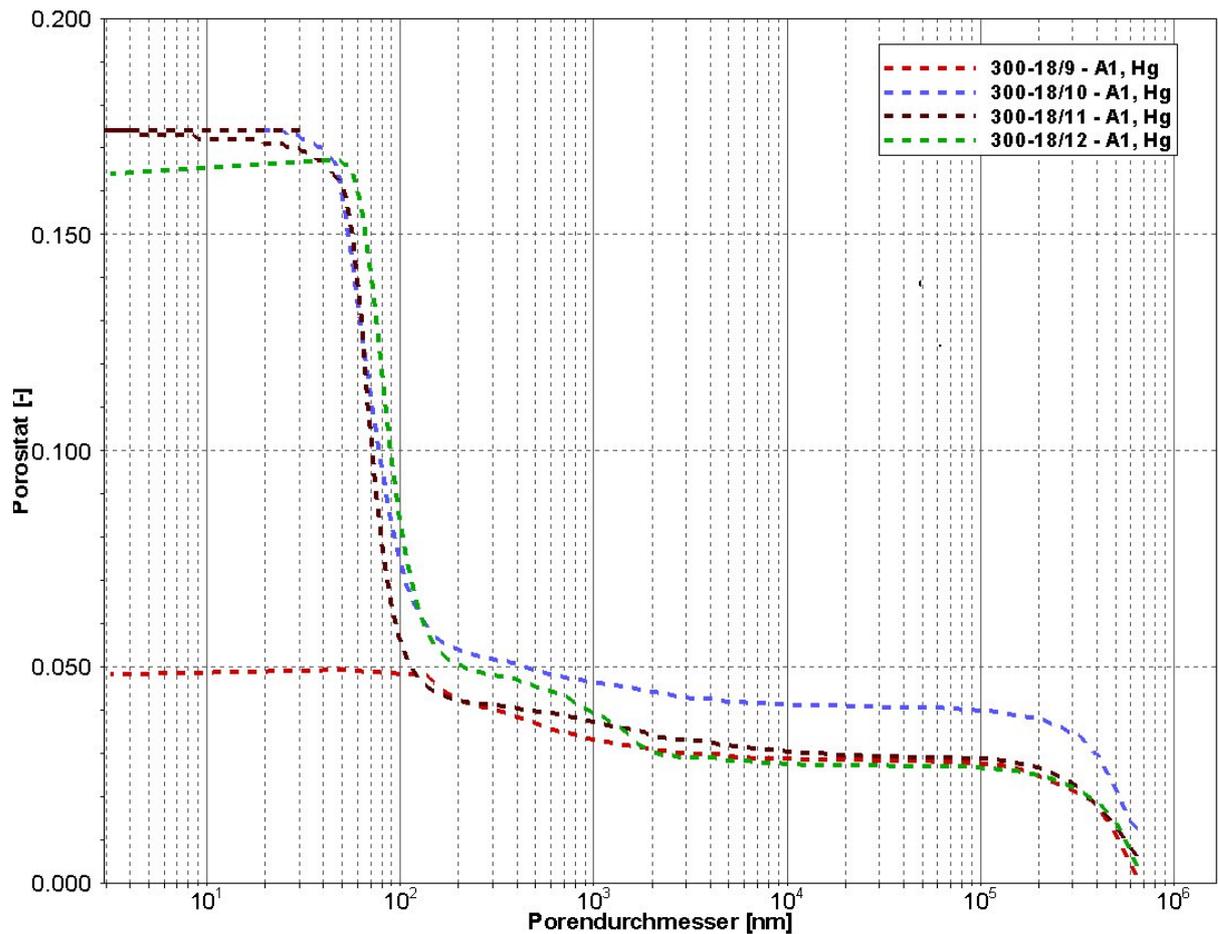


Abbildung 94: Am Baustoff der A1-Basisrezeptur mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser

Die den jeweiligen Porenklassen zugeordnete Porosität ist in Abbildung 95 dargestellt und in Tabelle 21 zahlenmäßig angegeben.

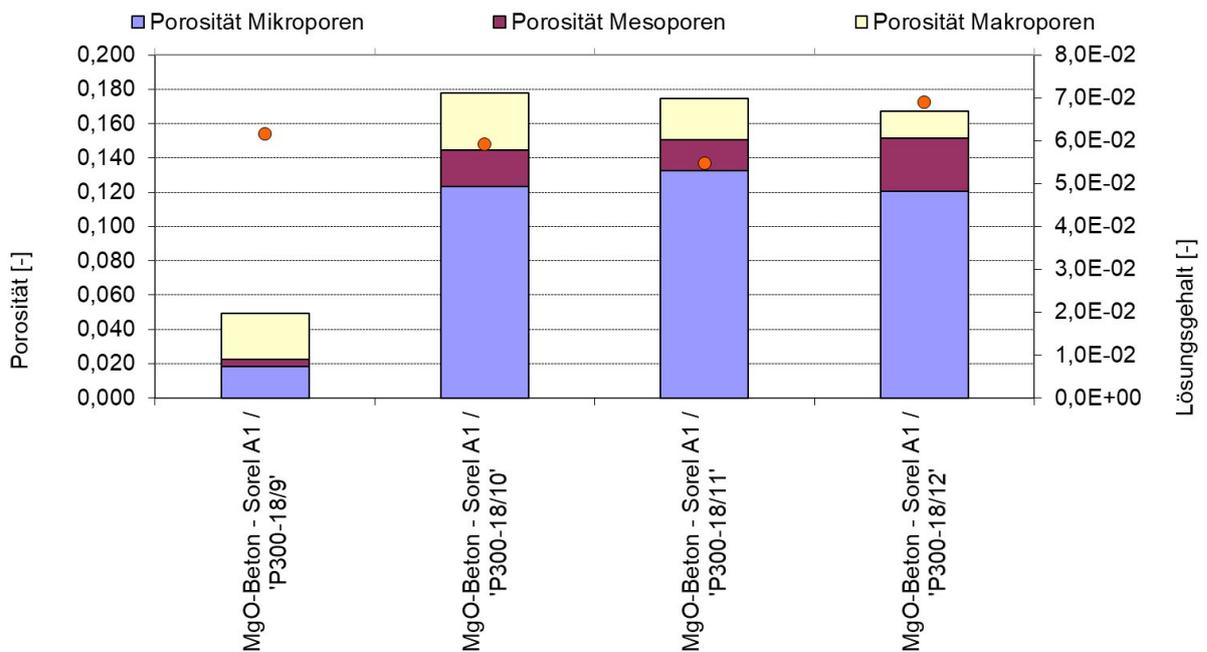


Abbildung 95: An Baustoffproben der A1-Basisrezeptur ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen; die Punkte markieren die Lösungs-sättigung

Tabelle 21: Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Baustoffproben der A1-Basisrezeptur

Probe	Lösungs-gehalt [60 °C] [-]	minimaler Porenradius ($p_{max}=413 \text{ MPa}$) [nm]	maxi-maler Poren-radius [nm]	n Mikro-poren [-]	n Meso-poren [-]	n Mako-poren [-]	n Hg-injizierbar [-]
P300-18/9	0,0617	2	318150	0,018	0,004	0,027	0,049
P300-18/10	0,0592	1	326900	0,123	0,021	0,034	0,178
P300-18/11	0,0547	1	323200	0,132	0,018	0,024	0,174
P300-18/12	0,0690	2	323200	0,121	0,031	0,016	0,167

9.1.2.3 Gegenüberstellung verschiedener Verfahren - A1-Basisrezeptur

Für die präparierten Zylinder der A1-Basisrezeptur, welche zusätzlich am CT analysiert wurden, können die ermittelten Porositäten vergleichend beurteilt werden.

Mit Ausnahme der quecksilberinjizierbaren Porosität für den Prüfkörper P300-18/9 sind die Porositäten aus der Quecksilberporosimetrie größer als die Porositäten aus den CT Untersuchungen am HZDR (Anlage 7.2Tabelle 30).

Der Strömungsprozess von Quecksilber in der Porenstruktur des Baustoffes erreicht alle vernetzten Poren, die für die Druckbedingungen und die Benetzungseigenschaften des Quecksilbers zugänglich sind. Darunter ist auch der Anteil an Mikroporen, der im CT nicht erfasst werden kann. Das führt zu einer höheren HG injizierbaren Porosität.

Es wird weiterhin vermutet, dass ein geringer Teil des Porenvolumens ("Totporenvolumen") nicht durch Quecksilber erreicht wird. Daraus resultiert für Porositäten aus

Quecksilberporosimetrieuntersuchungen erfahrungsgemäß eine etwas geringere Gesamtporosität im Vergleich zu den aus den Dichten berechneten Porositäten. Im Ergebnis der Auswertung der CT-Aufnahmen können lediglich Aussagen für Poren größer ca. 20 µm abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung des großen Volumenanteils an Poren kleiner ca. 20 µm sind die im Ergebnis der CT-Auswertung ermittelten Porositäten entsprechend den Ergebnissen in Abbildung 96 in vielen Fällen geringer als im Ergebnis der Dichten und der MIP.

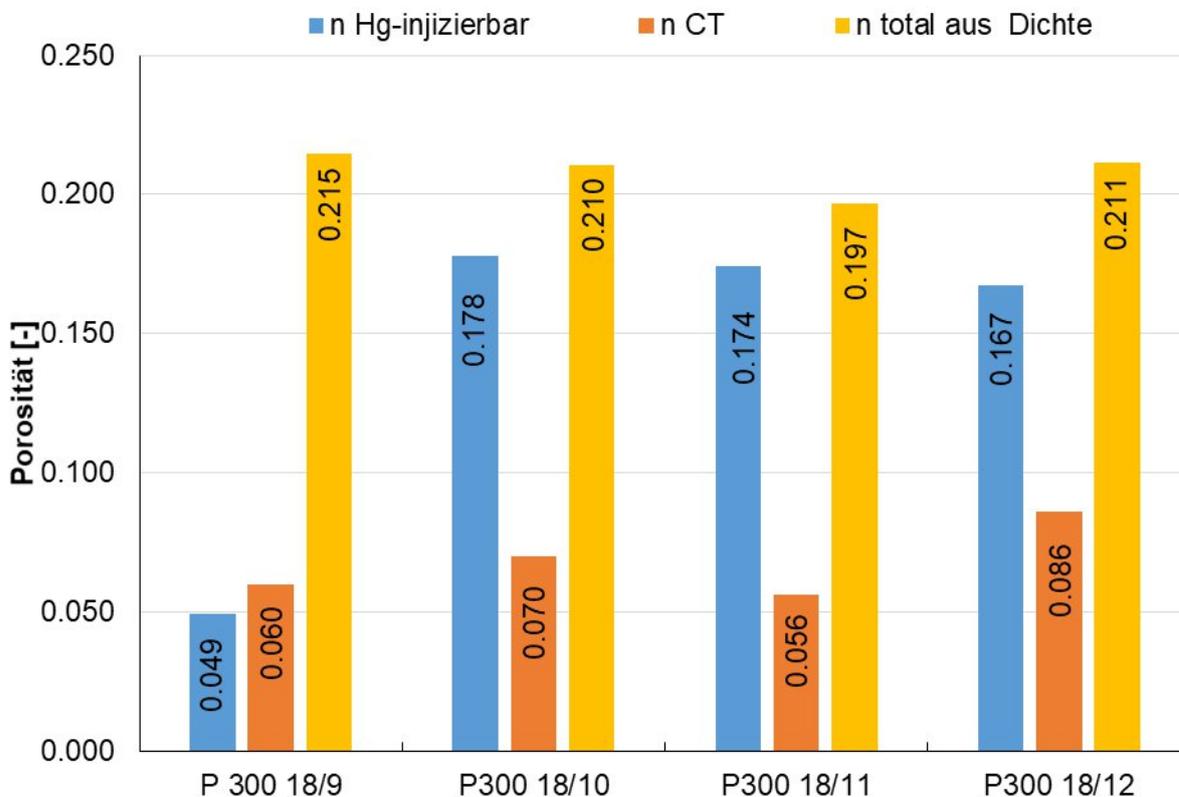


Abbildung 96: Porositäten Baustoffprüfkörper aus MIP, CT und Dichten

9.1.2.4 Porosität und Porengrößenverteilung aus MIP - modifizierte A1-Rezeptur

An drei Proben der modifizierten A1-Rezeptur, die im Bauwerk zum Einsatz kam, wurde durch die TUC ebenfalls die Porengrößenverteilung über Quecksilberporosimetrie (maximaler Porendurchmesser ca. 100 µm) ermittelt, siehe Abbildung 97. Die an den drei Baustoffproben ermittelte mit Quecksilber injizierbare Porosität liegt bei Bereich 0,14 (N=3). Die den jeweiligen Porenklassen zugeordnete Porosität ist in Abbildung 98 dargestellt und in Tabelle 22 zahlenmäßig angegeben.

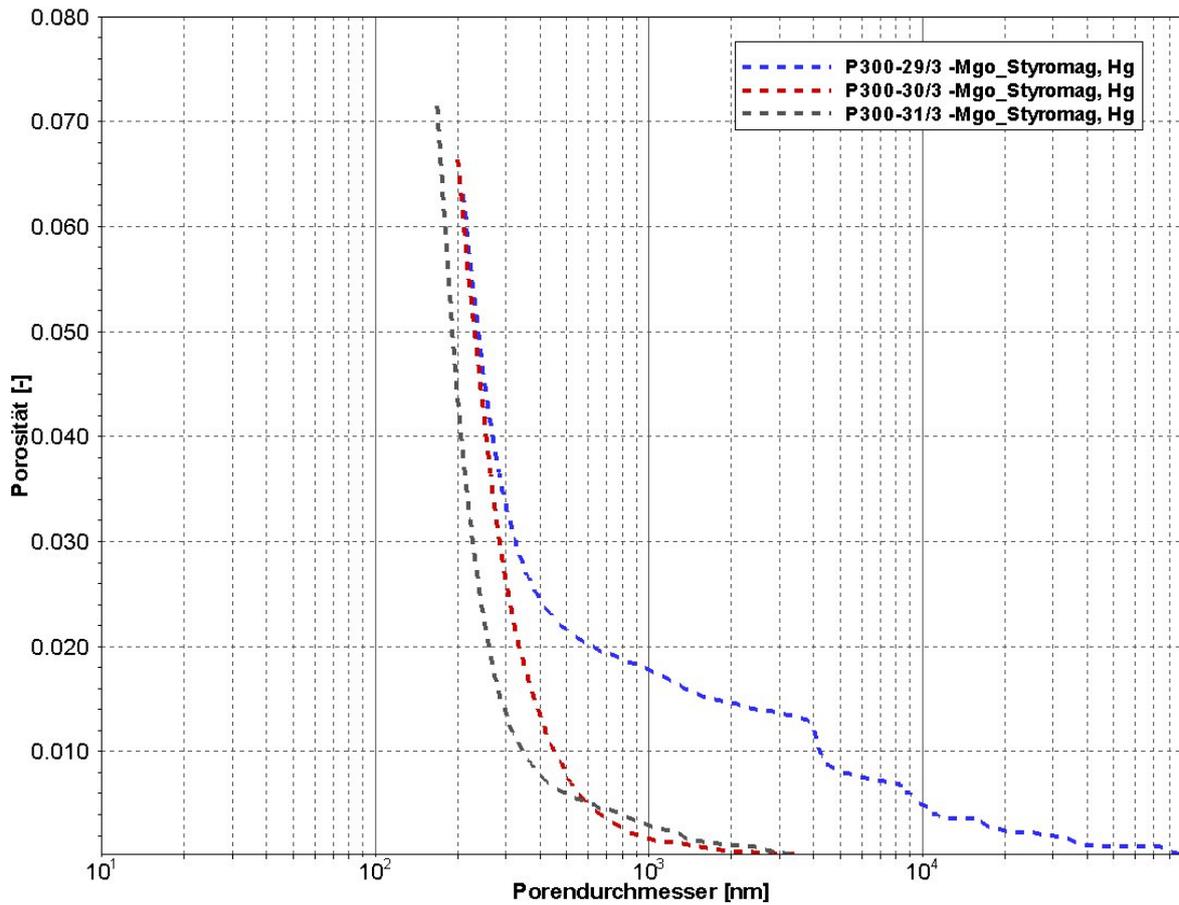


Abbildung 97: Am Baustoff des Bauwerkes mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser

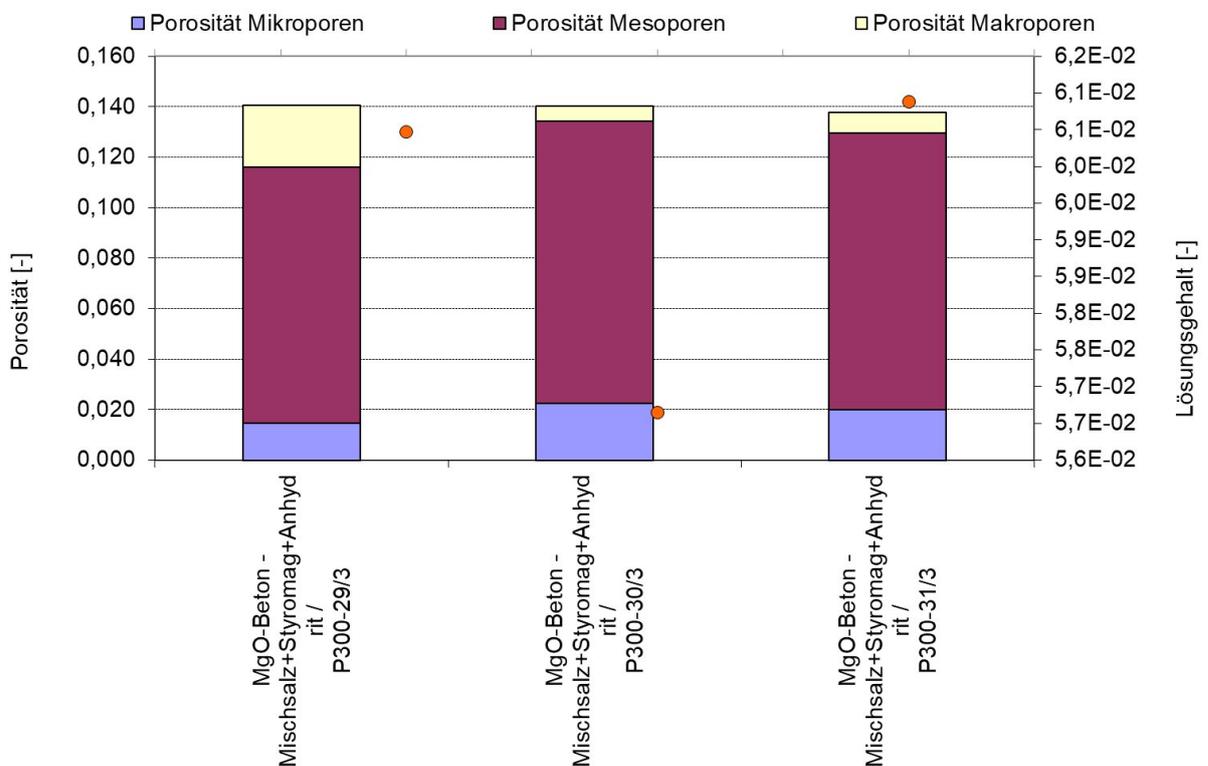


Abbildung 98: An Baustoffproben (modifizierte A1-Rezeptur) ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen; die Punkte markieren die Lösungsättigung

Tabelle 22: Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Baustoffproben modifizierte A1- Rezeptur

Probe	Lösungs- gehalt [60 °C]	minimaler Porenradius ($p_{max}=413$ MPa)	maxi- maler Poren- radius	n Mikro- poren	n Mesopore n	n Makro- poren	n Hg- injizierbar
	[-]	[nm]	[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]
P300-29/3	0,060	4	43750	0,015	0,102	0,025	0,141
P300-30/3	0,057	4	1700	0,022	0,112	0,006	0,140
P300-31/3	0,061	4	1650	0,020	0,109	0,008	0,138

Ziel der Untersuchungen war, die Porengrößenverteilung des MgO-Betons und die mit Quecksilber injizierbare Porosität sowie den Einfluss der unterschiedlichen Rezepturen (A1-Basisrezeptur und die im Bauwerk eingesetzte modifizierte A1- Rezeptur) auf die Porengrößenverteilung zu ermitteln. Auch wenn aufgrund der unterschiedlichen Messbereiche der Porosimeter der Vergleich schwierig ist, ist jedoch zu erkennen, dass der steile Anstieg im Porenbereich der modifizierten A1-Rezeptur dem Mesoporenbereich zuzuordnen ist, während die A1-Basisrezeptur im Mikroporenbereich liegt. Dieses Ergebnis ist im Zusammenhang mit den gemessenen effektiven Gaspermeabilitäten plausibel (Kapitel 8.5).

9.2 Kapillardruck und Sättigung

Die Porengrößenverteilung und die daraus resultierenden Kapillarkräfte bzw. der Kapillardruck bestimmen die Strömungs- und Stofftransportprozesse im ungesättigten Porenraum. Dies gilt sowohl für die Gleichgewichtseinstellung zur Atmosphäre (Schwerpunkte Trocknung, Aufnahme von Wasser aus der Grubenatmosphäre, effektive Gaspermeabilität) als auch für das Fortschreiten einer Flüssigkeitsfront/Sättigungsfront bei der Druckbeaufschlagung mit Flüssigkeit. Daher kommt der Porengrößenverteilung bzw. der Kapillardruck-Sättigungsfunktion neben den effektiven Phasenpermeabilitäten eine bestimmende Bedeutung für alle Mehrphasenströmungsprozesse in dem Steinsalz und Baustoff zu. Es ist davon auszugehen, dass diese Prozesse über die Standzeit unter Grubenatmosphäre und bei einem Kontakt zu Flüssigkeit für das Materialverhalten bestimmend sind.

Auf der Basis des im Versuchsverlauf der MIP ermittelten Zusammenhanges von Quecksilbervolumen und Druck erfolgte, auf der Grundlage der Benetzungseigenschaften der Phasensysteme Quecksilber/Luft und Salzlösung/Luft⁸, die Berechnung der Kapillardruck-Sättigungsfunktion für das Phasensystem Salzlösung/Luft. Die Ausführungen dazu sind in Anlage 6.2.5 enthalten.

Für die untersuchten Baustoffproben - beispielweise Mischsalz+Styromag+Anhydrit - wurde für die Trocknung bei 45 °C eine Sättigung von $0,370 \pm 0,072$ (0,215-0,584; N= 49) berechnet. Bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C liegt die Sättigung bei $0,400 \pm 0,030$ (0,345-0,478; N=17). Es ist davon auszugehen, dass der Porenraum (totale Porosität $0,150 \pm 0,020$ (0,103-0,190; N= 49; Trocknung bei 45 °C) zu einem Anteil von ca. 0,40 mit Flüssigkeit erfüllt ist. Aufgrund der Porengrößenverteilung und der Kapillardruck-Sättigungsfunktionen (Anlage 6.2.5) ist davon auszugehen, dass diese Flüssigkeit maßgeblich in den Poren mit hohen Kapillardrücken also dem Mikroporenraum gespeichert ist. Wird im weiteren Abbindeverlauf

⁸ Für die Darstellung wurde die Grenzflächenspannung von Wasser (70,6 mN/m, 40°C) verwendet. Erfahrungsgemäß weicht die Grenzflächenspannung von Wasser geringfügig von der Grenzflächenspannung für hoch mineralisierte Salzlösungen ab. Die dadurch entstehende Unschärfe wird akzeptiert.

auch diese Salzlösung durch die fortschreitende Kristallisation der Bindemittelmatrix verbraucht, entsteht theoretisch ständig ein höherer Kapillardruck. Die Höhe des Kapillardruckes an der Phasengrenze Salzlösung/Porengas kann entsprechend der Kapillardruck-Sättigungsfunktionen in Abbildung 101 bei minimalen Restsättigungen die Größenordnungen von einigen MPa erreichen.

Für diese Druckbedingungen ist in Abhängigkeit von der Luftfeuchte im Porengas, von einem Flüssigkeitstransport aus dem Porengas in den Feststoff bzw. an die Feststoffoberfläche auszugehen. Dies führt zu einer zusätzlichen Feuchtigkeitsaufnahme für den Feststoff. Die Höhe der Luftfeuchte im Porengas wird von der Luftfeuchte der umgebenden Grubenatmosphäre und den Transportprozessen für die Feuchte in der Gasphase im Baustoff unter den thermodynamischen Bedingungen am Standort bestimmt. In Abhängigkeit von diesen Prozessen wird es zu einem Flüssigkeitstransport in der Gasphase und zu einer Aufnahme von Flüssigkeit durch die Bindemittelmatrix kommen. Bei einer langen Standzeit des Bauwerkes unter den Bedingungen der Grubenatmosphäre bestimmen diese Prozesse das langfristige Materialverhalten.

Bezüglich des möglichen Massenstromes an Feuchtigkeit, der Folgen für den vermutlich maßgeblich diffusiven Flüssigkeitstransport und die Auswirkungen für den Baustoff liegen bisher keine Kenntnisse vor. Eine Prognose/Bilanzierung dieses Transportprozesses von Feuchtigkeit und die Beurteilung der Auswirkungen auf den Fortgang des Abbindeprozesses bzw. das Verhalten des Baustoffes im Kontakt zu den Komponenten der Grubenatmosphäre setzt eine Prozessanalyse zu den bestimmenden physikalischen Vorgängen unter Berücksichtigung der thermodynamischen Randbedingungen voraus.

Grundlage dafür bilden die vorliegenden Porengrößenverteilungen und die daraus abgeleiteten Kapillardruck-Sättigungsfunktionen. Für die Prognose der Prozesse ist auf der Grundlage dieser Materialkenntnisse die gekoppelte Simulation der Strömungs- und Stofftransportprozesses unter Berücksichtigung der thermodynamischen Bedingungen erforderlich. Im Ergebnis wäre die quantitative Beurteilung des Flüssigkeitstransportes über große Zeiträume möglich. Das Prozessverständnis zum Transport von Wasser aus der Grubenatmosphäre in den Baustoff und die sich langfristig einstellende Porenraumsättigung bilden die Grundlage für die Beurteilung der daraus resultierenden Wechselwirkungen mit der Grubenatmosphäre und den Auswirkungen auf dem Baustoff.

Auf der Grundlage der zum Bauwerk vorliegenden Kenntnisse bestehen am Standort gute Voraussetzungen für eine gezielte Untersuchung der beschriebenen Prozesse sowie die Gewinnung von beschreibenden Prozessparametern als Voraussetzung für die strömungstechnisch-geochemisch gekoppelte Simulation, Modellkalibrierung und Prognose des Materialverhaltens.

9.2.1 Kapillardruck in Abhängigkeit der Sättigung - Steinsalz

Für die am Steinsalz ermittelten Sättigungen $0,027 \pm 0,026$ (0,006-0,084; N=11) (siehe Tabelle 19) ergeben sich Kapillardrücke von ca. >50 MPa. Die Spannweite der ermittelten Sättigungen für die Trocknung bei 60 °C ist in folgender Abbildung 99 durch die roten Linien gekennzeichnet.

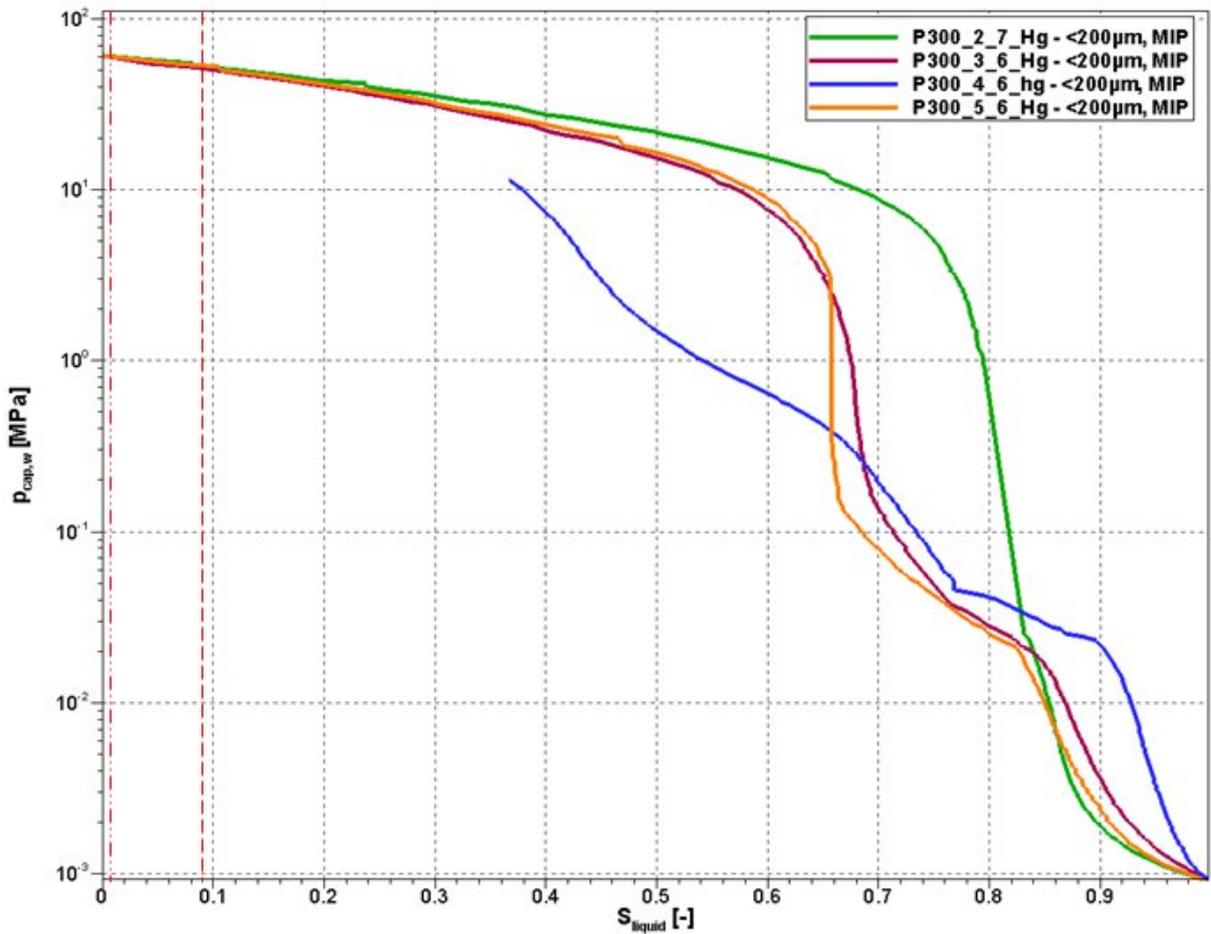


Abbildung 99: Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung für Steinsalz

9.2.2 Kapillardruck in Abhängigkeit der Sättigung –A1-Basisrezeptur

Die Spannweite der am Baustoff der A1-Basisrezeptur ermittelten Sättigungen $0,413 \pm 0,047$ (0,360-0,476; N= 8) für die Trocknung bei 60 °C (sieheTabelle 19) ist in folgender Abbildung 100 durch die roten Linien gekennzeichnet. Die Kapillardrücke für diese Sättigungsbedingungen im Baustoff liegen bei <5 MPa.

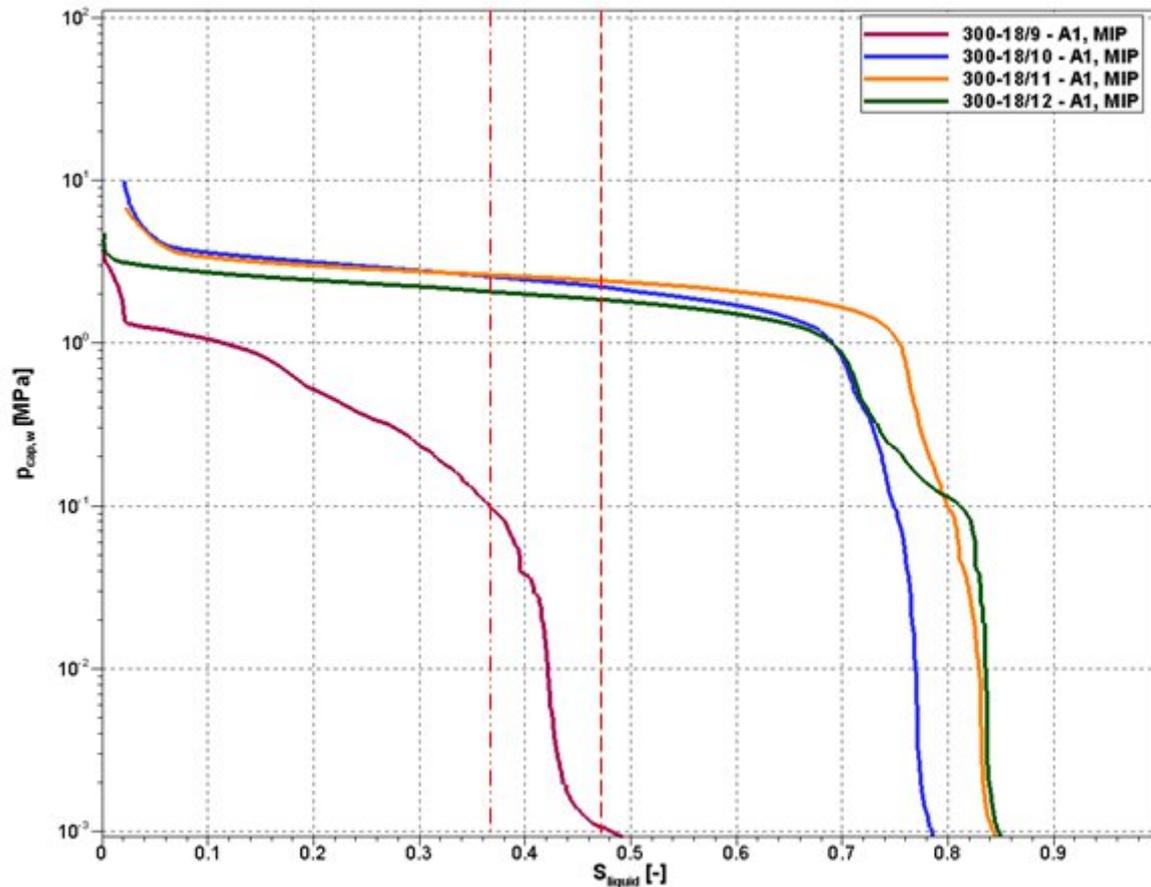


Abbildung 100: Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung für den MgO Baustoff der A1-Basisrezeptur

9.2.3 Kapillardruck in Abhängigkeit der Sättigung - A1-modifizierte Rezeptur

Die Spannweite der ermittelten Sättigungen von $0,400 \pm 0,030$ (0,345-0,478; N=17), für die Trocknung bei 60 °C (siehe Tabelle 19) ist in folgender Abbildung 101 durch die roten Linien gekennzeichnet. Die Kapillardrücke für diese Sättigungsbedingungen liegen bei < 2 MPa

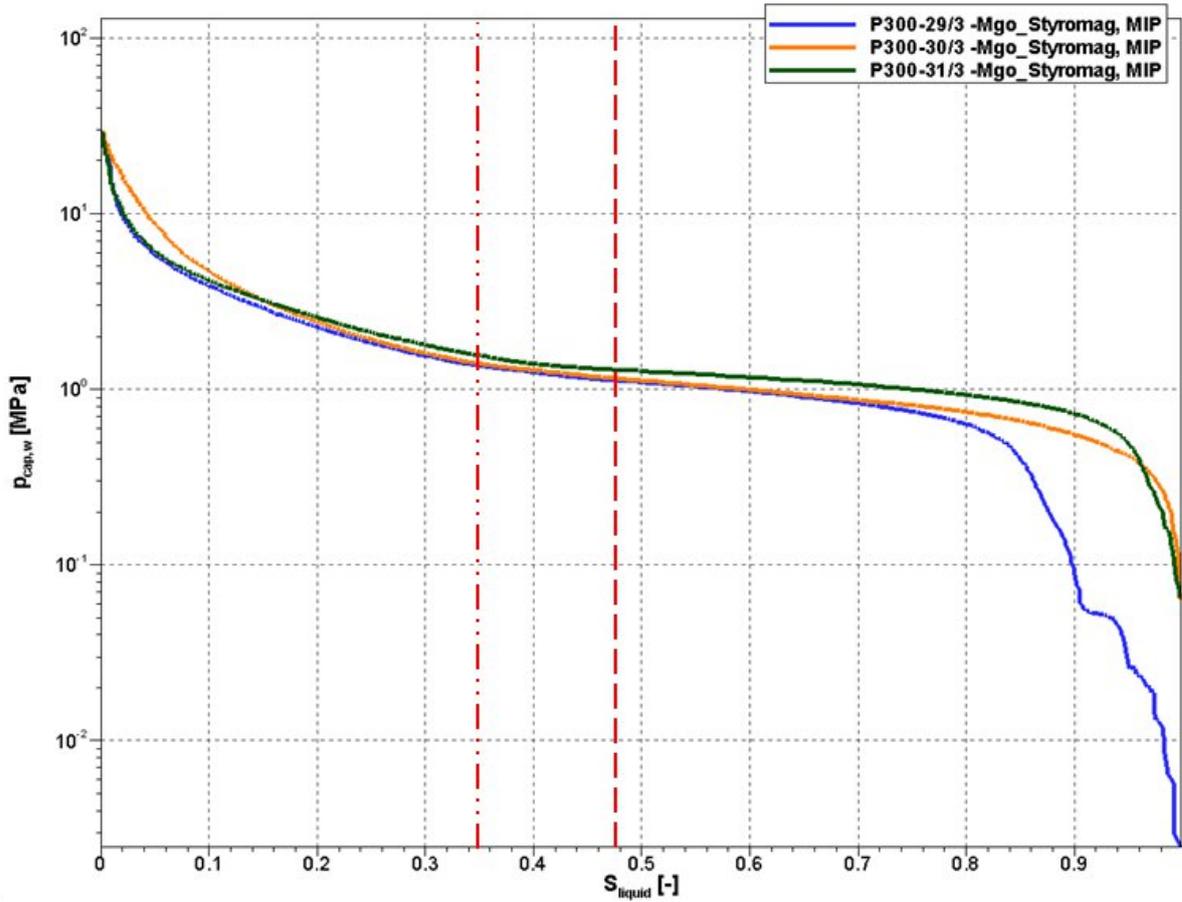


Abbildung 101: Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung für den MgO Baustoff A1-modifizierte Rezeptur

10 Verzeichnisse

10.1 Quellen/Literatur

- [1] Weber, J.; Wilsnack, Th.; Langefeld, O.; et al. (2016): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung. Phase I (Konzeption von Funktionsnachweis und Abdichtungsmethoden, Testung und Auswahl von Behandlungsfluiden (FKZ 02E11253).
- [2] BMUV (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndLSiAnfV), Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I Seite 2094).
- [3] Engelhardt, H.- J. (2009): Sorelbeton A1. Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften. Hg. v. DBE Tec (unveröffentlicht).
- [4] Heydorn, M.; Teichmann, L.; Meyer, T. (2016): Schachtanlage Asse II, Anwendungsversuch Pilotströmungsbarriere PSB A1, Bergbau 4, S. 165-171.
- [5] Penndorf, H. (2019): Streckenübersicht im Staßfurth Steinsalz in Teutschenthal. Glückauf-Vermessung.
- [6] Wenkel, S; Bauermeister, J; Langefeld, O (2018): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches. Phase II: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel. Förderkennzeichen: 02E11597. Clausthal- Zellerfeld.
- [7] Freyer, D. (2011): Sorel cement as geotechnical barrier in salt formations, Proc. 2nd International workshop on Actinide Brine Chemistry in a Salt-Based Repository, 7th-8th November 2011, Karlsruhe.
- [8] Freyer, D.; Gruner, M.; Popp, T.; Salzer, K.; Rölke, C. (2019): MgO shotcrete for engineered barrier systems in salt formations - in situ tests with inflow of MgCl₂ bearing solution (R&D project MgO-SEAL) 10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, & Operation, Rapid City, SD, USA, May 28-30.
- [9] Mauke, R., Stahlmann, J., Mohlfeld, M. (2012): In situ-Verification of a Drift Seal System in Rock Salt - Operating Experience and Preliminary Results. 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt – SaltMech7, Paris, France.
- [10] Engelhardt, H.-J. (2019): Properties of magnesia binder systems and their use in salt mines, 39th Cement and Concrete Science Conference, 9-10th September 2019, University of Bath.
- [11] MAPEI Austria GmbH (2011): Datenblatt Epojet LV. Technische Daten. Hg. v. MAPEI.
- [12] Kamlot, P.; Weise, D.; Gärtner, G.; Teichmann, L. (2012): Drift sealing elements in the Asse II mine as a component of the emergency concept – assessment of the hydro-mechanical functionality, Proc. 7th Conf Mech. Behavior Salt, - Saltmech VII, Paris, France, April 16-19.
- [13] Meyer, T.; Müller-Hoeppe, N.; v. Borstel, L.E.; Engelhardt, H.-J.; Carstensen, A.; Teichmann, L.; Heydorn, M.; Tresper, M. (2019): Modifying magnesia cement for preparing geotechnical constructions and injection grout, 10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, & Operation, Rapid City, SD, USA, May 28-30.
- [14] Heydorn, M.; Adelt, J.; Müller-Hoeppe, N.; Hofschlag, A., v. Borstel, L.E.; Meyer, T. (2018): Industrial Planning of Drift Seals in the Asse Mine, 9th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, & Operation, Hannover, Germany, September 10-11.
- [15] Müller-Hoeppe, N.; Engelhardt, H.-J. (2019): Tischvorlage. STROEFUN. BGE TECHNOLOGY, Peine (unveröffentlicht).
- [16] TU-BA-Freiberg (2017): Stellungnahme zum möglichen Einfluss von Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung eines Ausgangsstoffes bei der Herstellung auf die Baustoffeigenschaften von Sorelbeton A1. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie (unveröffentlicht).
- [17] Kudla, W.; Herold, P.: Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA - Phase 2) (2021): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen, Zusammenfassender Abschlussbericht, TUBAF, Freiberg.
- [18] Würth (2023): Außenputzgewebe. Hg. v. Adolf Würth GmbH & Co. KG. Künzelsau. Online verfügbar unter <https://eshop.wuerth.de/Aussenputzgewebe-GWB-AUSSENPUTZ-145G-10X10-BLAU-100M/0519530020.sku/de/DE/EUR/>, zuletzt aktualisiert am 24.12.2022, abgerufen am 26.01.2023.

- [19] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (1970): Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter, Beton 20, H. 12, Fassung Dezember, Seite 545/549, Düsseldorf.
- [20] Kursave, C (2021): Qualitätssicherung Sorelbeton A1. Laborversuche des Sorelbetons A1 mit Zugabe von Anhydrit + MgO Styromag 1 und 2 v. 16.06.2021. K-UTEC. Sondershausen (unveröffentlicht).
- [21] Onken, P.; Rostásy, F. S. (1995): Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 449.
- [22] Engelhardt, H.-J.; Kreienmeyer, M.; Lerch, C.; Müller-Hoeppe, N.; Köster, R.; Eilers, G.; Preuss, J. (2003): A Constitutive Law of Salt Concrete used for Closure of an LILW-Repository, Proceedings of ICEM '03: 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Oxford, 2003.
- [23] Engelhardt, H.-J. (2011): Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und thermische Längenänderung von Steinsalz, DBE TECHNOLOGY GmbH (BGETEC), Peine (unveröffentlicht).
- [24] BGR (1998): Untertägige Temperaturmessungen im Rahmen der geowissenschaftlichen Standorterkundung des Endlagers für radioaktive Abfälle in Morsleben, AP 9M2123311100, Archiv-Nr. 116704, Hannover.
- [25] DBE-TECHNOLOGY GmbH (2010): Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften (Arbeitsbericht), Peine, Dok.-ID. 11504376, ULV-Nr.: 480097 (unveröffentlicht).
- [26] Kudla, W.; Arendt, J.; Grafe, F.; Gruner, M.; Müller, B.; Popp, T.; Wilsnack, T. (2020): MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl₂-Lösung ("MgO-SEAL"), Abschlussbericht, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau.
- [27] Cosenza, Ph.; Ghoreychi, M.; Bazargansabet, B. (1997): Mesure de la perméabilité in situ du sel/In situ permeability measurement in salt. Revue Francaise de Geotechnique, Nr. 79.
- [28] Häfner, F.; Belohlavek, K.-U.; Förster, S.; Pohl, A.; Behr, A. (2001): In situ Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge. Abschlussbericht 2001, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau.
- [29] Häfner, F.; Förster, S.; Pohl, A.; Behr, A. (1998): Dichtheitsuntersuchungen der Ortsbrust EU, 1. Teilbericht zum BMBF- und TMLNU-geförderten Vorhaben, Förderkennzeichen 02 C 0527 6, In situ-Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge, April 1998.
- [30] Stormont, J.C. (1997a): Conduct and interpretation of gas permeability measurements in rock salt. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34, No 3-4, paper No. 303.
- [31] Stormont, J.C. (1997b): In Situ Gas Permeability Measurements to Delineate Damage in Rock Salt. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 7.
- [32] Pusch, G.; Alkan, H.; Cinar, Y. (2002): Mechanische und Hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des Gebirges in Verbindung mit der Planung von Verschlussbauwerken im Salinar, Teil B. Hydraulische Modellbildung, Abschlussbericht, ITE – Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, Technische Universität Clausthal.
- [33] Müller-Hoeppe, N.; Schmidt, H.; Polster, M. (2014): Construction Engineering: concept to describe the permeability of the excavation damaged zone as a function of pressure, Z. Dt. Ges. Geowiss. 165 (1), Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 107-114.
- [34] Carneiro, F L; Barcellos, A (1953): Tensile strength of concrete. RILEM Bulletin. Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Paris.
- [35] Luckner, L.; Schestakow, W.M. (1986): Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.
- [36] Sachs, L. (1973): Angewandte Statistik, Planung und Auswertung, Methoden und Modelle. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 5. Aufl., ISBN 0-387-6443-5.
- [37] Philipp, N. (2006): Einführung in die Probleme des Physikalischen Praktikums. Fachhochschule Lausitz Senftenberg, Einführungsheft, 6. Auflage.
- [38] DIN 66133 (1993): "Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion", Juni 1993.
- [39] Herold G. (1999): Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineralsauren Wässern, Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe Heft 36, Universität Karlsruhe, Dissertation.

- [40] Klopfer, H. (1974): Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen Wiesbaden.
- [41] Liesgang D. (1991): Zur Korrosionssicherheit des einbetonierten Bewehrungsstahls in Abhängigkeit von der Permeabilität des Betons; Dissertation.
- [42] Sosoro, M. (1995): Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, 3-410-65.
- [43] Eberhardt W. (1995): Zusammenhänge zwischen Struktur und Dichtheit von Beton, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Dissertation.
- [44] Arifin, Y. F. (2008): Thermo-Hydro-Mechanical Behavior of Compacted Bentonite-Sand Mixtures: An Experimental Study. Dissertation. Bauhaus-University Weimar.

10.2 Abkürzungen

ALZ	Auflockerungszone
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
CAD	Computer Aided Design
CSH	Calcium-Silikat-Hydrat
CT	Computertomografie
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
DXF	Datenformat
FLAC3D	Fast Lagrangian Analysis Code in 3 Dimensions
Hg	Quecksilber
HT	Hochtemperatur (Hochtemperaturrohr – HT-Rohr)
KG	Kanalgrund- (Kanalgrundrohr – KG-Rohr)
MFBBa	Kurzbezeichnung für Injektionsmörtel MFBBa-17/3/30 auf MgO-Basis
MgO	Magnesiumoxid
MIP	Mercury intrusion porosimetry
mUS	mit Ultraschall
NBR	Nitrile Butadiene Rubber
NE	Nordosten
NW	Nordwesten
OBJ	Datenformat
oUS	ohne Ultraschall
PP-R	Polypropylen-Random-Copolymerisat
R _a	Rauheit
SE	Südosten
SW	Südwesten
TU-C	TU-Clausthal
WUM	wasserunlösliche Minerale

10.3 Formelzeichen, Variablen und Indizes

D	Schergefälle	[s ⁻¹]
η	dynamische Viskosität	[Pas]
ρ	Dichte	[g/cm ³]
C	Bindemittelgehalt	[-]
Q	Wärmemenge	[J]
C_p	massespezifische Wärmekapazität	[J/(kg K)]
E_A	Aktivierungsenergie des Bindemittelsystems	[J/mol]
T_{Ref}	Bezugstemperatur $T_{Ref} = 293,15$ K	[K]
A	Frequenzfaktor oder „Stoßzahl“	[-]
R	Universelle Gaskonstante $R = 8,31443$ J/(mol·K)	[J/(mol·K)]
T	absolute Temperatur	[K]
k	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	[mol/(l s)]
α	Hydratationsgrad	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]
d	Probendurchmesser	[mm]
l	Probenlänge	[mm]
F	Axialkraft	[kN]
σ	Spaltzugfestigkeit	[MPa]
$k_{Ph, abs}$	absolute Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
$k_{Ph, eff}$	effektive Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
$k_{Ph, rel}$	relative Permeabilität der Fluidphase	[-]
C_C	Gesamtkonzentration gelöste Komponenten	[g/L]
$m_{F, korr}$	Masse Feststoff, trocken, korrigiert	[g]
$m_{F, f}$	Masse Feststoff, feucht	[g]
$m_{F, tr}$	Masse Feststoff, trocken	[g]
m_L	Masse Lösung	[g]
m_W	Masse Wasser	[g]
N	Anzahl Messpunkte	[-]
n_t	totale Porosität	[-]
p_A	Ausgangsdruck	[Pa]
p_{cap}	Kapillardruck	[Pa]
p_E	Eingangsdruck	[Pa]
p_F	Fluiddruck	[Pa]
$p_{i, B}$	Druck berechnet	[Pa]
$p_{i, M}$	Druck gemessen	[Pa]
p_M	Manteldruck	[Pa]
r	Porenradius	[m]
S	Sättigung des Porenraumes	[-]
S_G	Gassättigung	[-]
$S_{G, R}$	Restgassättigung	[-]
S_L	Lösungssättigung	[-]
$S_{L, R}$	Restlösungssättigung	[-]
w_L	Lösungsgehalt	[-]
X	Wertebereich S_{Ph} ($0 \leq X \leq 1$)	[-]
y	$f(x_1 \dots x_k)$	[-]
δ	Kontaktwinkel (● _{Hg-Luft} (25 °C) = 140°)	[°]
ρ_d	Trockendichte	[g/cm ³]
ρ_L	Dichte Lösung	[g/L]
ρ_s	Reindichte	[g/cm ³]
■	Fehler der x-Werte	[-]

10.4 Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung Vertikalschnitt durch Dichtsegment mit Details zur Kontaktzone Baustoff/ Gebirge [1].....	4
Abbildung 2: Übersicht über die Auffahrungen am Standort des Versuchsbauwerkes [5].....	8
Abbildung 3: Realisiertes Testkonzept und seine Umsetzung in situ.....	10
Abbildung 4: Positionierung des Halbdamms in der Versuchsstrecke (links) / Blick in Richtung Ortsbrust überlagert mit Dreiecksvermaschung (rechts).....	11
Abbildung 5: Virtuelles CAD-Standortmodell mit Bohrungen und OFP-Messstellen (siehe Legende). Objekt Nr. 7 und Nr. 9 sind verdeckt und daher nicht sichtbar.....	12
Abbildung 6: Gewebeschlauch mit innenliegendem Packerschlauch	13
Abbildung 7: Prototyp des Anschlussstücks mit installiertem Packerschlauch (der Gewebeschlauch ist zur Ansicht zurückgezogen).....	14
Abbildung 8: Prototyp des Anschlussstücks mit expandiertem Packerschlauch / Gewebeschlauch.....	14
Abbildung 9: Anschlussstück im Zustand des gesetzten Packerschlauchs (Schnittdarstellung)	15
Abbildung 10: Anschlussstück im Zustand des Übergangs vom Entlasten des Packers zur Beaufschlagung des Gewebeschlauchs (Testung).....	15
Abbildung 11: Anschlussstück im Zustand des Testvorganges.....	16
Abbildung 12: Aufbau des Vorversuchs (Zustand vor der Betonage der oberen Betonplatte).....	17
Abbildung 13: Anschlusselement der Schlauchkammer mit den Anschlüssen für den Packerschlauch (S) und für den Gewebemantel (M).....	18
Abbildung 14: Verlauf des Prüfdrucks und der Temperatur während der Testung der Gasdichtheit	20
Abbildung 15: Rohrdummy	21
Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Testung des Kunststoffrohres bis 2,5 MPa.....	21
Abbildung 17: In der Bohrung B01-030 mittig positioniertes Rohr.....	21
Abbildung 18: Verfüllte Bohrung B01-030 mit Kunststoffrohr und Baustoff.....	22
Abbildung 19: Gasdrucktest Kunststoffrohr in Bohrung B01-030.....	22
Abbildung 20: getestete Rohrinstallationen	23
Abbildung 21: Kunststoffrohre in Bohrung.....	23
Abbildung 22: B06-030 Prüfrohr links (unbehandelt).....	24
Abbildung 23: B06-030 Prüfrohr rechts (unbehandelt).....	24
Abbildung 24: B07-040 Prüfrohr links (geschliffen).....	24
Abbildung 25: B07-040 Prüfrohr rechts (geschliffen).....	24
Abbildung 26: B08-050 Prüfrohr links (geschliffen und Scheiben).....	25
Abbildung 27: B08-050 Prüfrohr rechts (geschliffen und Scheiben).....	25
Abbildung 28: Kunststoffreste in Bohrung	26
Abbildung 29: Bohrkronen mit Führungsdorn.....	28
Abbildung 30: Typischer Endlosspann des Kunststoffrohres	28
Abbildung 31: Ergebnis des Ausbohrens ohne eine zentrierte Führung der Bohrkronen	29
Abbildung 32: Ergebnis des Ausbohrens mit einer zentrierten Führung der Bohrkronen	29
Abbildung 33: Injektionsinstallation im ERA Morsleben [9].....	31
Abbildung 34: Injektionsschlauch Predimax (zur Ansicht wurde der Außenschlauch teilweise entfernt) [9].....	31
Abbildung 35: Verteilungsdichte/Verteilungssumme der Partikelgröße zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Anmischen der angerührten Styromag-Suspension....	33
Abbildung 36: Fließkurven der Styromag-MgO-Suspension unmittelbar nach der Herstellung	34

Abbildung 37: MFBBa – Partikelgrößenverteilung der Trockenmischung.....	35
Abbildung 38: Dichteverteilung der Partikelgrößen der Suspension mit und ohne Ultraschalldispersion.....	36
Abbildung 39: Kumulierte Partikelgrößenverteilung der Suspension mit und ohne Ultraschalldispersion.....	36
Abbildung 40: Fließkurven Injektionsmörtel MFBBa, Probe P300-37, in Abhängigkeit von der Abbindedauer.....	37
Abbildung 41: Fließkurven Injektionsmörtel MFBBa, Probe P300-38, in Abhängigkeit von der Abbindedauer.....	37
Abbildung 42: Regression der Fließkurven der MFBBa-Suspension unmittelbar nach der Herstellung.....	38
Abbildung 43: Vergleichende Darstellung der Fließkurven des Injektionsbaustoff auf der Basis von Styromag-MgO und des Injektionsbaustoffs MFBBa nach einer Abbindedauer von 1 Stunde.....	38
Abbildung 44: Summe Linien der Partikelgrößenverteilung der Injektionsbaustoffe Styromag-MgO und MFBBa (blau) und der Porengrößenverteilung der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge (rot) in Abhängigkeit vom Durchmesser.....	40
Abbildung 45: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Permeabilität und dem Injektionsdruck für einen mittleren Porendurchmesser von 830 µm und die Fließkurven von MFBBa (unmittelbar nach Herstellung).....	42
Abbildung 46: Links vor Injektion / rechts nach Injektion.....	43
Abbildung 47: Beprobung einer Bandanlage am 21.01.2020.....	48
Abbildung 48: Korngrößenverteilung bei einem Anteil von 37 % Band 6, 45 % Band 8 und 18 % Feinsalz.....	49
Abbildung 49: Übersicht über die eingesetzte Mischtechnik.....	51
Abbildung 50: Befüllung des Zwangsmischers Filamos m 750 H mit Steinsalz.....	51
Abbildung 51: Bildung einer Überstandslösung in Testbox 1.....	52
Abbildung 52: Überstandslösung auf einem Probekörper nach einem Tag.....	52
Abbildung 53: Bohrkern aus der Betonierfuge der Testbox 1.....	53
Abbildung 54: Oberfläche der Testbox 1.....	54
Abbildung 55: Oberfläche der Testbox 2.....	54
Abbildung 56: Quasiadiabatisches Kalorimeter im untertägigen Einsatz.....	55
Abbildung 57: Quasiadiabatischer Temperaturverlauf des verwendeten MgO Normag Calvörde.....	55
Abbildung 58: Schematische Darstellung der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen.....	56
Abbildung 59: Linke Mischung: Sorelbeton ohne Anhydritmehl, rechte Mischung: mit Anhydritmehl (8% zusätzlich) [20].....	58
Abbildung 60: Linke Mischung: Sorelbeton mit Anhydritmehl (8% zusätzlich), rechte Mischung: Sorelbeton ohne Anhydritmehl [20].....	58
Abbildung 61: Aufzeichnungen der Temperaturverläufe von verschiedenen quasiadiabatischen Versuchen.....	59
Abbildung 62: Geometrische Abmessungen des numerischen Modells des Standortes (um eine bessere Darstellung zu erhalten, wurde die Geometrie hier grob vernetzt).....	61
Abbildung 63: Geometrie und Querschnittsform der Stummelstrecke erfasst durch Scannermessung in a), b) und abgebildet im Simulationsmodell in c), d).....	62
Abbildung 64: Streckenquerschnitt mit Darstellung der Lage der Temperatursensoren.....	63
Abbildung 65: Diskretisierung der Betonierabschnitte in den Simulationen basierend auf dem zeitlichen Verlauf des Verfüllprozesses während der Betonage.....	66
Abbildung 66: Gegenüberstellung der Messungen und der Prognoseberechnungen an den Temperatursensoren T03, T04 und T05 simuliert mit dem Parametersatz des Sorelbeton A1.....	66

Abbildung 67: Gemessener und berechneter Verlauf der adiabatischen Temperaturentwicklung in Abhängigkeit der Zeit.....	67
Abbildung 68: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe an den Sensoren T03, T04 und T05, am Kern des Baustoffes	67
Abbildung 69: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am T03, Sohle.	68
Abbildung 70: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am T06, Stoß..	68
Abbildung 71: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am T08, Firste.	68
Abbildung 72: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe am Sensor T07.	69
Abbildung 73: Lage der Bohrungen im Sohlbereich (Durchmesser 300 mm).....	72
Abbildung 74: An Laborkompositproben ermittelte effektive Gaspermeabilität [m ²].....	73
Abbildung 75: Probe P300-24/1 – Zeitverlauf ausgewählter Druckabfälle	74
Abbildung 76: An in situ-Kompositproben der 300 mm Bohrung ermittelte effektive Gaspermeabilität [m ²].....	75
Abbildung 77: An in situ-Kompositproben aus der Sohle des Halbdammes ermittelte effektive Gaspermeabilität [m ²], links (L), Mitte (M) und rechts (R)	76
Abbildung 78: P300-47 Bereich linke Sohle - rauh.....	76
Abbildung 79: P300-46 Bereich Mitte Sohle – mäßig bearbeitet.....	77
Abbildung 80: P300-48 Bereich rechte Sohle - geschliffen	77
Abbildung 81: Beispiel für die Anbindung im Kontakt MgO-Baustoff/Steinsalzgebirge, links: augenscheinlich gute Anbindung, Mitte: sichtbare Wegsamkeiten und unzureichende Anbindung, , rechts: Darstellung des Porenraumes im Kontakt im Ergebnis einer CT-Aufnahme (HZDR, Herr Dr. J. Kulenkampff, 25.08.2022)	78
Abbildung 82: An den A1-Rezepturen und Steinsalz ermittelte effektive Gaspermeabilität....	80
Abbildung 83: Am Baustoff und Steinsalz ermittelter Lösungsgehalt für unterschiedliche Trocknungstemperaturen.....	81
Abbildung 84: Am Baustoff und Steinsalz ermittelte Reindichte für unterschiedliche Trocknungstemperaturen.....	82
Abbildung 85 Am Baustoff und Steinsalz ermittelte Trockendichte.....	83
Abbildung 86: Aus den Dichten berechnete totale Porosität für Baustoff und Steinsalz.....	84
Abbildung 87: Aus dem Lösungsgehalt und der totalen Porosität berechnete Sättigung für Baustoff und Steinsalz.....	85
Abbildung 88: Zusammenstellung der ermittelten effektiven Gaspermeabilitätswerte an Probekörpern aus Steinsalz, der Sorelbeton A1-Basisrezeptur und der modifizierten A1-Rezeptur sowie an im Labor hergestellten und in situ gewonnenen Kompositproben.....	88
Abbildung 89: Vergleichende Gegenüberstellung der effektiven Gaspermeabilitäten der in situ-Kompositproben und der Ergebnisse der Testauswertung für die Kontaktzone Sohle.....	89
Abbildung 90: An 4 Steinsalzproben mit MIP ermittelter Porenvolumenanteil in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und vergleichend unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne den Porenvolumenanteil der Poren >200 µm	93
Abbildung 91: An Steinsalzproben mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne Poren >200 µm.....	94
Abbildung 92: An Steinsalzproben ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen; die Punkte markieren die Lösungssättigung.....	95
Abbildung 93: An Steinsalzproben bestimmte Porositäten durch MIP (Poren >200 µm vernachlässigt), CT und rechnerisch ermittelte totale Porosität.....	96
Abbildung 94: Am Baustoff der A1-Basisrezeptur mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser.....	98
Abbildung 95: An Baustoffproben der A1-Basisrezeptur ermittelte Porosität mit Einordnung in	

Porenklassen; die Punkte markieren die Lösungssättigung.....	99
Abbildung 96: Porositäten Baustoffprüfkörper aus MIP, CT und Dichten.....	100
Abbildung 97: Am Baustoff des Bauwerkes mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser.....	101
Abbildung 98: An Baustoffproben (modifizierte A1-Rezeptur) ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen; die Punkte markieren die Lösungssättigung ...	101
Abbildung 99: Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung für Steinsalz.....	104
Abbildung 100: Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung für den MgO Baustoff der A1-Basisrezeptur.....	105
Abbildung 101: Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung für den MgO Baustoff A1-modifizierte Rezeptur.....	106
Abbildung 102: Probe P300-15/1 eingespannt, kurz vor Durchführung des Versuches.....	128
Abbildung 103: Ergebnisse der Spaltzugversuche an den vier Proben.....	129
Abbildung 104: Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit aquatischer Salzlösung nach [35].....	131
Abbildung 105: Schematische Übersicht des Versuchsaufbaus.....	132
Abbildung 106: Schematische Darstellung des numerischen Modells.....	133
Abbildung 107: Foto Zweikammerversuchsanlage für Gas.....	133
Abbildung 108: Beispiel für das Ergebnis einer modellgestützten Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien (kein Bezug zu projektbezogenen Auswertungen).....	133
Abbildung 109: Vorgehensweise für die Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen [44].....	140
Abbildung 110 Steinsalzproben P300 für CT und MIP (Bild: IBeWa).....	143
Abbildung 111 Thickness Map zweier sich überlagernder Kugeln mit Durchmessern von 2.0 und 3.6 mm. Unten links daraus mittels Avizo berechnete Durchmesser-Verteilung.....	144
Abbildung 112 Rauheitsvolumen für vier scheinbare Porenradialklassen. Diese Radialklassen entsprechen den Quecksilber-Kapillardrücken p_1 bis p_4 . Die Außengrenze der erste Druckstufe entspricht dem einhüllenden Volumen...	144
Abbildung 113 Bildausschnitt eines CT-Schnittbildes mit rissartigen Poren (P300 5/6). Unterhalb von ca. 30 μm ist keine sichere Segmentierbarkeit gegeben. Einzelne dichte Kristalle sind als weiße Objekte zu erkennen.....	145
Abbildung 114 Zuordnung der Grauwert-Phasen des CT-Bildes (P300 5/6). Die generelle scheinbare Dichteabnahme von rechts nach links ist ein Abbildungsartefakt. Überlagert ist das Volumenrendering der drei segmentierten Phasen „Luft“ (blau), „Lauge“ (grau) und „dichtes Material“ (braun). Es wird ersichtlich, dass die Luftphase immer blasenförmig innerhalb der Laugenphase auftritt, es sich somit um Luftfeinschlüsse in der Lauge handelt.....	146
Abbildung 115 Modalanalyse der Probe P300 2/7 bezüglich Porosität, Halit und dichtem Material.....	147
Abbildung 116 Thickness Map des Rauheitsvolumens zur Abschätzung des Rauheitsanteils nsurf an der MIP-Porosität.....	148
Abbildung 117 Bestimmung der Porenradialverteilung mittels Thickness Map der segmentierten CT-Poren (P300 5/6).....	149
Abbildung 118 Überlagerung der CT-Porosimetrie mit MIP-Daten, links Porenradialverteilung, rechts Summenkurven, Probe P300 5/6. Der Verlauf der Makroporen folgt bis hinunter zu einem Radius von 0.2 mm weitgehend der mittels CT ermittelten scheinbaren Porosität nsurf aufgrund der Rauheit der äußeren Oberfläche. Unterhalb von 0.2 mm bis zur Auflösungsgrenze stimmen dagegen die CT- und MIP-Daten weitgehend überein. Bei dieser Probe wurden mit CT keine Poren mit Radius > 0.2 mm detektiert.....	150
Abbildung 119 Modalbestand der Probe P300 18/12 aus der Watershed-Segmentierung der	

	CT-Aufnahme. Oben links: Volumenrendering (blau: Zement, hellblau: Poren, rot: Körnung), oben rechts: Poren, unten links: Zuschlagkörnung, unten rechts: dichte Bestandteile.....	151
Abbildung 120	Thickness Map der Poren von P300 18/12 zur Bestimmung der Porenradienverteilung.....	152
Abbildung 121	Überlagerung der CT-Porosimetrie mit MIP-Daten, links Porenradienverteilung, rechts Summenkurven, Probe P300 18/12. Der Verlauf der Kurven von MIP and CT-Analyse stimmen weitgehend überein. Auffällig ist der hohe residuelle Quecksilbergehalt, der nach der Dekompression in der Probe verbleibt.....	153
Abbildung 122	CT-Aufnahme des Schaumes mit Darstellung der Thickness Map der Zementmenisken auf einer Schnittfläche.....	154
Abbildung 123	Vergrößerte Darstellung eines zylindrischen Ausschnittes mit einem Durchmesser von 3 mm aus dem Schaum. Die Farbkodierung der CT-Dichte zeigt einzelne dichte Körner mit Durchmesser von ca. 0,1 mm im sonst homogenen Zement.....	154
Abbildung 124	Kontaktzone modifizierte A1-Rezeptur/Salinar - Bestimmung der mittleren Porosität in axialer Richtung als Mittelwert-Projektion der segmentierten Poren längs des Pfeils (Pore: 1,0, Festmaterial: 0,0). Die Bestimmung der mittleren Porengröße erfolgt analog.....	156
Abbildung 125	Laborkomposit P21/1 - Schema des Riss- und Fugenverlaufs.....	156
Abbildung 126	CT-Aufnahmen der Kompositproben vor der Injektion, oben P300 21/1, unten P300 23/1. Rechts ist die Segmentierung der Hohlräume (Poren im Beton, Risse im Wirtsgestein, offene Kontaktfläche) des blau markierten Kontaktbereichs dargestellt. Die unterschiedlichen Farben im unteren Bild stellen unverbundene Volumenelemente dar.....	158
Abbildung 127	Riss- und Fugensystem der Probe P300 21/1, links vor, rechts nach der Injektion. Das Injektionsmittel ist gelb markiert. Unten links: Rissweite, rechts: Dicke der mit Injektionsmittel gefüllten Zone.....	159
Abbildung 128	Oben: Volumenrendering des CT-Bildes in grau mit gefüllten (braun) und offen verbliebenen (blau) Hohlräumen, Mitte: Histogramm der Öffnungsweitenverteilungen (rot: ursprüngliches offenes Volumen, braun: mit Injektionsmittel gefüllter Anteil, blau: offen verbleibender Anteil (als Farbüberlagerung). Unten: Summenkurven der Öffnungsweitenverteilungen (hier gefüllter Anteil in grün).....	160
Abbildung 129	Ausschnitt aus der Kontaktzone aus einem Großbohrkern. Auffällig ist der gute Kontakt zwischen Baustoff und Wirtsgestein, während im Wirtsgestein Risse deutlich zu erkennen sind.....	161
Abbildung 130	Kernscheiben aus dem Steinsalz-Baustoff-Kontakt des Bauwerks. Oben: CT-Schnitte, unten: Darstellung der Fugenweite (Thickness Map) dieser vier Proben.....	163
Abbildung 131	Oben: Fugenweite überlagert mit der Trennflächen-Topographie der Probe M1. Unten: Trennflächenoberfläche (hellblau), überlagert mit luftgefüllter Zone (grünlich) und mit dichterem Material gefüllten Bereichen (orange).....	164
Abbildung 132	Räumliche Verteilung der Porenweiten (oben), sowie Karten der axialen Projektion der mittleren Porengröße (mitte) und der Porosität (unten) für Proben M1 und M2.....	164
Abbildung 133	Räumliche Verteilung der Porenweiten (oben), sowie Karten der axialen Projektion der mittleren Porengröße (mitte) und der Porosität (unten) für Proben M3 und M4.....	165
Abbildung 134	Oben: Aufgliederung der Tomogramme in 5 Zonen (von links nach rechts: "normaler" MgO-Baustoff, poröse Zone, dichte Zone, Fuge, Steinsalz. Der Block der ersten Zone ist rot markiert. Unten: Porositätsprofil längs des Durchmesseres (orange im Bild oben), berechnet als Flächenanteil über transaxiale Schnittebenen.....	166

Abbildung 135 Balkendiagramme der Ergebnisse zu Abbildung 133 Oben Porositäten der 5 Zonen für alle 4 Proben. Darunter Porenradien (Mittelwert und Standardabweichung).....	167
Abbildung 136 Verarbeitungsschritte zur Filterung und Segmentierung des Binärbildes:....	170
Abbildung 137 Probe P300 2/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (blau: Poren, schwarz: Oberfläche).....	171
Abbildung 138 Probe P300 2/7 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit).....	172
Abbildung 139 Probe P300 2/8(Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (blau: Poren, schwarz: Oberfläche).....	173
Abbildung 140 Probe P300 3/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit).....	174
Abbildung 141 Probe P300 4/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit).....	175
Abbildung 142 Probe P300 5/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit).....	176
Abbildung 142 P300 18/9 CT-Bild.....	177
Abbildung 144 P300 18/10 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Bild.....	177
Abbildung 145 P300 18/11 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Bild.....	178
Abbildung 146 P300 18/12 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Bild.....	178
Abbildung 147 P300 18/9 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung	179
Abbildung 148 P300 18/10 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung.....	179
Abbildung 149 P300 18/11 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung.....	179
Abbildung 150 P300 18/12 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung.....	180
Abbildung 151 P300 21/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm vor der Injektion.....	181
Abbildung 152 P300 21/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm nach der Injektion.....	181
Abbildung 153 P300 21/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm nach der Injektion, Wiederholung.....	182
Abbildung 154 P300 23/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm.....	182

10.5 Tabellen

Tabelle 1: Geometrische Daten des Halbdamms (Ist-Werte).....	11
Tabelle 2: Zusammensetzung des Injektionsbaustoffs.....	33
Tabelle 3: Zusammensetzung Injektionsbaustoff MFBBa [10].....	34
Tabelle 4: Ausgangsstoffe der A1-Basisrezeptur [3].....	45
Tabelle 5: Grenzwerte für Bestandteile des MgO.....	45
Tabelle 6: Übersicht der Prüfergebnisse zur Reaktivität der getesteten MgO-Materialproben	46
Tabelle 7: Zulässige Bandbreite der Korngrößenverteilung des Zuschlagstoffes Steinsalz [14]	47
Tabelle 8: Mineralbestandteile des Salzes von den verschiedenen Bändern aus Sondershausen.....	49
Tabelle 9: Zulässige Bandbreite der Magnesiumchloridlösung.....	50
Tabelle 10: Messdaten zur quasiadiabatischen Temperaturerhöhung der A1-Basisrezeptur - Starttemperatur, maximale Messtemperatur und Temperaturerhöhung.....	56
Tabelle 11: A1-Basisrezeptur – Übersicht über die durchschnittlichen Kenngrößen der Qualitätssicherung.....	57
Tabelle 12: Übersicht und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe der modifizierten A1- Rezeptur pro Charge (Mischerfüllung).....	60
Tabelle 13: Verwendete Materialparameter. ϑ Temperatur in °C / T Temperatur in K.....	65
Tabelle 14: Vergleich der gemessenen und simulierten Maximaltemperaturen.....	69
Tabelle 15: Ergebnisübersicht der ermittelten Lösungsgehalte mit Angabe der Trocknungstemperatur.....	81
Tabelle 16: Ergebnisübersicht der ermittelten Reindichten.....	82
Tabelle 17: Ergebnisse der Trockendichteberechnung.....	83
Tabelle 18: Ergebnisse der Porositätsberechnung aus Messwerten der Dichtemessung..	84
Tabelle 19: Ergebnisübersicht der berechneten Sättigung.....	85
Tabelle 20: Auswertung der Porositätsergebnisse verschiedener Verfahren; Quecksilberporosimetrie ohne Poren >200 μm	96
Tabelle 21: Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Baustoffproben der A1-Basisrezeptur.....	99
Tabelle 22: Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Baustoffproben modifizierte A1- Rezeptur.....	102
Tabelle 23: Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 8.....	123
Tabelle 24: Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 6.....	123
Tabelle 25: Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (1).....	123
Tabelle 26: Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (2).....	123
Tabelle 27: Ermittelte Spaltzugfestigkeit der Bohrkernproben.....	128
Tabelle 28: Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe.....	140
Tabelle 29 Aufstellung der integralen CT-Ergebnisse zum Steinsalz. Gesamtvolumen der Proben aus CT V_{tot} , Volumen mit geglätteter äußerer Oberfläche V_{ConvHull} , Volumendifferenz V_{surf} , scheinbare Porosität aufgrund der Oberflächenrauheit n_{surf} , interne Porosität n_{CT} , Anteil dichter Bestandteile Φ_{dense}	146
Tabelle 30 CT-Modalbestand des Baustoffs (A1-Basisrezeptur).....	152
Tabelle 31 Strukturelle Eigenschaften des Schaumes aus der CT-Analyse (modifizierte A1- Rezeptur).....	154
Tabelle 32 Porositäten und mittlere Porengrößen in den fünf unterschiedlichen Zonen der Proben aus dem Kontakt zwischen Bauwerk und Wirtsgestein, außerdem Dicke (D) der dichten MgO-Zone (n.e.= nicht erkennbar).....	162

Anlagen

PREDIMAX® 19 INJEKTIONSSCHLAUCH

Injektionsschlauch, mehrfach- und zementverpressbar

PRODUKTBESCHREIBUNG

Der Predimax® 19 Injektionsschlauch ist ein doppelwandiger, mehrfachverpressbarer Schlauch auf PVC-Basis.

Der Injektionsschlauch selbst besteht aus einem Innenschlauch mit großen Austrittsöffnungen für das Injektionsgut. Ummantelt wird der Kernschlauch von einer Außenhaut. Die Außenhülle ist wiederum mit Schlitzen versehen, die stets versetzt zu den Austrittsöffnungen des Innenschlauchs angeordnet sind. Diese Konstruktion verhindert zuverlässig, dass Feinteile beim Betoniervorgang in den Predimax® Verpressschlauch eindringen können.



ANWENDUNG UND ANWENDUNGSGEBIETE

Unsere seit Jahrzehnten bewährten, hochwertigen Injektionsschlauchsysteme finden vor allem im Hoch-, Tief-, Ing.- und Tunnelbau zur sicheren Abdichtung von horizontalen und vertikalen Arbeitsfugen ihre Anwendung.

Predimax® 19 wird zur Abdichtung von Bauwerksfugen, die ständig oder zeitweise eine Belastung durch Grund-, Hang- und/oder Oberflächenwasser erfahren, verwendet. Die bautechnisch notwendigen Arbeitsfugen können kraftschlüssig und druckwasserdicht ausgebildet werden. Predimax® 19 eignet sich auch ideal zur Hohlraumverfüllung und Hinterpressung (Tunnelbau).

PRODUKTMERKMALE UND VORTEILE

- ✧ Mit allen gängigen Verpressmedien injizierbar, auch mit Standard-Portland-Zement für Tunnel-Firstspaltverpressung
- ✧ Injektionsschlauch durchgängig mit Metermarkierung und Kontrollnummer versehen
- ✧ Doppelwandiger Schlauch auf PVC-Basis. Innen und Aussen-Schlauch mit versetzten Austrittsöffnungen (innen) und Schlitzen (außen)
- ✧ Mehrfach verpressbar (Spülen oder Vakuumieren möglich)
- ✧ Verhinderung des Eindringens von Zementleim beim Betoniervorgang
- ✧ Einfaches Handling
- ✧ Materialaustritt nach allen Seiten gewährleistet
- ✧ Glatte Oberfläche verhindert unerwünschten Verbund zwischen Injektionsschlauch und Beton, daher ist der Predimax® 19 besonders leicht zu verpressen (Injektionsöffnungsdruck ab 0,5 bar)
- ✧ Ausreichender Querschnitt des Transportkanals (verringert die innere Reibung des Injektionsgutes und ermöglicht dadurch wirtschaftliche Verpresslängen) und Durchlässigkeit des Verpresskanals und der Austrittsöffnungen nach dem Betonieren.
- ✧ Robustheit beim Einbau unter Baustellenbedingungen, einschließlich Befestigungssystem
- ✧ Kein unerwünschtes Verdrehen beim Einbau von der Rolle, da runder Schlauch.
- ✧ Gutes Preis/Leistungsverhältnis, maximale Sicherheit



Anlage 2 Technisches Datenblatt des Epojet LV

TECHNISCHE DATEN				
KENN DATEN DES PRODUKTS				
	Komponente A	Komponente B		
Konsistenz:	flüssig	flüssig		
Farbe:	gelblich transparent	gelblich transparent		
Dichte (kg/l):	1,1	1,1		
Viskosität nach Brookfield (mPa·s):	300 (Spindel 2 - 20 Upm)	25 (Spindel 1 - 50 Upm)		
Lagerung:	24 Monate im ungeöffneten Originalgebinde bei Temperaturen von +10 °C bis +30 °C			
Kennzeichnung nach – GGVs/ADR:	UN 3082, 9 III umweltgefährdender ätzend, Stoff, flüssig, n.a.g. Xylylendiamin, (Epoxidharz diamin) 4,4'-Isopropylidendiphenol)	UN 2735, 8 III (LQ möglich) Polyamine, flüssig, n.a.g. (m- 3-Azapentan-1,5- diämin) 4,4'-Isopropylidendiphenol)		
– VbF:	entfällt	entfällt		
– GefStoffV:	reizend, umweltgefährdend			
– GISCODE (A+B):	ätzend (Komp. A enthält epoxidhaltige Verbindungen, Hinweise des Herstellers beachten) RE1, lösemittelfrei gem. TRGS 610 Weitere Hinweise können dem Sicherheitsdatenblatt entnommen werden.			
ANWENDUNGSDATEN (bei +23 °C und 50% rel. Luftfeuchtigkeit)				
Mischungsverhältnis:	Komponente A : Komponente B = 4 : 1			
Konsistenz der Mischung:	dünnflüssig			
Farbe der Mischung:	gelblich transparent			
Dichte der Mischung (kg/l):	1,10			
Viskosität nach Brookfield (mPa·s):	140 (Spindel 1 - 20 Upm)			
Verarbeitungszeit (EN ISO 9514) (Minuten):				
– bei +23 °C:	70			
– bei +30 °C:	30			
Erhärtszeit (Stunden):				
– bei +23 °C:	7-8			
– bei +30 °C:	5-6			
Verarbeitungstemperatur:	von +10 °C bis +35 °C			
Endfestigkeit nach:	7 Tagen			
ANWENDUNGSDATEN				
Eigenschaften	Prüfverfahren	Anforderungen gemäß EN 1504-5	Produkteigenschaft	
Haftung durch Haftzugfestigkeit:	EN 12618-2	Kohäsionsbruch im Untergrund	übertrifft die Anforderungen	
Haftung durch Schrägscherfestigkeit:	EN 12618-3	monolithisches Versagen	übertrifft die Anforderungen	
Volumetrische Schrumpfung (%):	EN 12617-2	< 3	2,1	
Glasübergangstemperatur:	EN 12614	> +40 °C	> +40 °C	
Injektionsfähigkeit bei trockenem oder feuchtem Medium:	EN 1771	Injektionsfähigkeitsklasse: – Rissbreite 0,1 mm: < 4 Min. – Rissbreite 0,2-0,3 mm: < 8 Min.	trocken	feucht
		indirekte Spannung: > 7 (N/mm ²)	11 (N/mm ²)	10 (N/mm ²)
Dauerhaftigkeit (Frost/Tau, und Nass/Trocken-Zyklen):	EN 12618-2	Bruch im Untergrund	übertrifft die Anforderungen	
Zugfestigkeitsentwicklung bei +10 °C (MPa):	EN 1543	Zugfestigkeit > 3 (N/mm ²) innerhalb von 72 Std. bei Mindestanwendungstemperatur	> 3	
Zugfestigkeit (N/mm ²):	EN ISO 527	–	39	
Zug-Elastizitätsmodul (N/mm ²):	EN ISO 527	–	2.600	
Bruchdehnung (%):	EN ISO 527	–	2,5	

Druckfestigkeit (N/mm ²):	ASTM D 695	-	70
---------------------------------------	------------	---	----

Anlage 3 **Materialien**
 Anlage 3.1 **Datenblatt MgO**

Chemische Analyse: *Material gemahlen*

		Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	
GlV(1050°C)	=	3,6	3,8	3,8	%
HCl unl. (grav.)	=	4,6	4,5	4,5	%
SiO ₂ (RFA)	=	2,9	3,0	2,9	%
Fe ₂ O ₃ (RFA)	=	2,3	2,3	2,4	%
CaO (RFA)	=	3,5	3,6	3,5	%
CaO frei (NCH)	=	1,2	0,8	0,7	%
MgO (rechn.)	=	86,8	86,4	86,3	%

Zitronensäureaktivität: *Material ungemahlen*

pH 7	=	238	267	305	Sekunden
pH 7,8	=	250	280	320	Sekunden

physikalische Analyse: *Material ungemahlen*

Bindezeit in Anlehnung an DIN EN 14016:

Beginn	=	240	275	300	Minuten
Ende	=	265	300	325	Minuten
Lauge/20°BéMgCl ₂	=	64,1	64,1	64,1	ml/100g

Siebanalyse					
>200µm	=	1,6	1,0	0,8	%
>90µm	=	17,4	17,6	17,6	%

13. 6. 2021

R. Werthmann

Anlage 3.2 Kumulative Korngrößenverteilung des verwendeten Salzgruses

Tabelle 23: Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 8

Kumulative des Massengewichtverteilung (%)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	6000
Test 1	3,24	13,39	26,86	48,57	78,23	100,00	100,00	100,00
Test 2	3,78	10,64	23,56	46,16	77,89	100,00	100,00	100,00
Test 3	0,82	11,59	24,01	44,63	75,58	100,00	100,00	100,00
Test 4	1,54	9,42	23,22	45,36	77,00	100,00	100,00	100,00
Test 5	2,03	9,28	23,82	46,83	77,35	100,00	100,00	100,00
Test 6	0,61	6,75	23,21	44,07	75,22	100,00	100,00	100,00

Tabelle 24: Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 6

Kumulative des Massengewichtverteilung (%)								
	63 µm	125 µm	250 µm	500 µm	1000 µm	2000 µm	4000 µm	6000 µm
Test 1	0,43	0,82	1,73	4,55	12,87	45,19	91,96	100,00
Test 2	0,55	1,19	2,41	5,84	15,22	47,79	93,65	100,00
Test 3	0,50	0,94	2,01	4,88	13,33	46,29	93,28	100,00
Test 4	0,35	0,59	1,24	3,15	9,16	38,97	90,65	100,00
Test 5	0,30	0,57	0,97	2,34	8,08	39,06	90,49	100,00
Test 6	0,43	0,66	1,17	2,89	9,28	40,25	90,17	100,00

Tabelle 25: Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (1)

Verteilung des Massengewichtes (%)														
	4,5 µm	5,5 µm	6,5 µm	7,5 µm	9 µm	11 µm	13 µm	15,5 µm	18,5 µm	21,5 µm	25 µm	30 µm	37,5 µm	45 µm
F.S.2. 1	1,22	1,67	2,14	2,63	3,41	4,5	5,65	7,14	8,96	10,8	12,9 3	15,8 9	20,0 9	23,97
F.S.3. 1	1,37	1,91	2,47	3,06	4,01	5,35	6,78	8,63	10,9 2	13,2 3	15,9	19,5 9	24,7 3	29,34
F.S.4. 1	1,89	2,59	3,34	4,11	5,34	7,08	8,89	11,2 3	14,0 7	16,9	20,1 2	24,4 9	30,3 9	35,5
F.S.5. 1	2,67	3,53	4,43	5,35	6,79	8,77	10,8	13,3 7	16,4 6	19,5	22,9 4	27,5 6	33,7 6	39,09
F.S.6. 1	1,48	1,87	2,27	2,67	3,28	4,11	4,95	6,01	7,29	8,57	10,0 6	12,1 6	15,2 5	18,26

Tabelle 26: Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (2)

Verteilung des Massengewichtes (%)														
	52,5 µm	62,5 µm	75 µm	90 µm	105 µm	125 µm	150 µm	180 µm	215 µm	255 µm	305 µm	365 µm	435 µm	
F.S.2. 1	27,5 7	32,02	37,18	42,92	48,28	54,93	62,7	71,51	80,82	89,32	95,98	99,69	100	
F.S.3. 1	33,4 6	38,35	43,75	49,49	54,63	60,83	67,9	75,79	83,97	91,27	96,78	99,75	100	
F.S.4. 1	39,9	44,95	50,29	55,75	60,5	66,06	72,28	79,13	86,19	92,44	97,15	99,76	100	
F.S.5. 1	43,6 6	48,81	54,18	59,59	64,21	69,49	75,17	81,26	87,43	92,88	97,14	99,71	100	
F.S.6. 1	21,2 3	25,19	30,12	35,92	41,5	48,65	57,27	67,24	77,91	87,82	95,63	99,74	100	

Anlage 3.3 Anmachlösung - Ses-30 %-Lösung der DEUSA

Stand: 23.07.2021	Spezifikation	
-------------------	----------------------	---

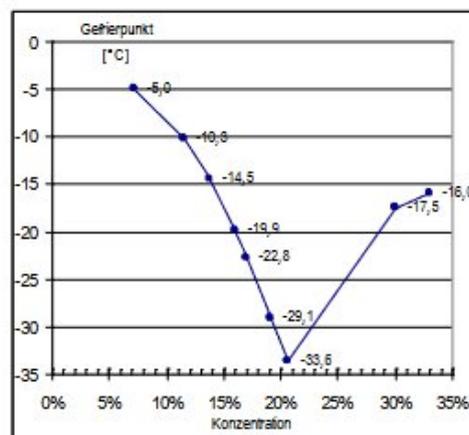
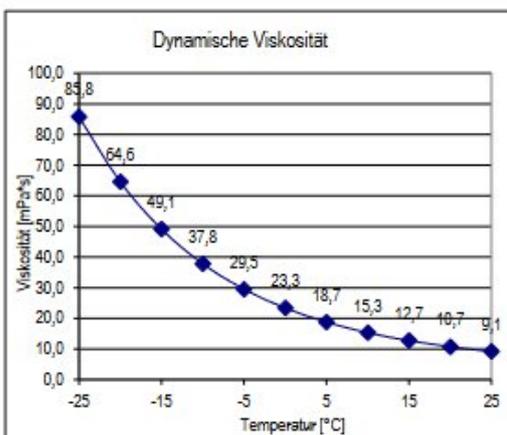
Allgemeine Produktinformationen	
Artikelbezeichnung	Ses 30 %
Handelsname	Magnesiumchloridlösung
Formel	MgCl ₂

Chemische Zusammensetzung					
		Durchschnittswerte		Konzentrationsbereich	
		[g/l]	[%]	[%]	[%]
Magnesiumchlorid	(MgCl ₂)	395	30,0	29,0	
Kaliumchlorid	(KCl)	1,80	0,14		
Natriumchlorid	(NaCl)	4,50	0,35		
Magnesiumsulfat	(MgSO ₄)	34,3	2,60		3,00
Calciumsulfat	(CaSO ₄)	0,20	0,10		0,20

Forderungen nach DIN EN 16811-2							
		IST	Soll			IST	Soll
		[mg/kg]	[mg/kg]			[mg/kg]	[mg/kg]
Arsen	(As)	< 0,10	≤ 2,50	Kupfer	(Cu)	< 0,20	≤ 5,00
Blei	(Pb)	< 0,40	≤ 5,00	Nickel	(Ni)	< 0,20	≤ 5,00
Cadmium	(Cd)	< 0,10	≤ 2,00	Quecksilber	(Hg)	< 0,01	≤ 0,50
Chrom, gesamt	(Cr)	< 0,10	≤ 5,00	Zink	(Zn)	< 1,00	≤ 20,0
				Eisen	(Fe)	< 10,0	Entfällt

Physikalische und chemische Daten			
Dichte bei 20 °C	Entspricht	pH-Wert	Spez. Wärme
1,32 g/cm ³	35 °Be	4 - 7	3,41 MJ / m ³ · K

Eigenschaften	
Additive	Keine
Farbe	Klar, gelblich / bräunlich
Löslichkeit	Sole in jedem Verhältnis mit Wasser mischbar





TU Clausthal

IFAD Rohstoffaufbereitung und Recycling

Analytisches Labor

Erzstraße 20

38678 Clausthal-Zellerfeld

Analysenschein

IFAD/Deponietechnik

Herr Julius Bauermeister

Probe: Magnesiumchloridlösung

Probenvorbereitung, -messung:

Die Messung Metallionen und des Schwefels erfolgte am ICP-OES 5100 der Firma Agilent. Der Chloridgehalt wurde durch argentometrische Titration ermittelt; die Dichte wurde mit einem Flüssigkeitspyknometer bestimmt. Die Salzkonzentration wurde anhand der Elementkonzentration berechnet.

		Salzgehalt β [g/L]					
		3	13	20	27	31	41
MgCl ₂	g/L	383	378	381	383	384	385
KCl	g/L	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
NaCl	g/L	5,8	5,6	5,9	5,7	5,8	5,8
MgSO ₄	g/L	26	26	26	25	26	26
CaSO ₄	g/L	0,27	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28
Fe	mg/L	4,3	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1
Dichte bei 20°C	g/cm ³	1,287	1,287	1,288	1,290	1,289	1,289

		Salzgehalt w[%]					
		3	13	20	27	31	41
MgCl ₂	%	29,7	29,4	29,6	29,7	29,8	29,9
KCl	%	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15
NaCl	%	0,45	0,44	0,46	0,44	0,45	0,45
MgSO ₄	%	2,03	2,03	2,02	1,96	2,03	2,01
CaSO ₄	%	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Bearbeiter: Petra Sommer

Tel.: 05323/72-3794

Clausthal, den 12.10.2020

Produktdatenblatt. Micro A

Informationen

Dieses Produktdatenblatt soll nach bestem Wissen beraten und ersetzt alle früheren Produktdatenblätter. Der Inhalt ist jedoch ohne Rechtsverbindlichkeit

Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an:

CASEA GmbH
Pontelstraße 3
99755 Ellrich
Deutschland
T +49 36332 89-100
F +49 36332 89-202
info@casea-gips.de
casea-gips.de

Ein Unternehmen der REMONDIS-Gruppe

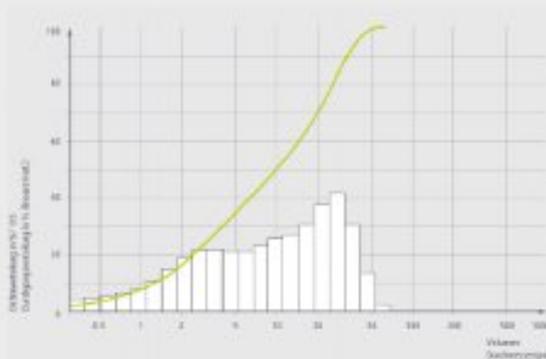
Produktbeschreibung

Micro A ist ein feinst aufbereiteter Naturanhydrit ohne Zusätze oder Anreger. Micro A wird in Produktbereichen der Baustoffindustrie eingesetzt.

> Kornaufbau (Alpine Luftstrahlsiebung)

Durchschnittswert D50 (Lasergranulometer CILAS 920) ca. 10 µm

Beispiel für den typischen Kornaufbau mit Lasergranulometer CILAS 920



> Chemische Zusammensetzung

CaSO ₄	> 90,0 %
Kristalwasser	< 1,0 %
Feuchte	< 0,2 %

> Physikalische Werte

Schüttgewicht	1000-1100 g/l
Weißgrad	> 80,0

> Logistik und Sicherheitshinweise

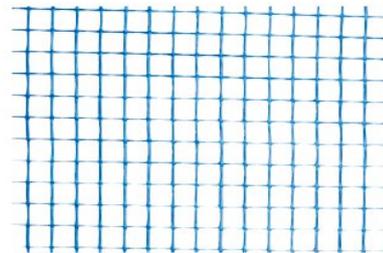
Lieferform	Sack, Big-Bag und Lose
Lagerfähigkeit	Bei trockener Lagerung mindestens 6 Monate lagerfähig. Siehe Sicherheitsdatenblatt
Sicherheitshinweise	Von Micro A gehen keine besonderen Gefährdungen aus.

Außenputzgewebe

Zur Flächenarmierung im Außenputz

Verschiebefest

Werkstoff	Glasfaser, verschiebefest
Flächengewicht pro m ²	145 g
Maschenweite	10 x 10 mm
Farbe	Blau
Rollenbreite x Rollenlänge	1 x 100 m
Beständigkeit gegen	Alkali
Weichmacherfrei	Ja



Art.-Nr. 0519 530 020

VE: 100

Leistungsnachweis

ETAG-geprüft

Ergänzende Produkte zu	Bezeichnung	Art.-Nr.
0519 530 020	Anputzleiste Standard	0519 542 924
	Anputzdichtleiste Flexi	0519 545 924

Anlage 5 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit ist ein Festigkeitskennwert. Er wird mittels Spaltzugversuch ermittelt [34]. Er wird auch als Brazilian Test bezeichnet. Die Spaltzugfestigkeit des Steinsalzes wurde an vier Steinsalzproben ermittelt.

Die Spaltzugfestigkeit wurde an vier Steinsalzkernen, mit einem Durchmesser von ca. 100 mm, ermittelt und mittels Spaltzugversuch durchgeführt. Dieser Versuch dient der Ermittlung der indirekten Zugfestigkeit und wird auch als Brazilian-Test bezeichnet.



Abbildung 102: Probe P300-15/1 eingespannt, kurz vor Durchführung des Versuches.

In Abbildung 102 ist exemplarisch die Probe P300-15/1 eingespannt. Entlang der Probenlänge wird eine Axialkraft auf den Salzkörper ausgewirkt bis der Probenkörper gespalten ist.

Die Spaltzugfestigkeit ermittelt sich wie folgt [34]:

$$\sigma = \frac{2F}{\pi * l * d} \quad (8)$$

σ	Spaltzugfestigkeit	[MPa]
F	Axialkraft	[kN]
l	Probenlänge	[mm]
d	Probendurchmesser	[mm]

Die Spaltzugfestigkeit der einzelnen Proben variierte zwischen 1,34 MPa und 2,21 MPa (Abbildung 59). Hier spielen Faktoren wie Salzzusammensetzung, Schichtungen parallel zur wirkenden Kraft und Korngröße eine ausschlaggebende Rolle. Die Ergebnisse der Spaltzugversuche an den vier Steinsalzproben sind in Tabelle 27 und Abbildung 103 zusammengefasst.

Tabelle 27: Ermittelte Spaltzugfestigkeit der Bohrkernproben.

Probenbezeichnung	F [kN]	l [mm]	d [mm]	σ [MPa]
P300-12-1	34,12	101,4	99	2,16
P300-13-1	34,68	100,8	98,95	2,21
P300-14-1	21,33	101,9	99,1	1,34
P300-15-1	27,38	104,1	99,1	1,69

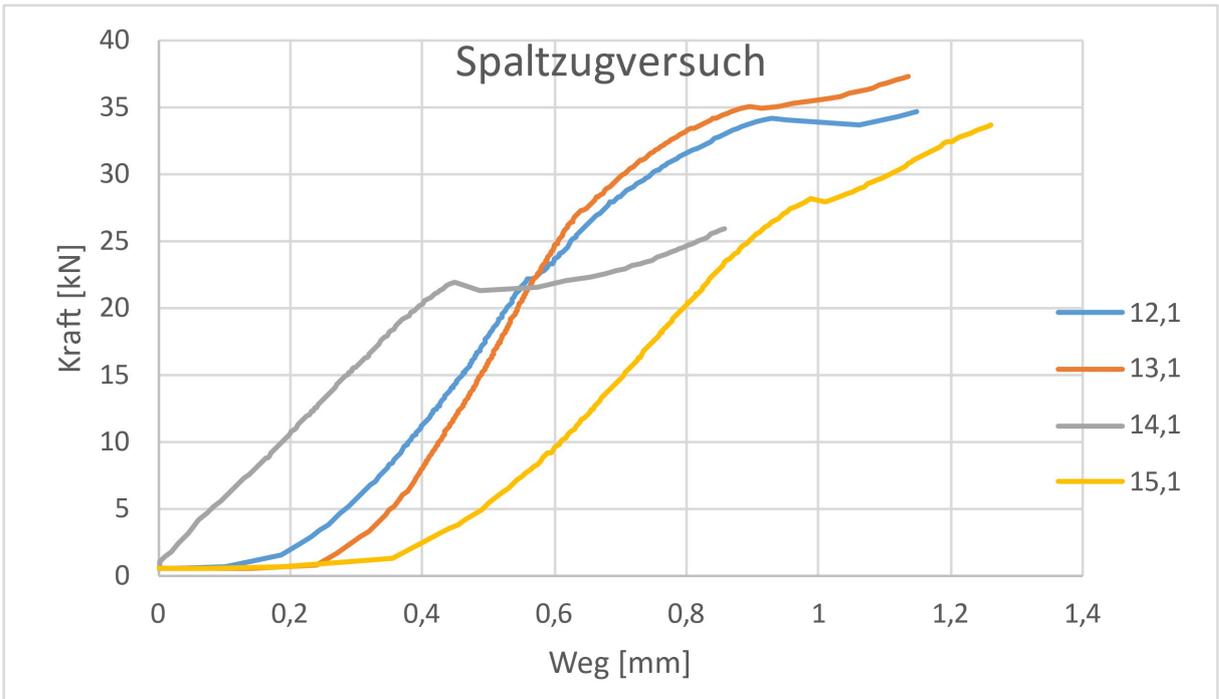


Abbildung 103: Ergebnisse der Spaltzugversuche an den vier Proben.

Anlage 6 Methodik – Ermittlung von Permeabilität und Porosität

Anlage 6.1 Laboruntersuchungen zur Gas- und Lösungspermeabilität

Anlage 6.1.1 Ausgangsbedingungen für strömungstechnische Untersuchungen

Der Strömungsprozess einer flüssigen oder gasförmigen Phase⁽⁹¹⁰⁾(Fluid) in einem Porenraum wird bestimmt:

- ~ vom Porengefüge (Porenform, Porenverbindungen, Porosität, Porengrößenverteilung),
- ~ dem Gehalt flüssiger und/oder gasförmiger Phasen im Porenraum,
- ~ der dynamischen Viskosität und den Benetzungseigenschaften (Grenzflächenspannung, Benetzungswinkel) des Materials oder der strömenden Phasen sowie
- ~ dem aus Porengefüge und Phasenverteilung resultierenden Kapillardruckverhalten des Porengefüges,
- ~ dem Druck der strömenden Phasen.

Auf der Grundlage der Flüssigkeitssättigung im Porenraum werden folgende Permeabilitäten unterschieden:

- ~ absolute Permeabilität k_{abs} bei einer Flüssigkeitssättigung im Porenraum von $S_L=0$ (absolute Gaspermeabilität $k_{G, abs}$) oder $S_L=1$ (absolute Flüssigkeitspermeabilität $k_{L, abs}$)⁽¹¹⁾,
- ~ effektive Gas- und Flüssigkeitspermeabilität $k_{G, eff}$ bzw. $k_{L, eff}$ im Porenraum in Abhängigkeit von der Flüssigkeitssättigung $0 < S_L < 1$ und
- ~ relative Permeabilität $k_{G, rel}$ bzw. $k_{L, rel}$.

Die relative Permeabilität beschreibt den Zusammenhang von effektiver Phasenpermeabilität und Flüssigkeitssättigung⁽¹²⁾ und wird durch Gleichung (1) beschrieben:

$$k_{Ph, rel} = \frac{k_{Ph, eff} (S_L = x)}{k_{Ph, abs}} \quad (1)$$

$k_{Ph, rel}$	-	relative Permeabilität der Fluidphase	[-]
$k_{Ph, eff}$	-	effektive Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
$k_{Ph, abs}$	-	absolute Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
$k_{Ph, abs}$	-	volumetrische Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit	[-], [Vol.-%]
X	-	Wertebereich S_{Ph} ($0 \leq X \leq 1$)	[-]

Die Abbildung 104 zeigt schematisch den Zusammenhang von relativer Permeabilität der Fluidphasen und der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit [35].

Die effektive Permeabilität einer Fluidphase gilt damit immer für den jeweiligen Sättigungszustand. Die Beurteilung setzt die Kenntnis der totalen Porosität und des Flüssigkeitsgehaltes sowie die daraus resultierende Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit voraus.

⁽⁹⁾ mit anderen Fluiden nicht mischbares Fluid – Wasser, Öl, Gas

⁽¹⁰⁾ theoretisch $k_{G, abs} = k_{L, abs}$; praktisch durch vielfältige Einflüsse $k_{G, abs} \neq k_{L, abs}$

⁽¹¹⁾ theoretisch $k_{G, abs} = k_{L, abs}$; praktisch durch vielfältige Einflüsse $k_{G, abs} \neq k_{L, abs}$

⁽¹²⁾ d. R. in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit betrachtet, da die Flüssigkeit als die benetzende Phase angesehen wird

Eine Prüfung der Lösungsgehalte/Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit ermöglicht die Interpretation der ermittelten Gaspermeabilitäten hinsichtlich einer Beeinflussung der Permeabilität durch die Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit. Wurden signifikante Lösungsgehalte/Sättigungen des Porenraumes mit Flüssigkeit ermittelt, gelten die ermittelten Permeabilitätswerte für diese Sättigungsverhältnisse des Porenraumes und werden als effektive Gaspermeabilitäten bezeichnet. In diesem Fall sind ggf. Permeabilitätsuntersuchungen mit Flüssigkeit durchzuführen.

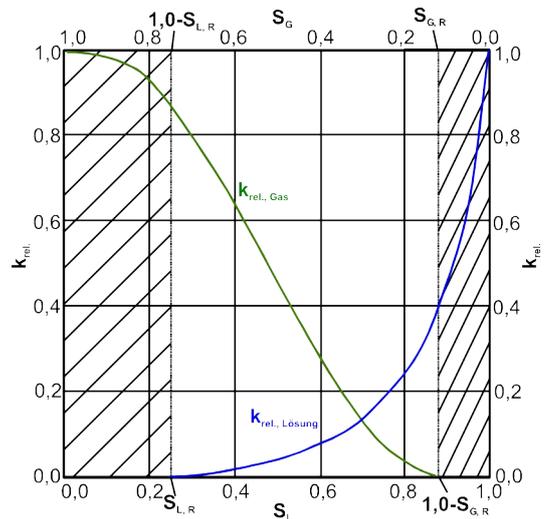


Abbildung 104 Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit aquatischer Salzlösung nach [35]

Erläuterung: S_L – Lösungssättigung, $S_{L,R}$ – Restlösungssättigung, S_G – Gassättigung, $S_{G,R}$ – Restgassättigung

Erfolgt keine Prüfung der Lösungsgehalte/Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit, so ist ein Einfluss einer Flüssigkeitssättigung auf die ermittelte Permeabilität nicht auszuschließen. In dieser Situation sind die ermittelten Permeabilitäten als effektive Permeabilitäten anzusehen.

Anlage 6.1.2 Gaspermeabilität an Kernproben im Labor

Für die Ermittlung der Permeabilität wurde die Methode des instationären Zweikammerversuches angewendet. Abbildung 105 gibt eine schematische Übersicht des dafür angewendeten Versuchsaufbaus. Abbildung 107 zeigt die Versuchsanordnung für die Durchführung der Versuche zur Ermittlung der Permeabilität. Das Konzept der Permeabilitätsbestimmung beruht auf der modellgestützten Auswertung des zeitabhängigen Strömungsprozesses durch einen zylindrischen Prüfkörper. Der Strömungsprozess wird durch einen Druckimpuls in der Eingangskammer ausgelöst. Die über den Versuchszeitraum in der Eingangs- und Ausgangskammer gemessenen Druckganglinien beschreiben den Strömungsprozess und bilden die wesentliche Grundlage für die modellgestützte Identifikation der Permeabilität aus den Versuchsdaten.

Die Ermittlung der Permeabilität erfolgt in Auswertung des temperiert durchgeführten Durchströmungsversuches auf der Grundlage folgender Informationen und Daten:

- ~ Probenaufbau und -geometrie,
- ~ Versuchskonfiguration – Volumina Eingangskammer, Ausgangskammer, Leitungssystem, Prüfkörper,
- ~ thermodynamische Eigenschaften des strömenden Fluides – dynamische Viskosität, Dichte, Kompressibilität für die thermodynamischen Bedingungen des Versuches,
- ~ Druckganglinien für die Eingangs- und Ausgangskammer.

Die Auswertung jedes Versuches erfolgt über die Zusammenführung der genannten Versuchskennnisse in einem numerischen Modell.

In Abhängigkeit vom Prüfkörperaufbau ist die Auswertung auf der Basis eines zwei- oder dreidimensionalen Modells für einen Strömungsraum mit Zylindergeometrie entsprechend Abbildung 106 möglich.

Die räumliche Diskretisierung des Modells kann in Abhängigkeit von der Prüfkörpergeometrie, dem Probenaufbau und den Detailkenntnissen zu der jeweiligen Probe individuell angepasst werden.

Für das numerische Modell des Versuches wird das Programmsystem MODOPF (Prof. F. Häfner & Seite Boy) verwendet. Dieses ermöglicht die orts- und zeitabhängige Lösung der partiellen Differentialgleichung für die isotherme, einphasige Strömung von Gas oder Flüssigkeit (Finite-Differenzen-Methode).

Die Ermittlung der Permeabilität erfolgt über die Anpassung der für die Ein- und Ausgangskammer berechneten an die gemessenen Druckverläufe. Die Anpassung erfolgt über die Variation der Parameter Permeabilität und Porosität. Wurde in begleitenden Untersuchungen die Porosität des Materials ermittelt, wird diese als Startwert der modellgestützten Parameteridentifikation verwendet. Liegen keine Ergebnisse für die Porosität vor, werden Erfahrungswerte für die untersuchten Materialien als Startwerte verwendet. Die Zielfunktion der Anpassung bzw. der Parameteridentifikation ist die Minimierung der Fehlerquadratsumme für die gemessenen und berechneten Druckverläufe. In Abbildung 108 ist beispielhaft ein Anpassungsergebnis dargestellt.

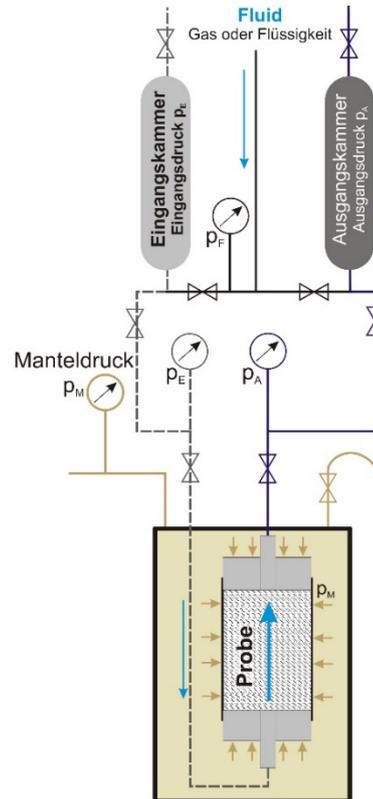


Abbildung 105: Schematische Übersicht des Versuchsaufbaus.

Erläuterung: p_M – Manteldruck; p_E – Eingangsdruk; p_A – Ausgangsdruk; p_F – Fluiddruck

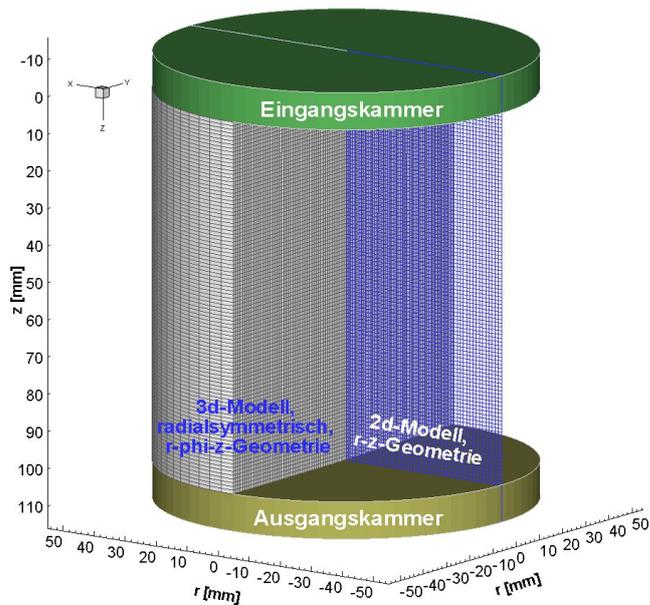


Abbildung 106: Schematische Darstellung des numerischen Modells.



Abbildung 107: Foto Zweikammerversuchsanlage für Gas.

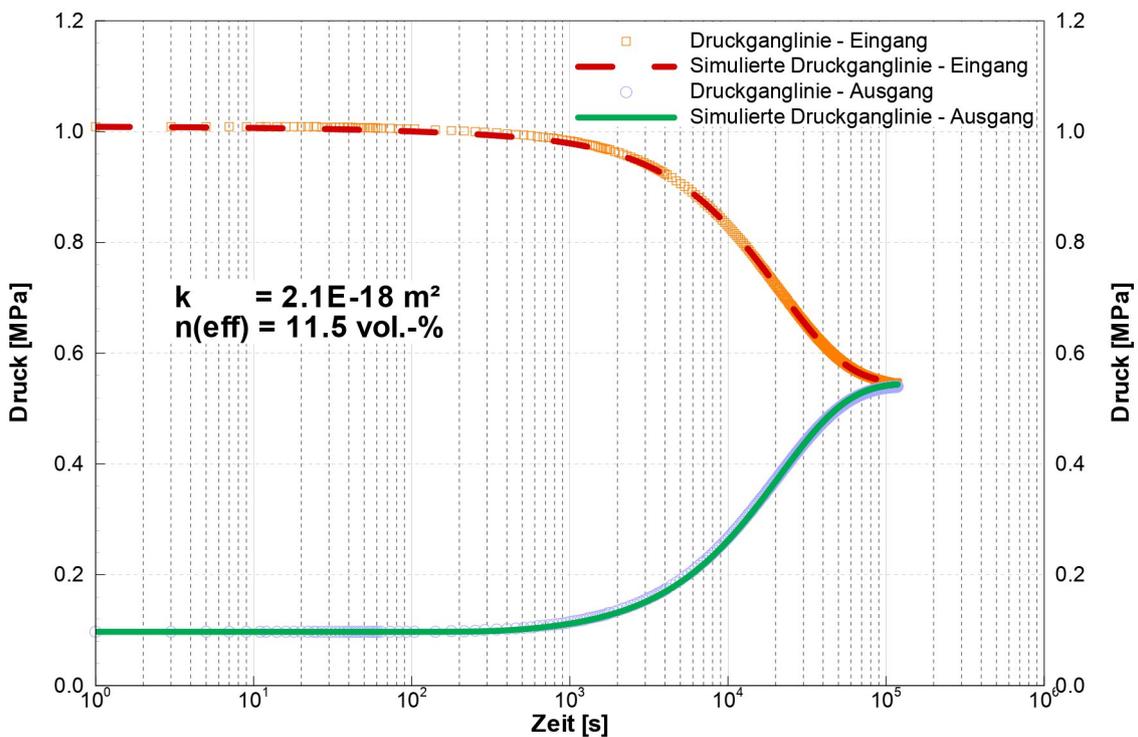


Abbildung 108: Beispiel für das Ergebnis einer modellgestützten Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien (kein Bezug zu projektbezogenen Auswertungen)

Über die Variationen der Versuchskonfiguration ermöglicht das Messverfahren die Bestimmung der Permeabilität für Gase und Flüssigkeiten für den Messbereich $1 \cdot 10^{-14} > k > 1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ und der effektiven Porosität. Die Porosität wird auf der Grundlage der für den Strömungsprozess für Gas im Modell abgebildeten Massenbilanz identifiziert. Da es sich dabei um die effektiv am Strömungsprozess beteiligte Porosität des Prüfkörpers handelt, kann diese kleiner als der vorgegebene Startwert der Porosität sein.

Die Untersuchungen können für Proben mit einem Durchmesser bis 120 mm und einer Länge bis 150 mm im Temperaturbereich $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $70 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt werden. Der Überlagerungsdruck (Manteldruck) kann maximal 25 MPa, der Prüfdruck maximal 20 MPa

betragen.

Die wesentlichen Aspekte und Teilschritte der Permeabilitätstests mit Gas sind nachfolgend zusammengefasst:

Gaspermeabilität k_G

- ~ Einbau des Prüfkörpers im Thermoschrank und Vorgabe der Temperatur entsprechend Messprogramm und Aufbringen des vorgegebenen Manteldrucks über einen Zeitraum von 24 h,
- ~ Verwendung kalibrierter Drucksensoren für die Messung des Eingangsdrucks und Ausgangsdrucks mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,1$ % EW,
- ~ Durchführung eines Dichtheitstests der Messanlage für jeden Versuch während der 24-stündigen Einspanndauer des Prüfkörpers,
- ~ Versuchsdurchführung nach erfolgreichem Dichtheitstest, Ermittlung des Vordrucks des Messgases für definierte Druckaufgabe,
- ~ Überwachung der Temperatur und des Luftdruckes im Messschrank und Labor, Messwerterfassung im Sekundentakt über Datenlogger Almemo,
- ~ digitale Aufzeichnung der Messung im Sekundentakt und Darstellung der Messung in Echtzeit,
- ~ modellgestützte Auswertung der Daten.

Für die Gaspermeabilitätsuntersuchung kann unter den Laborbedingungen von der Strömung eines gegenüber dem Feststoff und dem Porenfluid nahezu inerten Mediums ausgegangen werden (z.B. N_2)¹³.

Die Gasströmung in dem Material wird unter anderem bestimmt von der Phasenverteilung im Porenraum (Zweiphasenströmung), so dass die an bergfeuchten Proben ermittelten Gaspermeabilitäten für den jeweiligen Sättigungszustand gelten und daher effektive Gaspermeabilitäten darstellen. Trotz des Einflusses der flüssigen Phase im Porenraum ermöglichen die Gaspermeabilitäten vielfach die Beurteilung des Permeabilitätsniveaus für die Strömung eines inerten Gases.

Neben dem Einfluss der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit wird die Permeabilität der untersuchten Materialien und Gesteine bestimmt vom Einspannungszustand und der Einspannungsdauer der Prüfkörper sowie dem angewendeten Fluiddruck. In Abhängigkeit vom Verformungsverhalten des Materials unter dem Einfluss des Manteldruckes in der Triaxialzelle ist eine Kompaktion des Prüfkörpers nicht auszuschließen. Dabei sind sowohl elastische als auch plastisch viskose Verformungen mit Folgen für die Ausbildung des Porengefüges zu betrachten. Im Ergebnis sind folgende Auswirkungen nicht auszuschließen:

- ~ Reduzierung der Porosität,
- ~ Verschiebung der Porengrößenverteilung, was für klimatisiert gelagerte Proben zur Erhöhung der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit führt,
- ~ Reduzierung der Permeabilität,
- ~ Festigkeitsüberschreitung und Rissbildung¹⁴ in der Bindemittelmatrix und/oder im Zuschlag von zementbasierten Baustoffen.

Die Folgen der genannten Veränderungen werden vielfach indirekt aus einer Veränderung der Permeabilität über den Versuchsverlauf deutlich, da diese maßgeblich von der Porosität, der Porengrößenverteilung und der Phasenverteilung im Porenraum bestimmt wird. Eine Identifikation und eine Quantifizierung des Anteils der genannten Veränderungen sind nur im Ergebnis eines entsprechend angepassten Untersuchungsprogrammes möglich.

Im Verlauf des Permeabilitätsversuches wirkt die Manteldruckeinspannung dem

¹³ bei Vernachlässigung der Trocknung und ggf. einsetzender Wechselwirkungen zwischen Gas- und Porenlösung

¹⁴ Beim Ausbau der Prüfkörper konnte keine Rissbildung visuell beobachtet werden.

angewendeten Fluiddruck entgegen. Die sich effektiv ergebende Druckdifferenz aus Manteldruck und Fluiddruck ($p_{\text{eff}}=p_M-p_F$) ist bestimmend für die ermittelte Permeabilität.

Für die Volumen- und Druckbedingungen der Gaspermeabilitätsuntersuchungen liegt das für einen Versuch komprimierte Gasvolumen zwischen ca. 200 ml und ca. 2700 ml. Auf Grund der Versuchskonfiguration ergibt sich für den Strömungsprozess bis zur Einstellung des Druckausgleiches zwischen Eingangs- und Ausgangskammer ein strömendes Gasvolumen in der Größenordnung von ca. 65 % des komprimierten Volumens.

Im Kontakt zu dem trockenen Stickstoff kann ein Trocknungsprozess einsetzen. Dieser bei dem MgO-Baustoff jedoch als vernachlässigbar angesehen.

Anlage 6.1.3 Lösungspemeabilität k_L

(nur zusätzliche Aspekte, die von den Tests zur Ermittlung der Gaspermeabilität abweichen)

- ~ luftfreies Befüllen der Anlage mit Messlösung; das Befüllen/Entlüften der Behälter erfolgt mittels Vakuumpumpe,
- ~ Wiederholung der Messung bis zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse,
- ~ Bestimmung der Kompressibilität des Versuchsaufbaus aus Versuchslösung und Prüfkörper nach der Messung.

Aus den vorliegenden Erfahrungen für die Durchströmung von hydraulisch abbindenden Material mit mineralisierter Lösung ist davon auszugehen, dass Wechselwirkungen zwischen der Lösung und dem von hydraulisch abbindenden Material (u.a. Lösungs- und Kristallisationsprozesse mit Volumenzunahme \leftrightarrow Kristallisationsdruck, Reaktionen mit Volumenabnahme oder Zunahme) auftreten können. Diese führen zu einer Veränderung des Porengefüges durch Volumenvergrößerung und/oder -reduzierung sowie daraus resultierend zu einer Beeinflussung des Porenraumes und der Permeabilität.

Darüber hinaus ist für die Lösungsströmung ebenfalls der Einfluss der Zweiphasenströmung zu berücksichtigen. Dieser resultiert aus der anfänglichen Untersättigung des Porenraumes mit Lösung bzw. der Gasphase im Porenraum. Trotz der Lösungsaufnahme der Prüfkörper im Lagerungsversuch und der nachfolgenden Aufsättigung ist ein Restgasgehalt im Porengefüge nicht auszuschließen. Die Zweiphasenströmung wird bestimmt von der Porengrößenverteilung des Materials, den Benetzungseigenschaften der Fluide und dem daraus resultierenden Kapillardruck sowie den sich in Abhängigkeit von der Phasenverteilung im Porenraum ergebenden Permeabilitäten (relative Permeabilitäten) für Gas und Lösung. Der Restgehalt im Porenvolumen und der Gasgehalt in der verwendeten Testlösung bestimmen die Kompressibilität des Gesamtsystems. Nach jedem Test wird die effektive Kompressibilität im Anstrom des Probenkörpers ermittelt. Diese wird bei der modellgestützten Auswertung berücksichtigt.

Um den Einfluss der voran genannten Prozesse – Sekundärreaktionen, Kristallisationsdruck, Zweiphasenströmung und Kompressibilität – zu reduzieren bzw. weitgehend auszuschließen, wurden die Permeabilitätsversuche mit Lösung bis zum Nachweis einer reproduzierbaren Druckreaktion in aufeinander folgenden Messungen (Impulstests) wiederholt. Es wird davon ausgegangen, dass sich für die Bedingungen von nacheinander durchgeführten Tests mit gleichem Verlauf der Druckganglinien der Druckimpuls in einem gesättigten Porenraum ohne Einfluss von Wechselwirkungen zwischen der Salzlösung und dem Feststoff ausbreitet. Unter diesen Bedingungen wird von einer Reproduzierbarkeit des Tests für die Lösungspemeabilität ausgegangen.

Anlage 6.1.4 Fehlerbetrachtung für die Bestimmung von Permeabilitäten

Für die Abschätzung des Fehlers bei der Bestimmung der Permeabilitäten und des Lösungsgehaltes sind 2 Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- ~ Messfehler, die durch die Genauigkeit der eingesetzten Sensoren, Messschieber, Waagen und der Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Eigenschaften der verwendeten Ausrüstung (z. B. Volumen) sowie der Fluide (z. B. dynamische Viskosität) entstehen (entspricht z. B. der für Messgeräte angegebenen Messgenauigkeit handelsüblicher Geräte – Messgeräteabweichung),

~ Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei „gleichen“ Bedingungen.

~ Man spricht hierbei von zufälligen Messabweichungen, die sich bei Wiederholungen durch die Streuung quantifizieren lassen. Die Berechnung setzt eine bestimmte Anzahl von Wiederholungsmessungen voraus. Deren Anzahl richtet sich nach vorgegebenen Genauigkeitsforderungen [36] bzw. nach Erfahrungswerten. In verschiedenen Veröffentlichungen zu Fehlerbetrachtungen bei Messungen wird die Zahl der Wiederholungen von mindestens 3 bis i. a. 10 für eine gesicherte statistische Aussage angegeben.

Wie in [37] beschrieben beeinflussen beide Fehlerquellen die Unsicherheit in den Messungen. Im Ergebnis der Permeabilitäts- bzw. Lösungsgehaltsbestimmung führt die Fehlerbetrachtung zu einer Angabe eines Bereiches, innerhalb dessen die Permeabilität mit einer vorgegebenen statistischen Sicherheit (i. a. 95 % oder 99 %) liegt.

Anlage 6.2 Laboruntersuchungen zur Porosität und Sättigung

Anlage 6.2.1 Lösungsgehalt

Der Lösungsgehalt von Baustoffen ist für die Berechnung der Trockenmasse und Trockendichte sowie für die Beurteilung der Porenraumsättigung wesentlich. Die der Lösungsgehaltsbestimmung zugrundeliegende Trocknung des Materials ist ein Teil der Probenaufbereitung für die Ermittlung weiterer Materialparameter (z.B. Reindichte und Porosität). Im Rahmen eines Forschungsvorhabens [26] sowie bei den aktuellen Untersuchungen kamen unterschiedliche Trocknungsmethoden zum Einsatz.

Als Ergebnis der Trocknung wurde für den Baustoff ein Lösungsgehalt unter der Annahme berechnet, dass es sich bei der Porenlösung um eine $MgCl_2$ -gesättigte Porenlösung mit einer Dichte von $1,30 \text{ g/cm}^3$ und einer Gesamtmineralisation $0,43 \text{ g/cm}^3$ (20°C) handelt.

Als Ergebnis der Trocknung für Proben aus dem Gebirge wurde ein Lösungsgehalt unter der Annahme berechnet, dass es sich bei der Porenlösung um eine $NaCl$ -gesättigte Porenlösung mit einer Dichte von $1,20 \text{ g/cm}^3$ und der Gesamtmineralisation von $0,32 \text{ g/cm}^3$ (20°C) handelt.

Der Lösungsgehalt berechnet sich aus:

$$w_L = \frac{m_L}{m_{F,korr}}$$

w_L	Lösungsgehalt	[-]
m_L	Masse Lösung	[g]
$m_{F,korr}$	Masse Feststoff, trocken, korrigiert	[g]

Die Masse der Lösung im Porenraum berechnet sich aus:

$$m_L = \frac{m_W \cdot \alpha_L}{r_L - C_C}$$

m_W	Masse Wasser	[g]
C_C	Gesamtkonzentration gelöste Komponenten	[g/L]
ρ_L	Dichte Lösung	[g/L]

Die korrigierte Feststofftrockenmasse ergibt sich aus:

$$m_{F,korr} = \frac{m_{F,tr} \cdot \alpha_L - C_C \cdot m_{F,f}}{(r_L - C_C)}$$

$m_{F,korr}$	Masse Feststoff, trocken, korrigiert	[g]
$m_{F,f}$	Masse Feststoff, feucht	[g]
$m_{F,tr}$	Masse Feststoff, trocken	[g]

Die Massenkorrektur auf der Grundlage der Gesamtmineralisation und Dichte der Porenlösung stellt eine Näherung dar. Die genaue Zusammensetzung der Porenlösung ist vielfach nicht bekannt und kann nicht ermittelt werden. Dies gilt zum Beispiel für abgebundene Baustoffe (mit Salzzuschlag oder Salzlösung als Anmachlösung) und Proben mit einer Zusammensetzung aus unterschiedlichen Salzmineralen. Bei möglichen Feststoffgehalten über 400 g/l kann die Vernachlässigung der Mineralisation zu erheblichen Ungenauigkeiten für die massenabhängigen Parameter und die daraus berechneten Größen, wie zum Beispiel die Dichte, Porosität und Sättigung, bewirken. Um diesen Fehler zu minimieren, wird vielfach eine Annahme für die Zusammensetzung der Porenlösung getroffen. So wird für eine Steinsalzprobe eine gesättigte NaCl-Lösung angenommen. Für einen Baustoff, der mit Salzlösung angemacht wurde, wird die Zusammensetzung der Anmachlösung verwendet.

Die sich aus der Unsicherheit bezüglich der Zusammensetzung der Porenlösung ergebende Unsicherheit für den ermittelten Lösungsgehalt wird, im Vergleich zu einer vollständigen Vernachlässigung dieses Einflusses, als akzeptabel angesehen.

Bei MgO-Baustoffen mit basischen Magnesiumchlorid-Hydraten als Bindemittelphase stellt die übliche Trocknung bei ca. 105 °C keine sinnvolle Trocknungsmethode zur Bestimmung des Lösungsgehaltes dar, da:

- die thermische Zersetzung der Bindemittelphasen (Sorelphasen) im feinpulverisierten Zustand bereits ab 50 °C bis 60 °C im offenen System bei entsprechend niedriger Luftfeuchte einsetzt,
- aus der Porenlösung (falls im Baustoff enthalten) je nach Zusammensetzung und Konzentration Salze (Bischofit, Carnallit, NaCl...) auskristallisieren,
- bereits bei der Präparation entsprechender Pulverproben enthaltene Porenlösung einzutrocknen beginnt oder auch Feuchtigkeit aus der Luft aufgenommen wird - je nachdem, welche Ionenkonzentrationen und Wasseraktivität die Porenlösung aufweist,
- eine Trocknung kompakter (nicht pulverisierter) Proben in endlicher Zeit und aufgrund des z.T. stattfindenden Porenverschlusses nicht möglich ist.

Vor diesem Hintergrund wurde das Kernmaterial aus dem Gebirge bei 105 °C/0 % F_R und 60 °C/~3 % F_R , die Kompositproben sowie die Baustoffproben bei 60 °C/~3 % F_R Ofentrocknung getrocknet. Einige Baustoffproben wurden auch schonend bei 45 °C~8 % F_R Ofentrocknung getrocknet.

Die Trocknung erfolgte bis zur Massekonstanz. In Abhängigkeit vom Lösungsgehalt wurden folgende Abbruchkriterien angewendet:

~ < 1 Ma. %:	0,001 Ma. %/24 h für 100 g – \triangleq 1 mg/24 h
~ \geq 1 Ma. %, < 5 Ma. %:	0,01 Ma. %/24 h für 100 g – \triangleq 10 mg/24 h
~ \geq 5 Ma. %:	0,1 Ma. %/24 h für 100 g – \triangleq 100 mg/24 h

Die getrockneten Proben wurden nach dem Erreichen der Massekonstanz in verschlossene Behältnisse überführt.

Anlage 6.2.2 Dichtebestimmung – Feuchtdichte, Trockendichte und Reindichte

An dem Probenmaterial wurden die Feuchtdichte, die Trockendichte und die Reindichte nach Trocknung der Probekörper bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen (105 °C, sowie bei 60 °C und 45 °C) ermittelt.

Die Feuchtdichte wurde aus dem Volumen zylindrischer Probekörper, und der Feuchtmasse der jeweiligen Probe berechnet. Der Durchmesser und die Höhe der Probenzylinder wurden aus mindestens 10 Einzelmessungen je Probekörper mit einem elektronischen Messschieber ermittelt.

Die Feuchtmasse der Probekörper wurde über Wägung mit einer Kern-Waage PLS mit einer Ablesbarkeit von $\pm 0,001$ g ermittelt.

Die Trockendichte wurde auf der Basis der Feuchtdichte und der ermittelten Lösungsgehalte berechnet. Der für die Trockendichte angegebene Fehler wurde auf der Basis der Gauß'schen

Fehlerfortpflanzung bei zufälligen Fehlern für die eingehenden Parameter nach Gleichung (9) ermittelt.

$$\varepsilon_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \varepsilon_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \cdot \varepsilon_k\right)^2} \quad (9)$$

y f(x₁ ... x_k)
 ■ Fehler der x-Werte

Die Proben für die Reindichteermittlung wurden einer Trocknung unterzogen. Die Trocknungstemperatur kann dabei unterschiedlich sein. Die Reindichte der Proben wurde mit einem Gaspyknometer Pycnomatic DMA-4500-M, Fa. Anton-Paar, ermittelt. Die Reindichte wurde in Auswertung von mindestens drei Einzelmessungen gemittelt.

Anlage 6.2.3 Totale Porosität (aus den Dichten)

Auf der Grundlage der Rein- und Trockendichte kann die **totale Porosität** nach der Gleichung (10) berechnet werden.

$$n_t = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (10)$$

n _t	totale Porosität	[-]
ρ _d	Trockendichte	[g/cm ³]
ρ _s	Reindichte	[g/cm ³]

Für die berechnete totale Porosität wurde mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung [36], unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der Fehler ermittelt.

Anlage 6.2.4 Porenraumsättigung

Auf der Basis der aus der Dichte ermittelten Porosität (Anlage 6.2.3) und des Lösungsgehaltes (Anlage 6.2.1) wurde die Porenraumsättigung mit Flüssigkeit nach Gleichung (11) ermittelt:

$$S = \frac{w_L \cdot \rho_d}{\rho_L \cdot n_t} \quad (11)$$

S	Sättigung des Porenraumes	[-]
n _t	totale Porosität	[-]
ρ _d	Trockendichte	[g/cm ³]
ρ _L	Dichte der Porenraumflüssigkeit	[g/cm ³]
w _L	Lösungsgehalt	[-]

Für die Sättigung wurde der Fehler auf der Basis der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung [36] berechnet.

Anlage 6.2.5 Quecksilberporosimetrie (MIP)

Beim Quecksilberinjektionsversuch nach DIN 66133 [38] wird im Ergebnis der Injektion von Quecksilber mit steigendem Injektionsdruck die Porosität einer Probe aus dem druckabhängig injizierten Quecksilbervolumen ermittelt. Aus der Kenntnis der Grenzflächenspannung und des Benetzungswinkels von Quecksilber für die angewendeten Druck- und Temperaturbedingungen kann nach der Gleichung (12) aus den Versuchsdaten eine Vorstellung über die Porengrößenverteilung abgeleitet werden.

$$p_{cap} = \frac{2 \cdot \gamma_{Hg-Luft} \cdot \cos \delta}{r} \quad (12)$$

p_{cap}	Kapillardruck	[Pa]
r	Porenradius	[m]
γ	Grenzflächenspannung ($\gamma_{Hg-Luft} (25^\circ C) = 480 \text{ mN/m}$)	[N/m]
δ	Kontaktwinkel ($\delta_{Hg-Luft} (25^\circ C) = 140^\circ$)	[°]

Die Quecksilberporosimetrie ermöglicht, in Abhängigkeit von der Größe des eingesetzten Dilatometers, die mit Quecksilber injizierbare Porosität und die Porengrößenverteilung von Probenkörpern mit Kantenlängen von ca. 7 mm oder bis ca. 22 mm zu ermitteln. Innerhalb dieser Probengröße sollte die Porenstruktur des Materials repräsentativ abgebildet sein. Anderenfalls kann durch Wiederholungsversuche und statistische Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie auch für Materialien mit relativ heterogener Porositätsverteilung die Porenstruktur beurteilt werden. Aussagen über die Porengrößenverteilung für Proben mit Abmessungen > 22 mm Kantenlänge sind mit dem Verfahren nicht möglich.

Für die Beurteilung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Quecksilberporosimetrie sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

Im Versuch strömt Quecksilber druckabhängig in einen (weitgehend) trockenen Porenraum. Die Strömung wird nur in der Anfangsphase, also bei geringem Anfangsdruck, vom Porenquerschnitt bestimmt. Im weiteren Versuchsverlauf wird die Strömung des Quecksilbers von den Porenhalsdurchmessern des Porengefüges bestimmt. Die Bezeichnung des Auswertungsergebnisses müsste daher Porenhalsdurchmesserverteilung statt Porengrößenverteilung lauten. Dies schränkt die Aussagekraft der Versuchsergebnisse für die Beurteilung von Strömungsprozessen nicht ein. Die Strömung eines Fluides wird vom maximalen, verbundenen Porenquerschnitt und damit von den Porenhalsquerschnitten bestimmt.

Im Bereich der Porendurchmesser >100 µm wird die Quecksilberporosimetrie unscharf. In Abhängigkeit von der im verwendeten Porosimeter umgesetzten Versuchsmethodik werden laut Hersteller Micromeritics maximale Porendurchmesser von 900 µm angegeben, für die Messungen möglich sind.

Für die Quecksilberporosimetrieversuche ist von einem Einfluss der Injektionsrate, der Kompressibilität des Gesamtsystems aus Feststoff, Porengefüge und Quecksilber und der Porenform (zylindrisch oder davon abweichend) auszugehen. Die Auswertung geht von zylindrischen Poren aus. Die Proben wurden mit dem Porosimeter AutoPore V9600 1.03 der Firma Micromeritics bei einem maximalen möglichen Druck von ca. 420 MPa und einem messbaren Porendurchmesser von ca. 2 nm bis ca. 700 µm, Micromeritics GmbH untersucht. Für alle Proben wurde auch die Reindichte ermittelt siehe Anlage 6.2.2.

Die Porosität bzw. die Porengrößenverteilung von porösen Materialien weist einen materialspezifischen Verlauf auf. Anhand dieses Verlaufes können Makro-, Meso- und Mikroporen differenziert werden. Wie die Beispiele in Tabelle 28 zeigen, werden die Porengrößenbereiche für Baustoffe in Abhängigkeit von der bearbeiteten Themenstellung unterschiedlich definiert. Vor diesem Hintergrund wird die Klassifizierung der Porengrößenprobenbezogen in Auswertung der Anstiege der Regressionsgeraden an Teilabschnitten der Porengrößenverteilung entsprechend der beispielhaften Darstellung in Abbildung 109 angewendet. Die Grenzen zwischen den Porenklassen werden durch die Schnittpunkte der Regressionsgeraden definiert (Abbildung 109).

Tabelle 28: Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe

Mikroporen	Mesoporen	Makroporen	Quelle
Gelporen	Kapillarporen		
[nm]	[nm]		
< 30	> 30		[39]
< 10	> 10		
mittlerer Durchmesser 1,8	-		
0,01 bis 100	100 bis 10^5	ab 10^5	[40]
0,5 bis 30	30 bis 10^5	10^5 bis 10^6	[41]
0,5 bis 50	50 bis 500		[42]
1 bis 10	10 bis 10^5	10^3 bis 10^6	
< 5	5 bis $5 \cdot 10^3$		
1 bis 10	10 bis 10^5		[43]

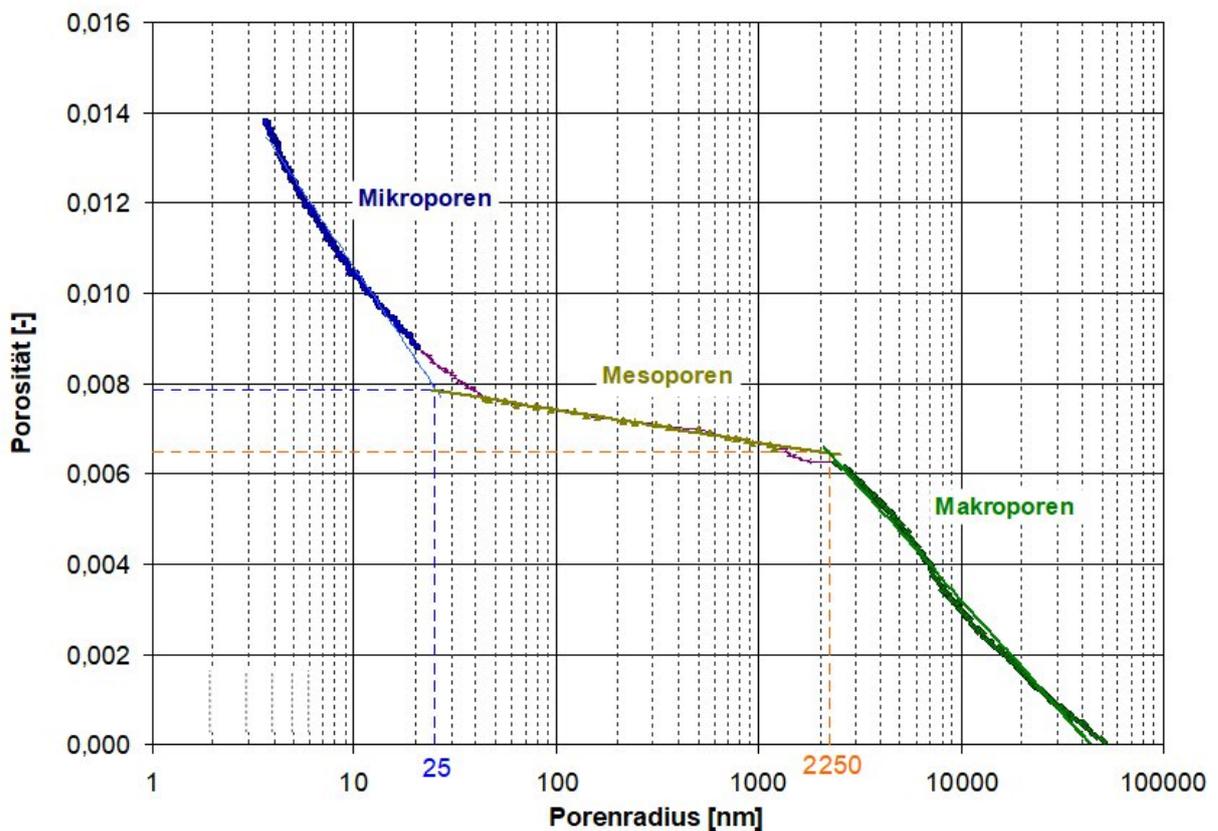


Abbildung 109: Vorgehensweise für die Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen [44]

Für die Beurteilung der Porositätsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass es infolge der Trocknung zu einer Ausfällung von in der gesättigten Porenlösung gelösten Inhaltsstoffen kommt bzw. kommen kann. In Abhängigkeit vom Lösungsgehalt und dem Porengefüge wird daher prinzipiell die ermittelte Porosität und die Porengrößenverteilung durch die Trocknung beeinflusst.

Teilprojekt:

Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, in situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B
FKZ 02E11748B

Zuwendungsempfänger:

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden

Projektleiter:

Dr. Johannes Kulenkampff

Anlage 7.1 CT-Untersuchungen am Wirtsgestein

Anlage 7.1.1 Fragestellung

In der Kontaktzone steht das aufgelockerte Wirtsgestein in unmittelbarem Kontakt zum Baumaterial. In ihr sind signifikante Poren und Risse nicht ausgeschlossen, die Bedeutung für die Dichtheit des Bauwerks haben. Die Charakterisierung dieser Porenräume ist aber schwierig, weil die Rissweiten klein und räumlich ungleichförmig verteilt sind.

Deshalb ergibt auch die übliche Methode der Quecksilber- porosimetrie (MIP) teilweise unklare Ergebnisse. Bisher gemessene Porenradienverteilungen weisen oft erhebliche Volumenanteile im Bereich der größten messbaren Porenradien ($>100\ \mu\text{m}$) auf, die der Bestätigung durch ein unabhängiges Verfahren und gegebenenfalls der Erklärung bedürfen. Röntgen-Tomographie (CT) bietet die Möglichkeit der augenfälligen Darstellung, Segmentierung und Parametrisierung dieser größten Porenklassen im MIP-Spektrum.

Anlage 7.1.2 Methode

Steinsalzquader mit Kantenlänge von etwa 20 mm wurden vom Projektpartner IBeWa schonend durch Sägeschnitte hergestellt und vor der MIP-Messung röntgentomographisch mit einem Nikon XT H 225 Scanner aufgenommen (Aufnahmeparameter: Quelle 190 kV, 60 μA , Filter: 0.5 mm Cu, Voxelgröße 12.4 μm). Die Voxelgröße lässt sich aufgrund der vorgegebenen Probengröße nicht weiter verkleinern.

Würfelproben

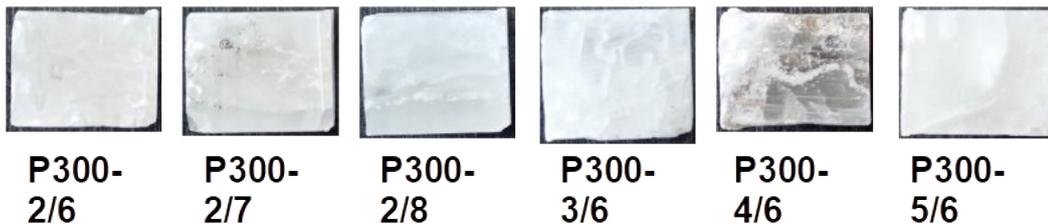


Abbildung 110 Steinsalzproben P300 für CT und MIP (Bild: IBeWa)

Es stellte sich heraus, dass in den sonst homogenen Bereichen des Halits nur sehr vereinzelt Poren erkennbar waren und die Probenform gleichzeitig eine merkliche Grauwert-Vignettierung, also einen inhomogenen Hintergrundeffekt, bewirkte. Aus diesem Grund wurde der Hintergrund mittels einer geeigneten Kombination von Bildbearbeitungsschritten (Avizo 2021.2, Fisher Scientific) homogenisiert. Dies war erschwert durch Bereiche mit einzelnen Körnern hoher Dichte, die zunächst segmentiert und ausgeblendet wurden. Nach der Homogenisierung wurde das Tomogramm geglättet und die Poren mittels „black Top-Hat“-Segmentierung dargestellt. Für die Filterung wurde anstelle des häufig angewendeten non-local-means-Filters das „despeckle“-Filter angewendet, um die maximale Auflösung zu gewährleisten. Das dreidimensionale Binärbild wurde von unzusammenhängenden Einzelobjekten durch Opening bereinigt.

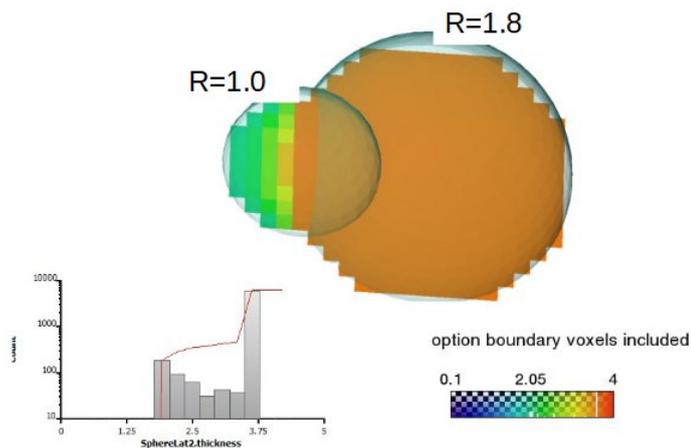


Abbildung 111 Thickness Map zweier sich überlagernder Kugeln mit Durchmessern von 2.0 und 3.6 mm. Unten links daraus mittels Avizo berechnete Durchmesser-Verteilung.

Die Größe der Porenstrukturen wurde mittels der „Thickness Map“ ermittelt (Abbildung 111). Die Thickness Map gibt den Durchmesser der maximalen im Objekt enthaltenen Kugel um ein bestimmtes Voxel wieder. Dieses Maß ist geometrisch äquivalent zum Kapillar-Krümmungsradius, welcher der Young-Laplace-Gleichung in der MIP-Auswertung zugrunde liegt. Allerdings liefert die CT jeglichen erkennbaren Porenraum ohne Berücksichtigung der Zugänglichkeit, also auch isolierte Poren, wie z.B. Flüssigkeitseinschlüsse.

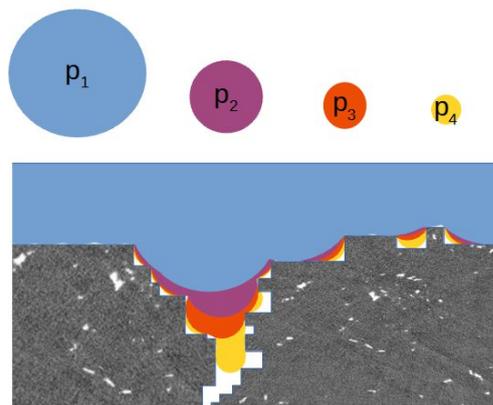


Abbildung 112 Rauheitsvolumen für vier scheinbare Porenradialklassen. Diese Radialklassen entsprechen den Quecksilber-Kapillardrücken p_1 bis p_4 . Die Außengrenze der erste Druckstufe entspricht dem einhüllenden Volumen.

Zum Vergleich wurde das komplette Probenvolumen ebenfalls segmentiert. Die Ansicht der äußeren Oberfläche weist merkbare Riefen und einzelne raue Bruchkanten mit typischen Abmessungen der Konkavitäten im Bereich von 0.1 bis 0.5 mm. Dieses gesamte Probenvolumen wurde von einem geglätteten einhüllenden Volumen („Convex Hull“) abgezogen und die Differenz als Rauheitsvolumen bezeichnet (Abbildung 112). Auch von diesem wurde die Thickness Map bestimmt. Das Rauheitsvolumen V_{surf} bezogen auf das Totalvolumen V_{tot} stellt der Rauheitsanteil der Porosität n_{surf} dar (Tabelle 29):

$$n_{surf} = \frac{V_{surf}}{V_{tot}}$$

Die dichte Phase, vermutlich Anhydrit, wurde zur Abschätzung ihres Volumenanteils ebenfalls segmentiert.

Aus den Histogrammen der CT-Thickness-Map wurden rechts-kumulative Summenkurven erstellt, die den MIP-Summenkurven (Kapillardruckkurven) entsprechen – sie lassen sich mit diesen übereinander zeichnen. Aus diesen Summenkurven wurden wiederum Histogramme

der MIP und CT-Thickness-Map mit gleicher Klasseneinteilung erstellt und überlagert.

Nach den CT-Messungen wurden MIP-Messungen durch den Projektpartner IBeWa veranlasst. Diese Untersuchungen wurden mit Autopore V (Micromeritics) vorgenommen. Dieses Porosimeter zeichnet sich durch einen besonders großen Messbereich in Richtung großer Poren (max. 0.5 mm) aus.

Anlage 7.1.3 Ergebnisse

Anlage 7.1.3.1 Strukturen qualitativ

Das Endergebnis, ein dreidimensionales Binärbild der Poren, zeigt einige wenige klar erkennbare Hohlräume mit Durchmesser unter 100 μm (Abbildung 113). Sie sind gewöhnlich verbunden durch teilweise segmentierte flächige Gebilde, die Rissstrukturen (vermutlich überwiegend auf Korngrenzen) mit Dimensionen in der Nähe des Auflösungsvermögens wiedergeben. Bereiche verminderter Dichte (bzw. geringerer Röntgenabsorption), die auf lokal erhöhte Porosität hinweisen könnten, wurden nicht erkannt. In einigen Fällen deuten Aussackungen in der Form der Poren darauf hin, dass es sich nicht nur um sekundär während der Probengewinnung entstandene Risse bzw. Präparationsartefakte handelt, sondern dass diese Strukturen ursprünglich vorhanden gewesen sein müssen. Für die ursprüngliche Fragestellung ist dies nicht relevant, weil die Strukturen des gestörten Materials der Auflockerungszone maßgeblich für die Transporteigenschaften der Kontaktzone sind.

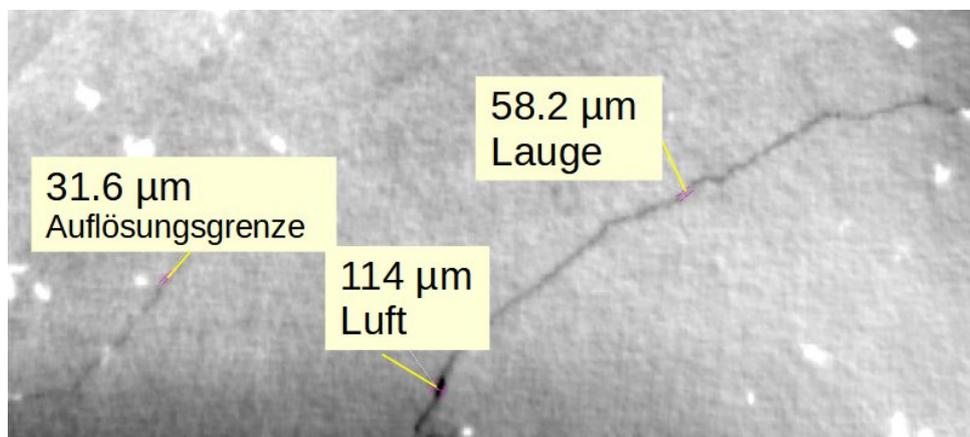


Abbildung 113 Bildausschnitt eines CT-Schnittbildes mit rissartigen Poren (P300 5/6). Unterhalb von ca. 30 μm ist keine sichere Segmentierbarkeit gegeben. Einzelne dichte Kristalle sind als weiße Objekte zu erkennen.

Die dichten Strukturen setzen sich überwiegend aus Einzelkörnern mit einer typischen Größe von 30 μm und einer länglich-quaderförmige Form zusammen. Aufgrund ihres Grauwertes lässt sich eine Dichte deutlich über 2.5 g/cm^3 abschätzen. In einigen Fällen scheinen diese Strukturen mit der Anordnung von Rissen im Halit zu korrespondieren.

Durch lineare Skalierung kann aus den Grauwerten die Dichte abgeschätzt werden. Dabei wurde angenommen, dass das Material Werte zwischen 0.0 und 2.95 g/cm^3 annehmen kann, d.h. der Dichten von Luft bis Anhydrit. Mit dieser Skalierung ergibt sich für die Matrix die zu erwartende Dichte von ca. 2.2 g/cm^3 , also von Steinsalz (Abbildung 114). Die leichtesten „Komponenten“ sind offensichtlich blasenförmige Lufteinschlüsse, die sich in wenigen größeren Porenstrukturen nachweisen lassen. Sie sind gewöhnlich von weniger dichtem Material umgeben, das räumlich auflösbar ist und merklich geringere Dichte (1.2 g/cm^3) hat, vermutlich handelt es sich um Lauge.

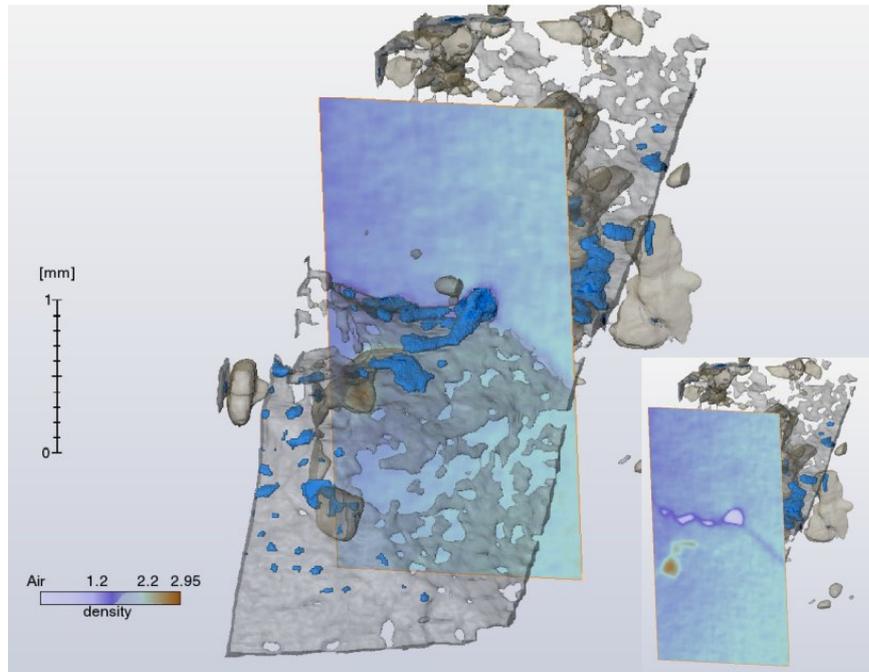


Abbildung 114 Zuordnung der Grauwert-Phasen des CT-Bildes (P300 5/6). Die generelle scheinbare Dichteabnahme von rechts nach links ist ein Abbildungsartefakt. Überlagert ist das Volumenrendering der drei segmentierten Phasen „Luft“ (blau), „Lauge“ (grau) und „dichtes Material“ (braun). Es wird ersichtlich, dass die Luftphase immer blasenförmig innerhalb der Laugephase auftritt, es sich somit um Lufteinschlüsse in der Lauge handelt.

Anhand ihrer unterschiedlichen CT-Schwächung (bzw. Dichte) lassen sich verschiedene Phasen unterscheiden und ihr Volumenanteil als CT-Modalbestand berechnen. Hier wurde dieser Modalbestand anhand der Dichteverteilung durch Segmentierung der drei Phasen „Pore“ (Porosität n_{CT}), „Halit“, „dichtes Material“ (Volumenanteil Φ_{dense}) bestimmt (Abbildung 115). Die Ergebnisse sind in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29 Aufstellung der integralen CT-Ergebnisse zum Steinsalz. Gesamtvolumen der Proben aus CT V_{tot} , Volumen mit geglätteter äußerer Oberfläche $V_{ConvHull}$, Volumendifferenz V_{surf} , scheinbare Porosität aufgrund der Oberflächenrauheit n_{surf} , interne Porosität n_{CT} , Anteil dichter Bestandteile Φ_{dense} .

Probe	V_{tot} /mL	$V_{ConvHull}$ /mL	V_{surf} /mL	n_{surf}	n_{CT}	Φ_{dense}
P300_2_6	7,13	7,57	0,440	0,062	0,035	0,039
P300_2_7	7,21	7,58	0,374	0,052	0,029	0,018
P300_2_8	7,38	7,81	0,430	0,058	0,024	0,029
P300_3_6	6,83	7,28	0,450	0,066	0,025	0,009
P300_4_6	5,2	5,58	0,377	0,073	0,018	0,190
P300_5_6	8,14	8,68	0,532	0,065	0,019	0,025

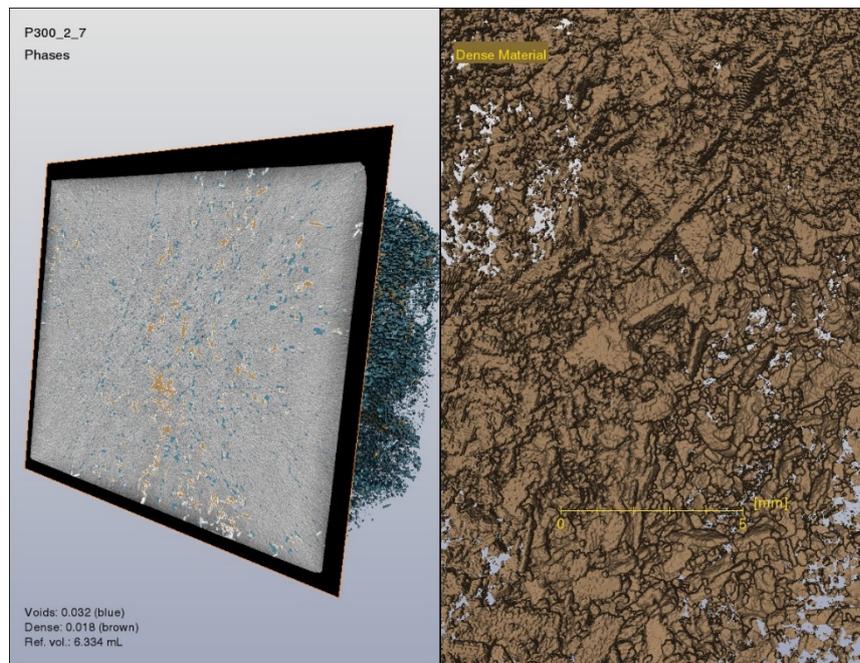


Abbildung 115 Modalanalyse der Probe P300 2/7 bezüglich Porosität, Halit und dichtem Material.

Anlage 7.1.3.2 Bewertung der Porengrößen

Grundlage für die quantitative Auswertung der CT-Daten ist die oben genannte Thickness Map (Abbildung 111). Man kann sie interpretieren als den am Ort des Voxels wirksamen minimalen Krümmungsradius eines Objekts. Über die Young-Laplace-Gleichung ergibt sich so eine direkte Beziehung zu Quecksilber-Kapillardruckkurven.

Selbstverständlich unterscheidet sich die physikalische Bedeutung grundlegend: Die CT-Radienverteilung gibt direkt die Geometrie der porösen Bereiche wieder. Gewissermaßen würde dies bedeuten, das Quecksilber jeweils in die Zentren der Poren zu injizieren. Dadurch bleiben die Aspekte der Konnektivität – Zugänglichkeit von Volumenelementen – außer Betracht. Dagegen spielen sie für die Quecksilberintrusion im Kapillardruckexperiment oft eine entscheidende Rolle, weil große Poren gewöhnlich nur über Engstellen (Hälse) zu erreichen sind.

Im Falle von Rissen ist dieser Konnektivitätseffekt möglicherweise weniger erheblich, so dass eine grobe Vergleichbarkeit der Resultate von MIP und CT gegeben ist. Für einen genaueren Vergleich müsste eine bildanalytische Konnektivitätsanalyse durchgeführt werden, die gewissermaßen die Injektion eines nichtbenetzenden Fluids nachempfunden (z.B. Bestimmung eines Perkolationsclusters in Abhängigkeit vom Dickenparameter). Im vorliegenden Fall sind die Rissweiten und ihre Streubreite so gering, dass von einer solchen Analyse keine sinnvollen Ergebnisse zu erwarten sind – der bildanalytisch detektierbare Porenraum ist für die MIP als erreichbar anzusehen.

Größere Unsicherheit hat das Ergebnis der Segmentierung und ihre Nachbearbeitung. Die erste, vorläufige Analyse ergab eine Maximalabschätzung der Porosität, die deutlich oberhalb der MIP-Porosität lag. Dies ist durch die Inhomogenität des Hintergrundes und Rauschen bedingt. Signifikant ist die CT-Porenradienverteilung bezüglich großer Radien (etwa $> 50 \mu\text{m}$), weil sich größere Radien sicher segmentieren lassen. Somit ist auch der maximale Porenradius ein signifikanter Schwellwert. In diesem Größenbereich liegen dagegen die größten Unsicherheiten der MIP, weil der Injektionsdruck sehr gering und uneinheitlich ist (hydrostatischer Druckgradient).

Konkavitäten einer Probenoberfläche spielen gewöhnlich keine große Rolle bei der Beurteilung von Quecksilber-Kapillardruckkurven, nämlich wenn die Probenoberfläche verhältnismäßig glatt und das Porenvolumen groß im Verhältnis zur Oberflächenrauheit ist. Wenn das Porenvolumen allerdings gering ist, kann sich die Oberflächenrauheit auf das

Ergebnis auswirken, weil sich der Quecksilber-Meniskus mit steigendem Druck zunehmend an die Oberfläche anlegt und somit Porosität vortäuscht.

Die Washburn-Gleichung gibt den Zusammenhang zwischen dem Kapillardruck und dem Kapillarradius wieder. Es ist dabei nicht entscheidend, dass es sich um eine zylindrische Kapillare handelt, sondern dass die Kontaktfläche eine Krümmung mit einem charakteristischen Radius r aufweist, der vorrangig durch den minimalen Krümmungsradius gegeben ist (s. Young-Laplace-Gleichung für beliebig gekrümmte Flächen). Das Volumeninkrement pro Druckstufe (ΔV als Funktion von Δp) gibt den Volumenanteil pro zugehöriger Radienklasse an.

Gewöhnlich wird für die Berechnung des Volumens ein Kapillarbündel mit Einheitslänge als Modell angenommen. Wenn anstelle dieser Kapillaren Riefen in der Oberfläche angenommen werden, ändert dies nichts an der Berechnung des Volumenanteils der jeweiligen Klasse, nur an der Anzahl der Elemente.

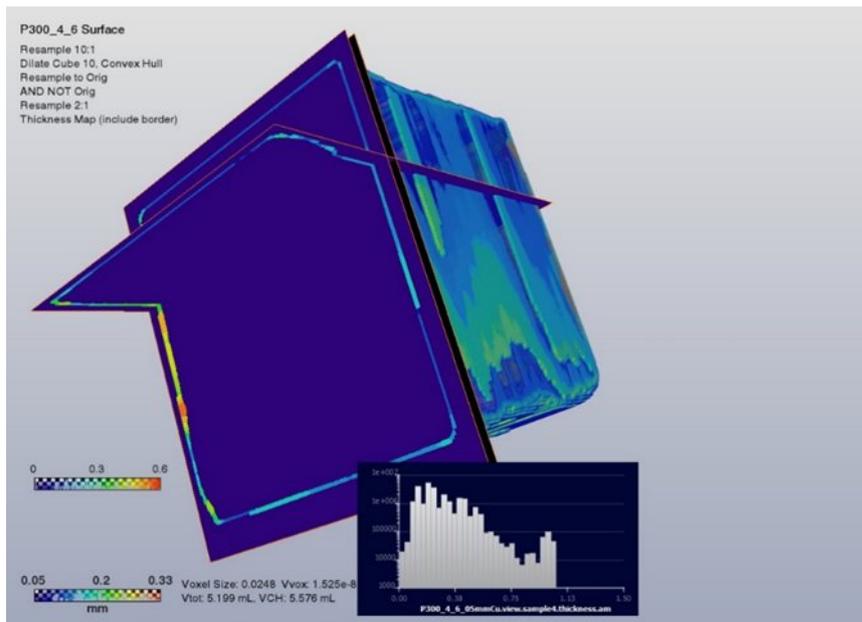


Abbildung 116 Thickness Map des Rauheitsvolumens zur Abschätzung des Rauheitsanteils n_{surf} an der MIP-Porosität.

Zum Vergleich kann die Oberfläche der Probe mit einem anderen Verfahren untersucht werden; hier wird diese Außenfläche aus der CT abgeleitet (Abbildung 116). Die Bestimmung des Krümmungsradius solcher Riefen in der Oberfläche aus CT-Daten ist aufwändig, weil die Bearbeitung mit möglichst hoher Auflösung über die gesamte Probe erfolgen sollte. Zunächst muss das gesamte Probenvolumen segmentiert werden. Daraus muss ein geglättetes möglichst konvexes minimales Volumen erzeugt werden, das dieses gesamte Volumen umhüllt („convex hull“), aber letztlich zu einem gewissen Grad willkürlich ist. Die Dickenverteilung des Differenzvolumens entspricht dann der gewünschten Radienverteilung des Rauheitsvolumens, wenn sie mit Hilfe von Kugelelementen als Thickness Map gemessen wird.

Die maximalen CT-detektierten Porengrößen betragen 200 μm (Abbildung 117). Darüber sind keine Poren im Innern der Probe nachweisbar. Wären größere Poren vorhanden, dann wären sie mit CT sicher erkennbar. Volumenanteile mit größeren Radien bis 1 mm sind aber im einhüllenden Rauheitsvolumen vorhanden, also auf die Oberflächenrauheit der Probe zurückzuführen.

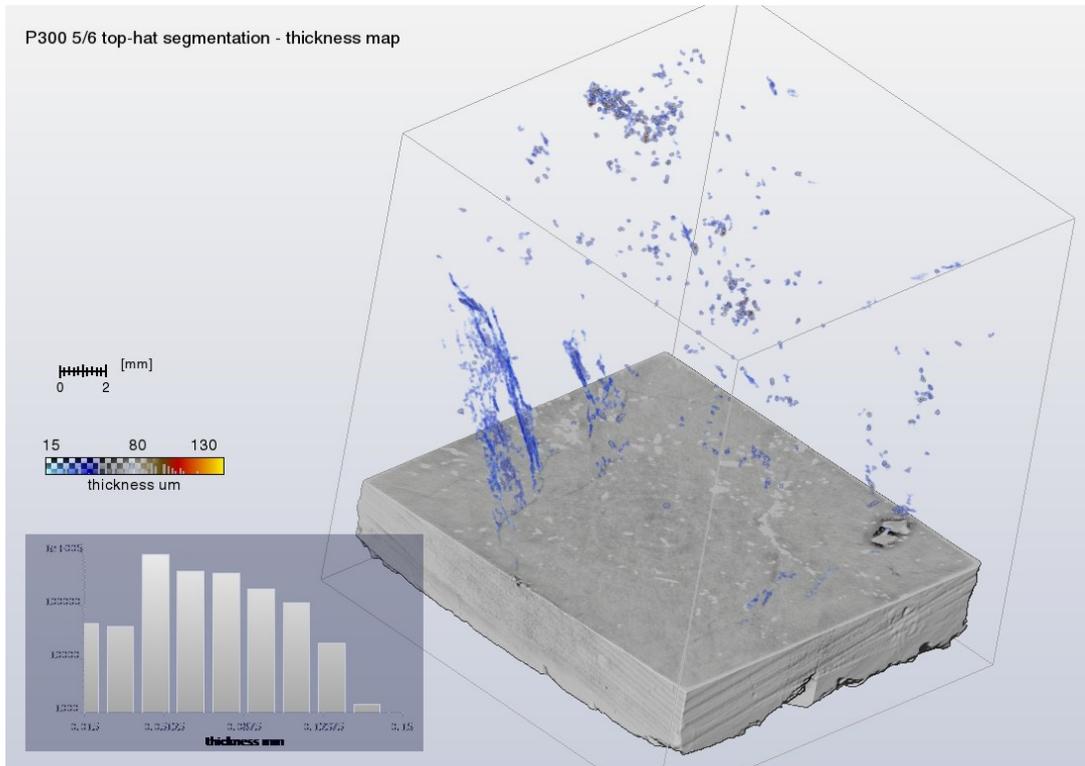


Abbildung 117 Bestimmung der Porenradienverteilung mittels Thickness Map der segmentierten CT-Poren (P300 5/6).

Im Gegensatz zur sicheren Detektion und Abgrenzung großer Poren sind unterhalb von etwa 30 μm die CT-Pososimetriedaten unsicher, weil die Voxelgröße 12 μm beträgt und die Detektion dadurch schwierig ist. Unterhalb der Voxelgröße ist keine Segmentierung von Poren möglich, aber lokal erhöhte Porosität könnte zu einem geringeren Grauwert führen. Fehldetektion scheinbarer Poren durch Bildrauschen und zu große Abmessungen der detektierten Strukturen durch einen zu weiten Detektionsbereich sind im Größenbereich unter 30 μm daher möglich. Dagegen ist die Nicht-Detektion vorhandener Strukturen in der gleichen Größenklasse eher unwahrscheinlich. Insgesamt wird die Porosität also durch CT eher überschätzt.

Die Ergebnisse der CT erlauben eine kritische Beurteilung der MIP-Daten (Abbildung 118):

Für die Messung im großen Makroporenbereich ($> 0.1 \text{ mm}$) ist eine sehr genaue Erfassung des Druckes durch das Porosimeter erforderlich. Außerdem ist der Druckgradient über die Probe im Vergleich zum Systemdruck erheblich und somit die Zuordnung der Kapillargröße ungenau. Der große Anteil scheinbar vorhandener großer Poren weist darauf hin, dass diese Strukturen direkt zugänglich sind. Dagegen wäre ein großer Volumenanteil im Bereich sehr kleiner Poren in Verbindung mit Hysterese und residuellem Quecksilbergehalt (ink bottle effect) der Kapillardruckkurve ein Hinweis auf falsch zugeordnete größere Poren, die über kleine Poren („Hälse“) gefüllt werden. Es hat sich gezeigt, dass der Bereich der fraglichen großen MIP-Poren oberhalb von 0.2 mm mit dem Bereich der mittels CT ermittelten Oberflächenrauheit übereinstimmt.

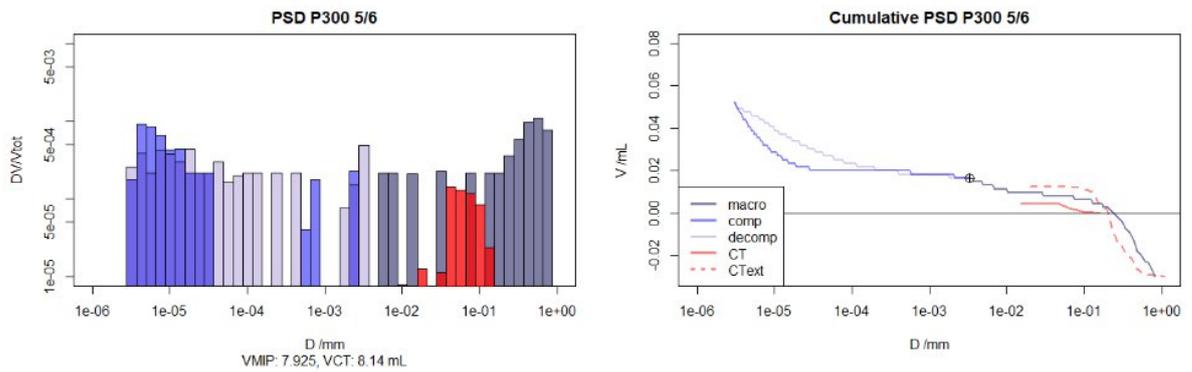


Abbildung 118 Überlagerung der CT-Porosimetrie mit MIP-Daten, links Porenradienverteilung, rechts Summenkurven, Probe P300 5/6. Der Verlauf der Makroporen folgt bis hinunter zu einem Radius von 0.2 mm weitgehend der mittels CT ermittelten scheinbaren Porosität nsurf aufgrund der Rauheit der äußeren Oberfläche. Unterhalb von 0.2 mm bis zur Auflösungsgrenze stimmen dagegen die CT- und MIP-Daten weitgehend überein. Bei dieser Probe wurden mit CT keine Poren mit Radius > 0.2 mm detektiert.

Wenn der Volumenanteil dieser oberflächlichen Strukturen von den MIP-Daten abgezogen wird, ergibt sich im Überlappungsbereich Übereinstimmung zwischen der CT-Porenverteilungen und den MIP-Daten. Der Volumenanteil der Rauheit beträgt etwa 0.03 und ist somit erheblich (bei einer MIP-Gesamtporosität von ca. 0.05). Wegen der willkürlichen Festlegung des Glättungsgrades der einhüllenden Oberfläche ist aber nur bedingte Vergleichbarkeit gegeben. Das tatsächliche Porenvolumen kann besser durch Ausblendung des Volumenanteils mit Radien > 0.2 mm bzw. der oberen Begrenzung der Verteilung durch die maximal mittels CT erkennbaren Porenradien festgelegt werden.

Bei den mittels CT detektierbaren Poren handelt es sich überwiegend um feine Risse mit einer Weite unter 20 µm und einen geringen Volumenanteil oberhalb von 100 µm. Die MIP-Porenradienverteilungen zeigen zwischen 0.1 µm und 20 µm nur einen geringen Porenanteil im Bereich von 0.01.

Erst unterhalb von etwa 20 nm nimmt der Porenanteil in der MIP mit abnehmender Porengröße wieder zu. Auch diese Zunahme muss kritisch betrachtet werden. Es ist während des Kompressionszyklus von verzögerter Füllung der gemäß Young-Laplace-Gleichung zugeordneten Poren auszugehen, sogar irreversible Schädigung der Probe („Hydrofracking“) durch unausgeglichene Porendruck ist möglich. In diesem Bereich müssten die MIP-Daten durch Gasadsorptionsmessungen verifiziert werden. Allerdings tragen Poren unter 100 nm Weite, bei denen es sich möglicherweise um Korngrenzen handelt, kaum zum Transport bei.

Als Ergebnis der CT-Untersuchungen konnte kein Volumenanteil mit Poren > 200 µm nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass scheinbar größere Porenklassen der MIP durch die Rauheit der Probenoberfläche verursacht werden.

Anlage 7.2 CT-Untersuchungen am MgO-Beton

Anlage 7.2.1 Fragestellung

Es handelt sich um die Charakterisierung des Baumaterials bezüglich der detektierbaren Porosität. Dies ist – wie beim Wirtsgestein – im Vergleich mit MIP-Daten zu interpretieren, vor allem in Hinblick auf die Durchlässigkeit.

Anlage 7.2.2 Methode

Es wurden vier zylindrische Proben vom Projektpartner IBeWa hergestellt und vor der MIP-Messung röntgenographisch aufgenommen (Aufnahmeparameter: Quelle 170 kV, 69 μ A, Filter 1.5 mm Cu, Voxelgröße 12.5 μ m).

Die Tomogramme zeigen klar erkennbare und gut segmentierbare Poren. Ebenfalls segmentierbar ist die Zuschlagkörnung. Weil die Erkennbarkeit der Phasen gut ist, konnten Standardauswertemethoden eingesetzt werden.

Die Tomogramme wurden gefiltert mittels non-local-means-Filter. Poren, Körner und Zement wurden mit Hilfe eines Watershed-Algorithmus segmentiert. Aufgrund der geringen Probengröße wurde auf die Bestimmung der Korngrößenverteilung verzichtet. Die Porengrößen wurden dagegen mittels Thickness-Map bestimmt.

Nach der CT-Messung wurden von IBeWa MIP-Messungen veranlasst.

Anlage 7.2.3 Ergebnisse

Es lässt sich aus der Watershed-Segmentierung ein grober Modalbestand (bezogen auf das Probenvolumen) ableiten.

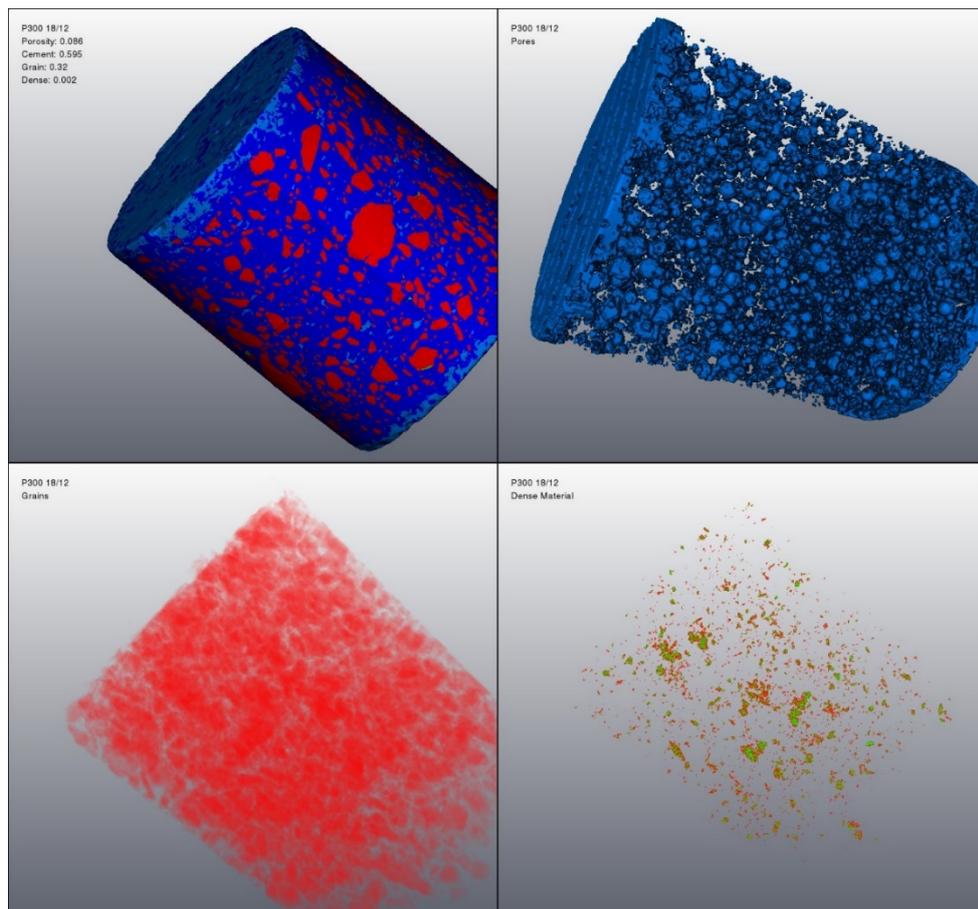


Abbildung 119 Modalbestand der Probe P300 18/12 aus der Watershed-Segmentierung der CT-Aufnahme. Oben links: Volumenrendering (blau: Zement, hellblau: Poren, rot: Körnung), oben rechts: Poren, unten links: Zuschlagkörnung, unten rechts: dichte Bestandteile.

Der Volumenanteil der Poren n_{CT} , des Zements, der Körnung, und vereinzelter dichter Bestandteile (Metall?) ist in Tabelle 30 aufgeführt.

Tabelle 30 CT-Modalbestand des Baustoffs (A1-Basisrezeptur)

Probe	Porosität n	Zement	Körnung	dichte Anteile
P300 18/9	0,060	0,630	0,310	0,001
P300 18/10	0,070	0,590	0,320	0,010
P300 18/11	0,056	0,600	0,340	0,002
P300 18/12	0,086	0,595	0,320	0,002
Mittel	0,068	0,604	0,323	0,004

Auffällig sind die blasenförmigen und gleichmäßig verteilten Poren mit einem einheitlichen Radius von etwa 1 mm, die in Abbildung 120 als isolierte Gebilde erscheinen. Tatsächlich findet sich dieses Häufungsmaximum in den Porenradienverteilungen wieder.

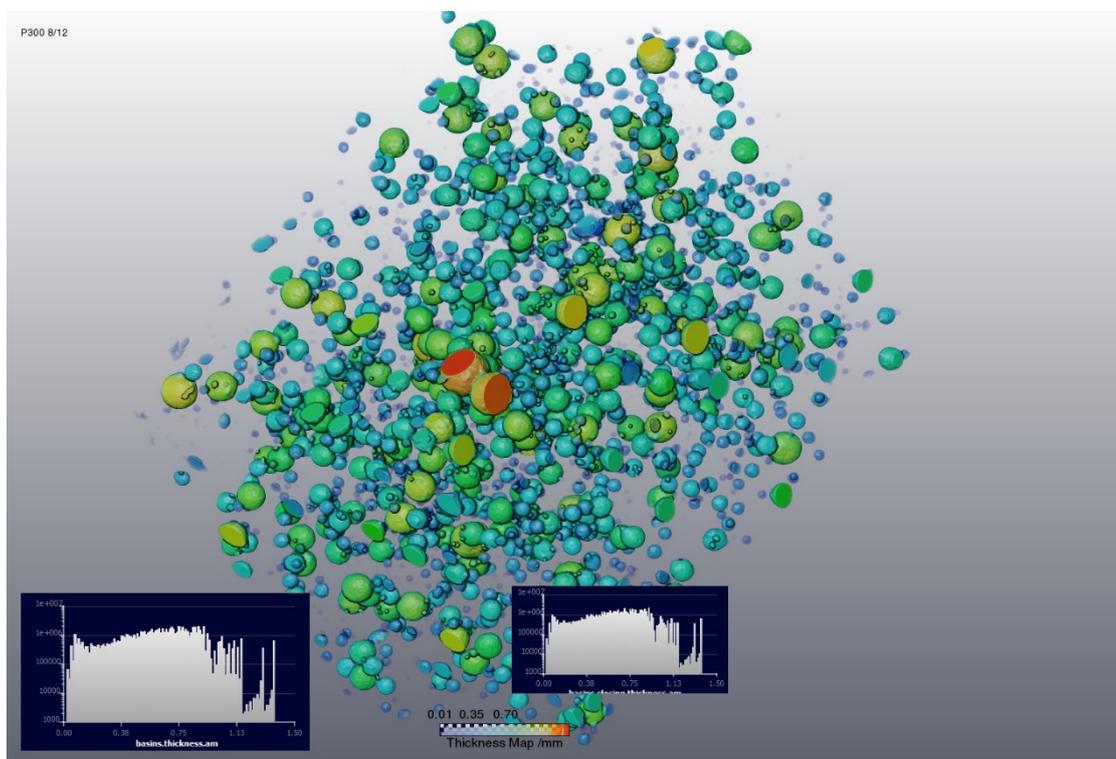


Abbildung 120 Thickness Map der Poren von P300 18/12 zur Bestimmung der Porenradienverteilung.

Im Überlappungsbereich stimmen MIP- und CT-Radienverteilungen gut überein (Abbildung 121). Diese Übereinstimmung wäre nicht zu erwarten, wenn die Blasen generell unverbunden wären. Zwar ist auch in diesem Fall ein Einfluss von oberflächlichen Strukturen auf die MIP-Porenradienverteilung möglich, aber nicht in so großem Ausmaß. Weil diese Poren für Quecksilber demnach direkt zugänglich sein müssen – sonst würden sie dem Radius des Verbindungsweges zugeordnet – sollte davon ausgegangen werden, dass im Größenbereich über 10 μm Verbindungswege bestehen, die allerdings durch CT nicht detektiert wurden und somit hypothetisch sind.

Kleinere Poren werden durch MIP mit einem erheblichen Volumenanteil detektiert. Wahrscheinlich handelt es sich ebenfalls um Porenhäse, die einen Radius im Bereich des jeweiligen Modalwertes (0.1 μm bis 1.0 μm) haben, und denen das weitaus größere Volumen der größeren Blasen zugeordnet wird. Darauf deutet die sehr starke Hysterese bzw. der am

Ende der Dekompression verbleibende Quecksilbergehalt hin (Differenz zwischen Kompressions- und Dekompressionsast in Abbildung 121). Eine weitergehende Erläuterung zu diesen Befunden ist nachstehend gegeben.

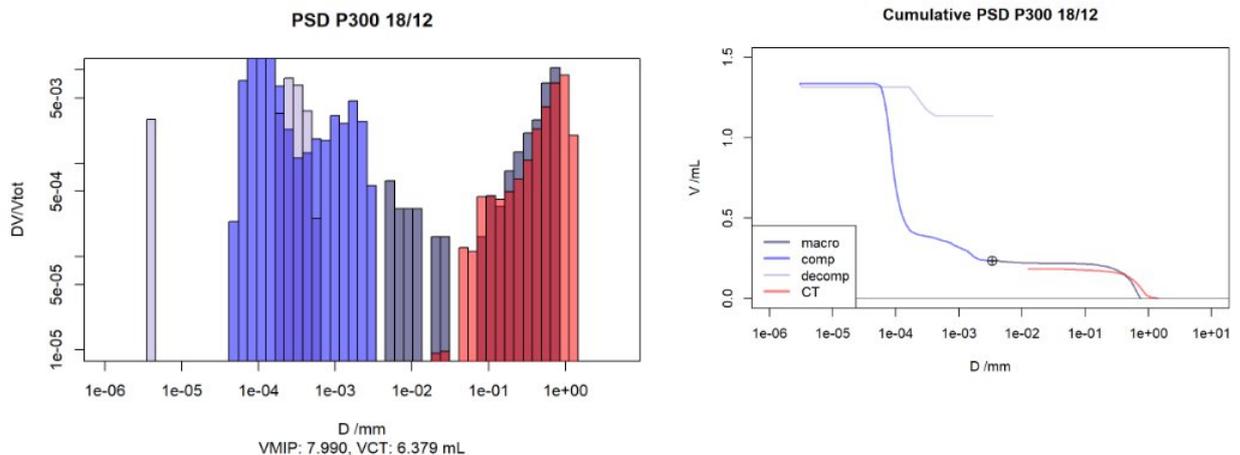


Abbildung 121 Überlagerung der CT-Porosimetrie mit MIP-Daten, links Porenradienverteilung, rechts Summenkurven, Probe P300 18/12. Der Verlauf der Kurven von MIP and CT-Analyse stimmen weitgehend überein. Auffällig ist der hohe residuelle Quecksilbergehalt, der nach der Dekompression in der Probe verbleibt.

Entscheidend für die Radienzuordnung der MIP gemäß der Washburn-Gleichung ist der kleinste Radius, der überwunden werden muss, um ein gewisses Porenvolumen zu füllen. Grundsätzlich sind MIP-Radienverteilungen also verzerrt durch Porenbäuche mit großem Radius, die aber nur über engere Porenhälse erreicht werden können und somit dem jeweiligen kleinen Radius zugeordnet werden. Gegenüber der geometrischen Größenverteilung erhöht sich dadurch der Volumenanteil kleiner Poren zu Lasten des Volumenanteils größerer Poren. Die Füllung der Porenbäuche über engere Hälse bewirkt außerdem eine Hysterese der Kapillardruckkurven und eine irreduzible Restsättigung mit Quecksilber, weil die Porenbäuche bei der Dekompression sich nicht weiter entleeren, wenn der Kapillardruck der Hälse unterschritten wird.

Die MIP-Radienverteilung weicht somit von der geometrischen Radienverteilung ab. Sie bildet aber die Transportwirksamkeit des Porenraums besser ab, weil die Druck- und Fließratenverteilung im Porenraum vor allem durch die Engstellen geprägt ist. Dagegen gibt die geometrische CT-Porenradienverteilung das Volumen der großen Poren – und damit das Speichervolumen – korrekt wieder.

Im Überlappungsbereich von 10 μm bis 1 mm stimmen MIP- und CT-Radienverteilungen gut überein (Abbildung 121). Diese Übereinstimmung wäre nicht zu erwarten, wenn die Blasen generell unverbunden wären. Weil sie demnach für Quecksilber direkt zugänglich sein müssen – sonst würden sie dem kleineren Radius des Verbindungsweges zugeordnet – muss davon ausgegangen werden, dass Verbindungswege bestehen, die durch CT nicht detektiert wurden. Zwar ist auch bei diesem Material, dem MgO-Beton, wie bei den Halit-Würfeln, ein Einfluss von oberflächlichen Strukturen auf die MIP-Porenradienverteilung möglich, aber nicht in so großem Ausmaß. Außerdem ist die Oberfläche der zylindrischen Proben glatter.

Das Häufigkeitsmaximum (Modalwert) der MIP liegt im Bereich von 0.1 μm bis 1.0 μm und somit unterhalb des Auflösungsvermögens der CT von ca. 10 μm . Kleinere Poren unterhalb der CT-Auflösung werden durch MIP mit einem erheblichen Volumenanteil detektiert. Wahrscheinlich handelt es sich ebenfalls um Porenhälse mit einem Radius im Bereich des Häufigkeitsmaximums der MIP, denen das weitaus größere Volumen einiger Blasen zugeordnet wird. Darauf deutet die sehr starke Hysterese bzw. der am Ende der Dekompression verbleibende Quecksilbergehalt hin (Differenz zwischen Kompressions- und Dekompressionsast in Abbildung 121).

Als Fehlerquelle der MIP ist nicht völlig ausgeschlossen, dass die schnelle Durchführung der Messung keine Equilibrierung des Porendrucks bei höheren Druckstufen erlaubte. Dadurch

würde sich der Anteil sehr kleiner Poren scheinbar ebenfalls erhöhen, weil das injizierte Volumen einem zu großen Druck zugeordnet würde.

Anlage 7.2.4 Untersuchung des Schaumes

Während der Betonage entstand Schaum, der sich vor allem ungünstig auf den Kontakt benachbarter Schichten nach einer Betonierpause auswirkt. Seine Ursache ist derzeit ungeklärt.

Ein kleines Handstück wurde röntgentomographisch untersucht. Die Struktur des Schaums ist gekennzeichnet durch kugelförmige Blasen, die durch Zement-Menisken abgegrenzt sind. Einzelne Feinpartikel mit typischem Durchmesser von 0.1 mm sind in den Menisken zu finden. Diese Feinpartikel haben aber offenbar keinen Einfluss auf die Blasenstruktur. Die Ergebnisse wurden aus Abbildung 122 und Abbildung 123 abgeleitet und finden sich in Tabelle 31.

Tabelle 31 Strukturelle Eigenschaften des Schaumes aus der CT-Analyse (modifizierte A1-Rezeptur)

Porosität	0,800	-
Zementanteil	0,200	-
Dichte Bestandteile (Körnung)	0,002	
Porengröße	1-3	mm
Wandstärke:	0,500	mm
Korngröße (Körnung)	0,100	mm

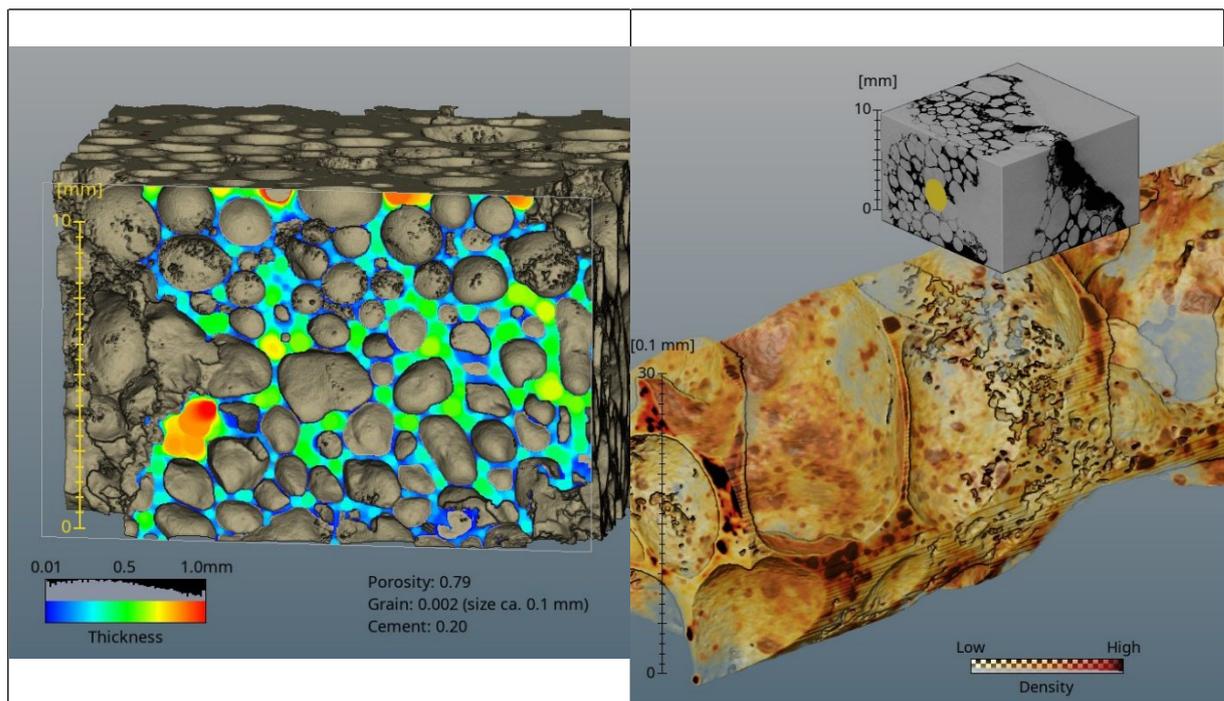


Abbildung 122 CT-Aufnahme des Schaumes mit Darstellung der Thickness Map der Zementmenisken auf einer Schnittfläche

Abbildung 123 Vergrößerte Darstellung eines zylindrischen Ausschnittes mit einem Durchmesser von 3 mm aus dem Schaum. Die Farbkodierung der CT-Dichte zeigt einzelne dichte Körner mit Durchmesser von ca. 0,1 mm im sonst homogenen Zement.

Anlage 7.3 CT-Untersuchungen am Kontakt Baustoff-Wirtsgestein

Anlage 7.3.1 Fragestellung

Der Kontakt zwischen dem Baustoff und dem Wirtsgestein spielt für die initiale Dichtheit des Bauwerks eine entscheidende Rolle. Um diese Dichtheit zu erreichen bevor sie durch die langfristige Konvergenz des Wirtsgesteins gewährleistet ist, sind Vergütungsmaßnahmen erforderlich.

Die Beurteilung des Kontaktbereichs setzt neben Durchlässigkeitsuntersuchungen in-situ und im Labor auch seine strukturelle Charakterisierung anhand geeigneten Bohrkernmaterials voraus. Sowohl die Kerngewinnung, als auch die Parametrisierung dieser inhomogenen Zone sind anspruchsvolle Aufgaben. Es gilt zu berücksichtigen:

- Inhomogenitäten im Wirtsgestein (z.B. oberflächennahe Risse),
- Hohlräume zwischen Wirtsgestein und Baumaterial,
- Inhomogenitäten im Baumaterial (z.B. lokale Fehlstellen, hohe Konzentration an Luftporen, Verteilung der Körnung).

Die Probengröße muss hinreichend groß sein, um wesentliche Inhomogenitäten zu erfassen, gleichzeitig muss das Auflösungsvermögen ausreichen, um Strukturen sicher darzustellen.

Insbesondere stellen sich folgende Fragen:

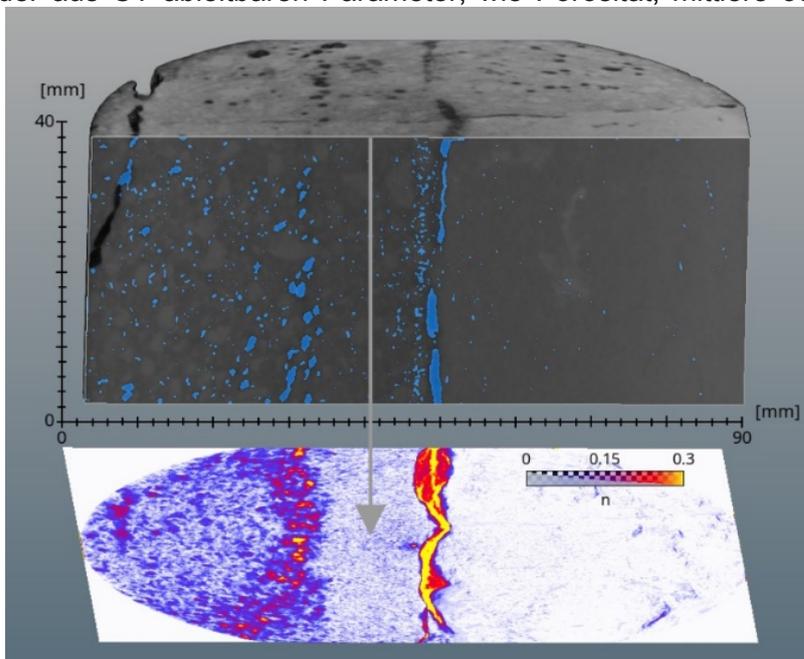
- Existiert eine Fraktionierung der Zuschlagkörnung des Baustoffs in Richtung des Kontakts, bzw. gibt es Auswirkungen der Trennfläche auf die Beschaffenheit des Baustoffs?
- Wie ist die Wechselwirkung des Baustoffs mit lokalen Fehlstellen des Untergrundes (Risse, Oberflächenstruktur)?
- Wie ist die Kontaktflächebeschaffen?
- Wie wirkt sich die Vergütung aus?

Anlage 7.3.2 Methode

Es wurden Handstücke und Bohrkern aus der Kontaktzone des Bauwerks, sowie zwei künstliche Kompositproben, die von IBeWa hergestellt wurden (P300 21/1 und P300 23/1), mittels CT untersucht. Die Probe P300 21/1 wurde vor und nach dem Injektionsversuch, der vom Projektpartner IBeWa durchgeführt wurde, gemessen.

Die CT-Aufnahmeparameter variierten in Abhängigkeit von den Probeneigenschaften. Typische Voxelgrößen waren 40 µm bis 50 µm. Aufgrund des merklichen Dichtekontrasts des Materials mit unregelmäßiger Form sind Hintergrund-Grauwertvariationen zu erwarten. Grauwertvariationen in homogenen Zonen bedürfen also der kritischen Beurteilung. Nach non-local-means-Filterung ließen sich Hohlräume und Poren dagegen gut segmentieren, soweit sie oberhalb des Auflösungsvermögens detektierbar waren. Soweit sie sich segmentieren ließen, wurde ihre Weite mit Hilfe der Thickness Map bestimmt.

Da die Trennflächen in den Proben parallel zur Zylinderachse verlaufen, lassen sich Karten der aus CT ableitbaren Parameter, wie Porosität, mittlere oder maximale Porengrößen als



Projektionen in axialer Richtung berechnen (Abbildung 124).

Abbildung 124 Kontaktzone modifizierte A1-Rezeptur/Salinar - Bestimmung der mittleren Porosität in axialer Richtung als Mittelwert-Projektion der segmentierten Poren längs des Pfeils (Pore: 1,0, Festmaterial: 0,0). Die Bestimmung der mittleren Porengröße erfolgt analog.

Anlage 7.3.3 Ergebnisse

Anlage 7.3.3.1 Kompositproben

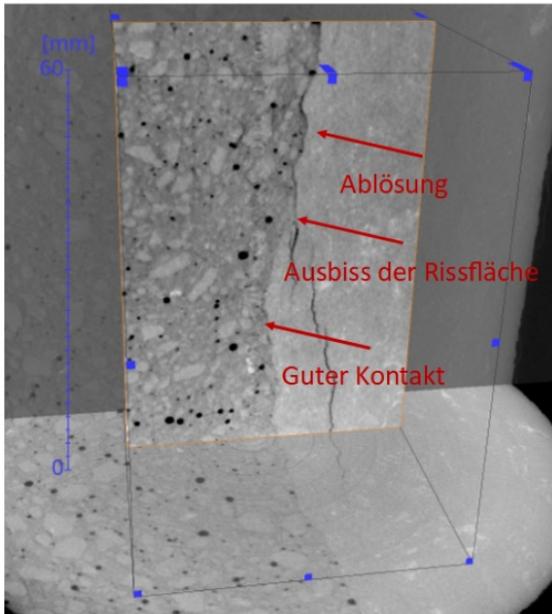


Abbildung 125 Laborkomposit P21/1 - Schema des Riss- und Fugenverlaufs.

Beide Kompositproben zeigen zum Teil gute Anbindung des Baustoffs an das Wirtsgestein und zum Teil Ablösung (Abbildung 126 und Abbildung 126). Die Spaltweite im Bereich der Ablösungszonen beträgt 0.5-1.0 mm und ihre Ausdehnung ist im Zentimeterbereich. Der Baustoff erscheint homogen, ohne Körnungsfractionierung in Richtung des Kontakts. Auch die Verteilung der Blasen ist gleichförmig, auch in der Nähe der Grenzfläche. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Probekörperherstellung so erfolgt, dass sie die Bedingungen am Stoß wiedergibt. Dagegen weist das Wirtsgestein zum Teil ausgedehnte Risse auf, deren Weite die der Kontaktfuge überschreitet (> 1.0 mm). Bemerkenswert ist, dass der Kontakt zwischen Baustoff und Wirtsgestein besonders dicht in der Nähe der Risse im Wirtsgestein ist. In Bereichen außerhalb der Einflussphäre des Risses, also dort, wo das Wirtsgestein sich makroskopisch ungestört zeigt, treten anscheinend eher Ablösungen auf (Abbildung 125).

Nach der Injektion, die in Kapitel 5.2 beschrieben ist, erfolgte eine weitere CT-Aufnahme (Abbildung 127). Aufgrund der hohen Dichte des Injektionsmittels lässt es sich nach dem Injektionsversuch in der Probe sehr gut segmentieren. Es befindet sich überwiegend in den Rissen des Wirtsgesteins, aber ausgehend vom Riss im Wirtsgestein wird auch der Kontaktbereich teilweise verschlossen. Ein Teil der Risse, nämlich gut zugängliche Bereiche mit der größten Öffnungsweite, wurde nahtlos verschlossen. Dadurch verringert sich der Volumenanteil der Zonen mit Öffnungsweite über 1 mm. Der Vergleich der Öffnungsweitenverteilung mit der Schichtdicke des Injektionsmittels zeigt, dass Rissweiten > 1.8 mm nahezu komplett gefüllt wurden und zwischen 1 und 1.8 mm mit einem signifikanten Anteil. Kleinere Hohlraumweiten werden dagegen bei dem gegebenen Druck selten gefüllt, vermutlich nur, wenn sie unmittelbaren Kontakt zu Wegsamkeiten mit großer Öffnungsweite haben.

Allerdings wird der Vergleich der Aufnahme vorher und nachher durch zwei Probleme verkompliziert:

- Während der Injektion hat sich die innere Geometrie verändert, so dass keine gute Anpassung möglich ist;
- nach der Injektion sind bisher noch nicht behebbare Rekonstruktionsartefakte (Ringartefakte) entstanden, die Segmentierungsfehler im Zentrum des Bohrkernes bewirken.

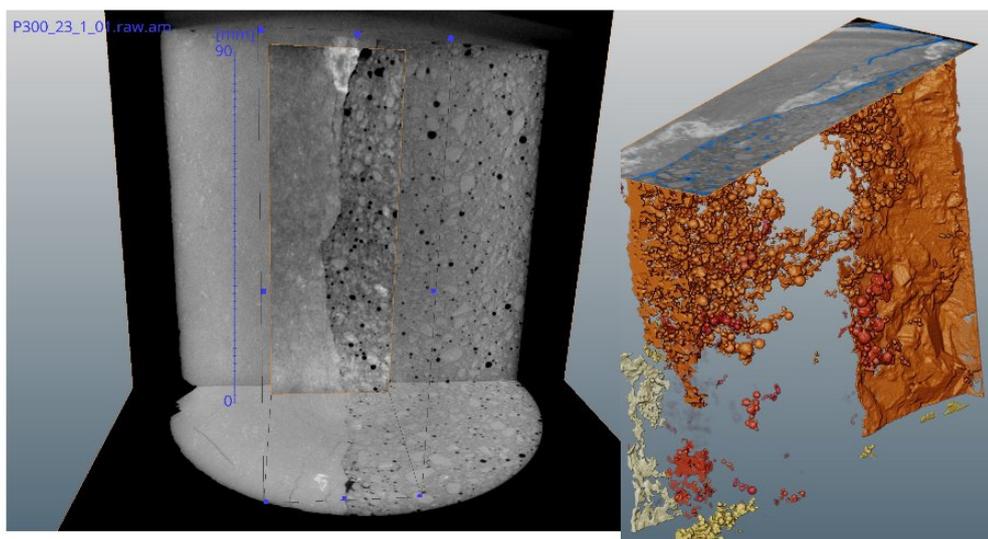
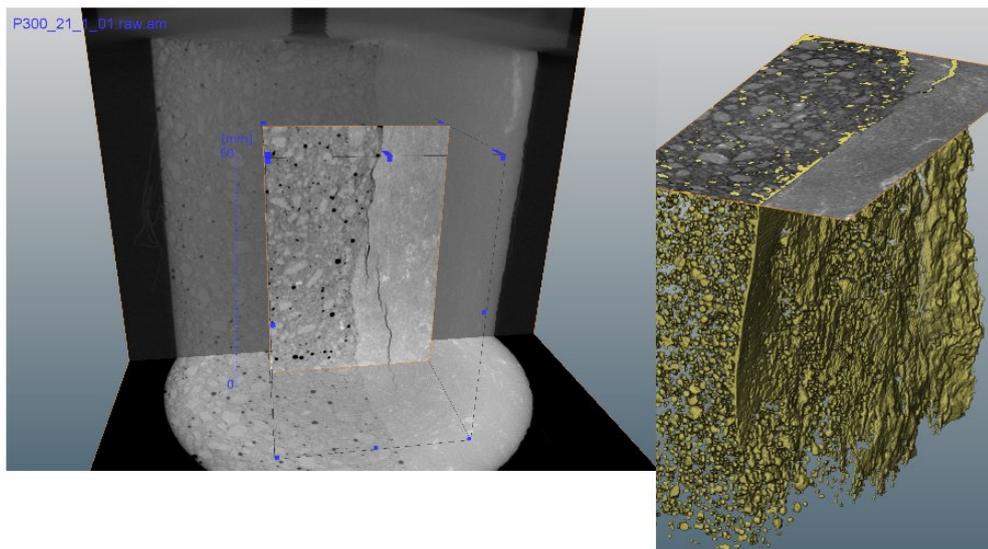
Während in Abbildung 127 die Aufnahmen vorher und nachher getrennt betrachtet wurden, wurde in Abbildung 128 trotz der problematischen Registrierung eine Überlagerung der Bilder

für den Teilbereich vorgenommen, in dem Injektionsmittel detektiert werden kann. Dafür wurde zunächst ein Teilbereich des Risses ausgeschnitten, in dem die Geometrie der Überlagerung passend erschien. Dann wurde ein erweitertes Volumen des Füllmaterials (Dilatation mit einer Kugel mit der Größe von 5 Voxeln) als Maske für die Auswahl des beeinflussten Rissvolumens festgelegt. Dieses Volumen dient – willkürlich – als Bezugsvolumen für den ursprünglichen Riss. In diesem Volumen wurde unterschieden zwischen gefüllt (rot, aus der Segmentierung des Injektionsmittels, Abbildung 128oben) und ungefüllt (blau, anfängliches Rissvolumen ohne gefüllten Anteil). Für das ursprüngliche Rissvolumen, das gefüllte und das ungefüllte Volumen wurde jeweils die Thickness Map berechnet und die entsprechenden Größenverteilungen als Histogramm und Summenkurven dargestellt (Abbildung 128, Mitte und unten).

Es fällt auf, dass sich der verbleibende ungefüllte Volumenanteil auf kleine Öffnungsweiten (unter 0.5 mm) beschränkt. Dies ist der Fall, obwohl anscheinend die größeren Porenweiten nicht komplett gefüllt wurden, da die Volumenanteile der ursprünglichen Hohlräume immer größer sind, als die Dicke der Füllung. Das würde bedeuten, dass Voxel am Rand des Risses häufig als ungefüllt erscheinen und dort als dünne Schicht erscheinen – also den kleinen Klassen zugeordnet werden. Ob dieser Effekt ein Segmentierungsartefakt aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens ist, könnte mittels gezielt entnommener kleiner Teilproben untersucht werden.

Es ist aber ebenso zu bedenken, dass einzelne Strukturen mit großem Radius bereits einen großen Volumenanteil ausmachen (Kugel mit Radius von 1 mm bedeutet 4200 Voxel). Wenn diese Kugel zum Teil gefüllt würde, würden die verbleibenden Voxel einer kleineren Klasse zugeordnet, eventuell mit nur geringfügig reduziertem Gesamtvolumen.

Insgesamt ergibt sich aus Abbildung 128, dass in den Zonen, die durch Injektionsmittel erreicht werden, eine sehr gute Vergütung erreicht wird, indem nur Poren unter 0.5 mm erhalten bleiben. Große Anteile des Hohlraumvolumens werden aber gemäß Abbildung 127 im ersten Durchgang nicht erreicht und wären im zweiten Durchgang eventuell nur über diese engen



verbleibenden Zugänge mit dem entsprechend höheren Druck erreichbar.

Abbildung 126 CT-Aufnahmen der Kompositproben vor der Injektion, oben P300 21/1, unten P300 23/1. Rechts ist die Segmentierung der Hohlräume (Poren im Beton, Risse im Wirtsgestein, offene Kontaktfläche) des blau markierten Kontaktbereichs dargestellt. Die unterschiedlichen Farben im unteren Bild stellen unverbundene Volumenelemente dar.

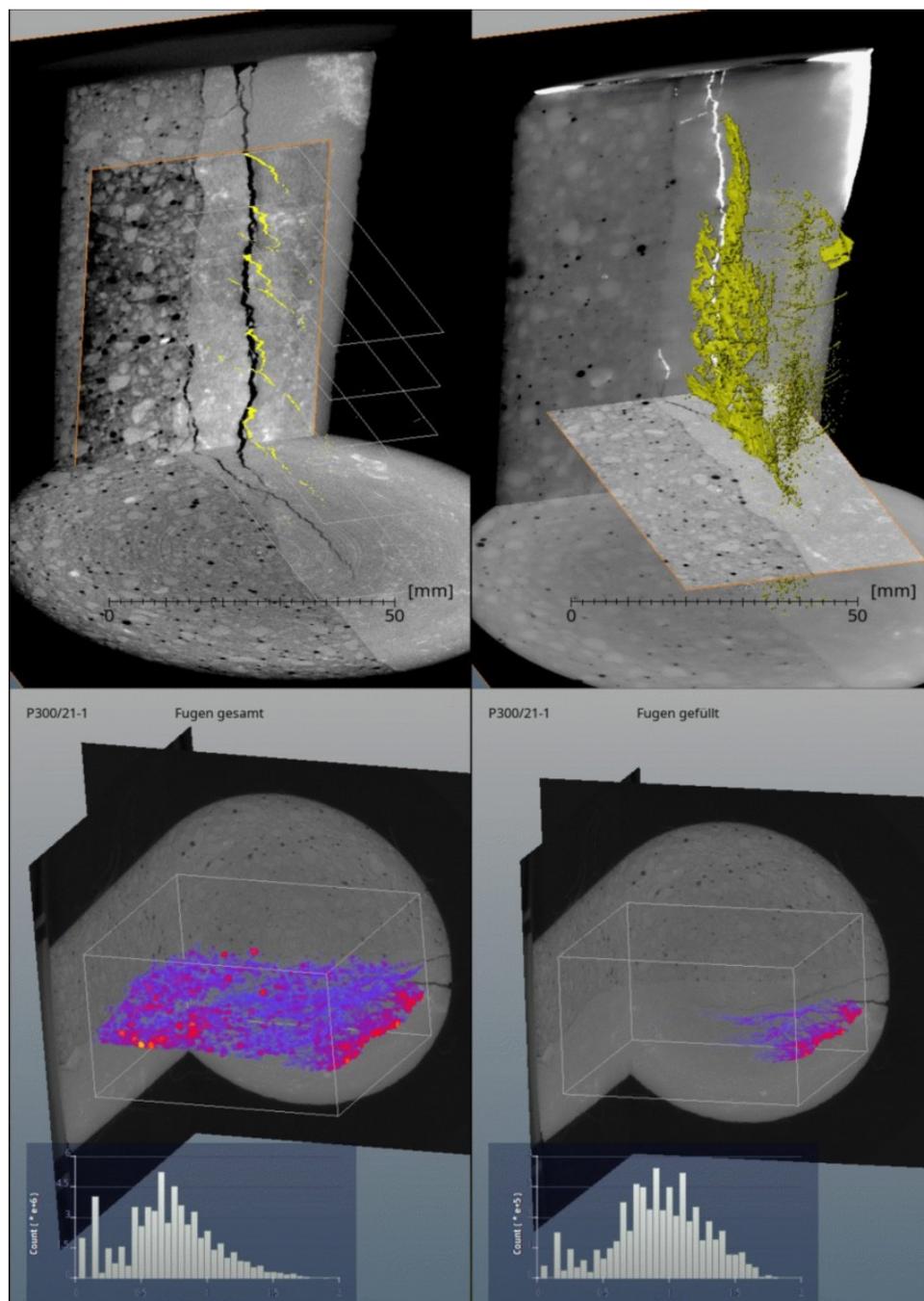


Abbildung 127 Riss- und Fugensystem der Probe P300 21/1, links vor, rechts nach der Injektion. Das Injektionsmittel ist gelb markiert. Unten links: Rissweite, rechts: Dicke der mit Injektionsmittel gefüllten Zone.

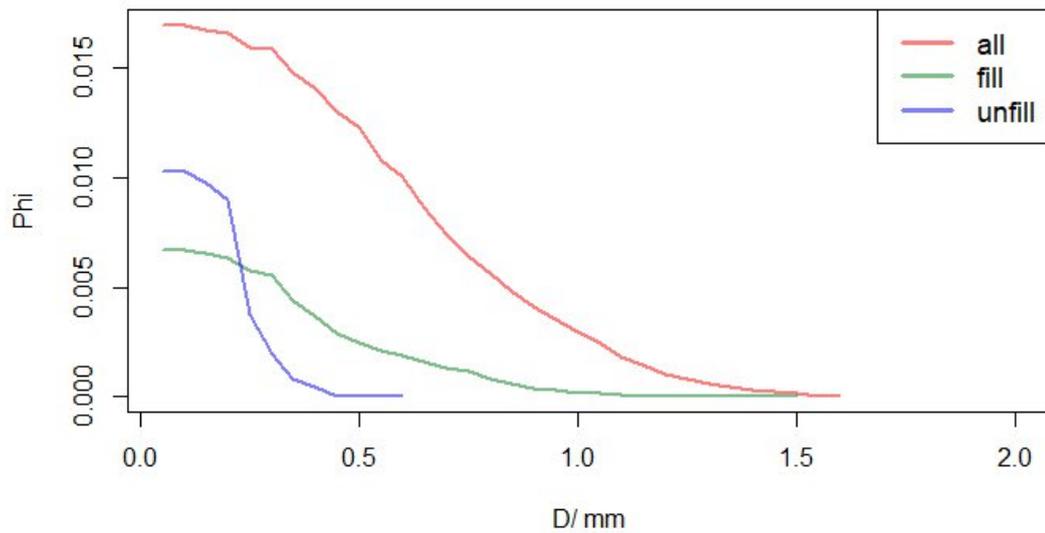
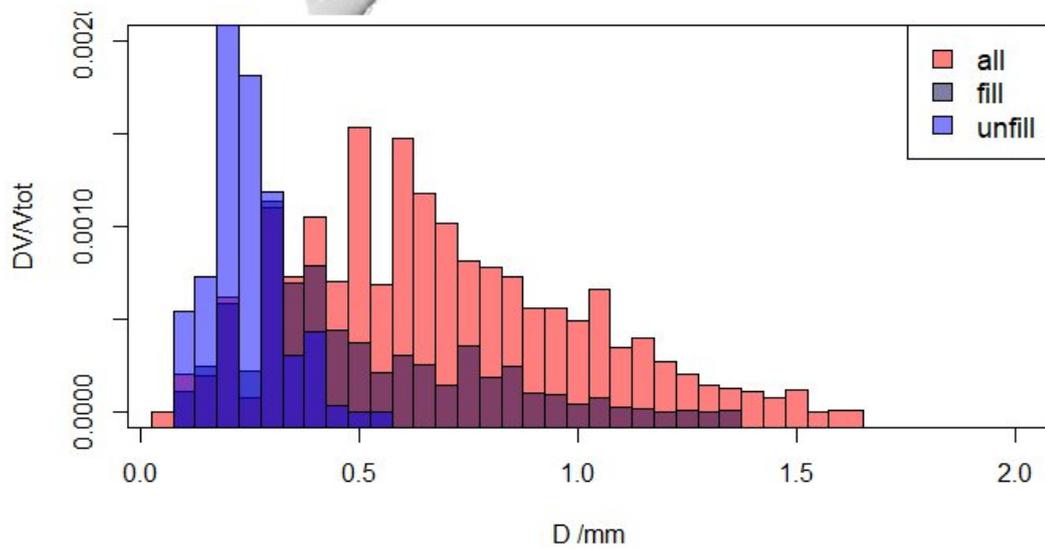
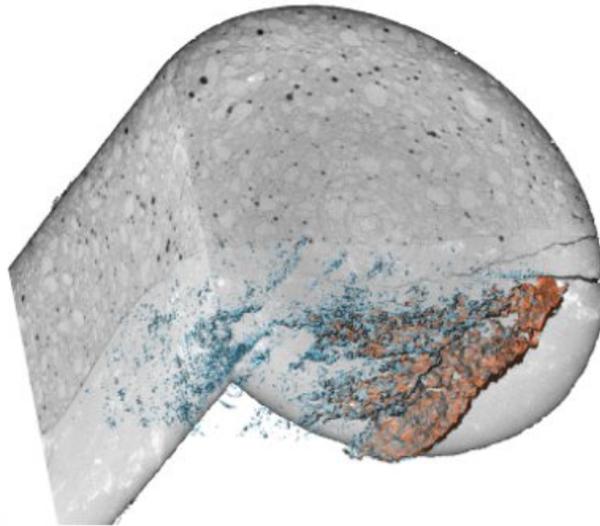


Abbildung 128 Oben: Volumenrendering des CT-Bildes in grau mit gefüllten (braun) und offen verbliebenen (blau) Hohlräumen, Mitte: Histogramm der Öffnungsweitenverteilungen (rot: ursprüngliches offenes Volumen, braun: mit Injektionsmittel gefüllter Anteil, blau: offen verbleibender Anteil (als Farbüberlagerung)). Unten: Summenkurven der Öffnungsweitenverteilungen (hier gefüllter Anteil in grün).

Anlage 7.3.3.2 Proben aus dem Bauwerk

Eine erste Probe (Handstück) aus einer Großbohrung zeigte sehr guten Kontakt zwischen Baustoff (modifizierte A1-Rezeptur) und Wirtsgestein (Abbildung 129).

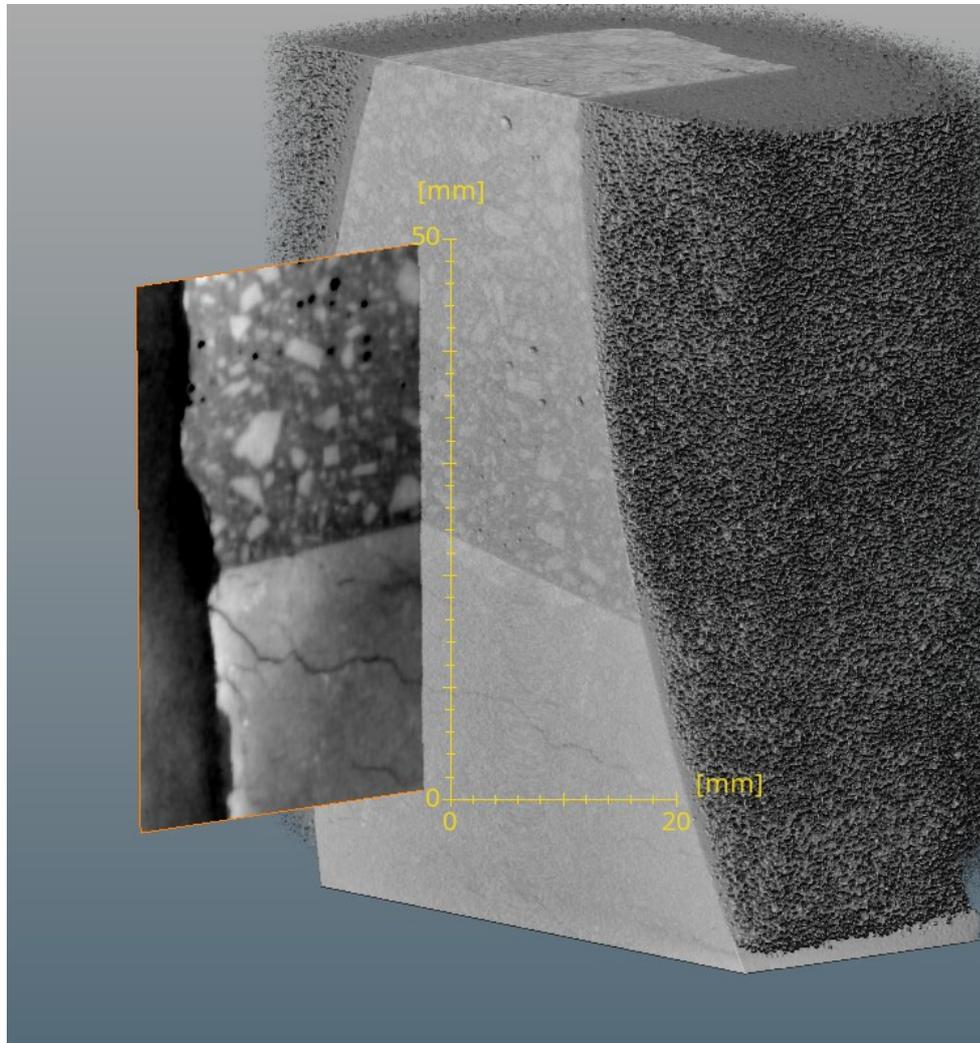


Abbildung 129 Ausschnitt aus der Kontaktzone aus einem Großbohrkern. Auffällig ist der gute Kontakt zwischen Baustoff und Wirtsgestein, während im Wirtsgestein Risse deutlich zu erkennen sind.

Weitere vier Proben des Kontakts aus der Bauwerkssohle (M1 bis M4, Abbildung 130) dagegen wiesen lokale Hohlräume am Kontakt auf, die näher untersucht wurden. Ihre Ausdehnung beträgt maximal etwa 1 cm. Die Spaltweite nimmt von M1 (maximal 1.5 mm) nach M4 (maximal 0.5 mm, lokal) ab. Aus dem Verlauf des Kontaktes lässt sich erkennen, dass M1 und M2 sich eher im Bereich einer Senke in der Sohle befinden, M3 und M4 an der Flanke einer Erhebung. Das heißt in diesem Fall tritt die Ablösung im „Tal“ auf.

Der Einfluss der Topographie der Trennfläche auf die Verteilung der Hohlräume wurde an der Probe M1 genauer untersucht (Abbildung 131). Es zeigt sich, dass die größeren Öffnungsweiten mit lokalen Vertiefungen (im Millimeterbereich) übereinstimmen, aber Ablösungen nur in einigen dieser Vertiefungen auftreten. An den Rändern der Ablösungen treten Übergangszonen mit leicht erhöhter Dichte im Vergleich zum Grauwert des Hohlraums auf (orange), die aber deutlich unter der Betondecke ist. Aufgrund der erhöhten Dichte dieser Zone kann es sich nicht um Luft handeln, vermutlich dagegen Lauge oder poröses Kristallinat.

Diese Bereiche lassen sich zwar abgrenzen, aber ihre Struktur und Dichte lässt sich aufgrund des begrenzten CT-Auflösungsvermögens nicht näher analysieren.

Die Verteilung der Porengrößen im Baustoff zeigt ein bemerkenswertes Muster, ebenso die Porosität (Abbildung 132,Abbildung 133): Nahe am Kontakt treten bei M1 und M2 bis zu einem Abstand von etwa 30 mm nur kleine und wenige Poren auf. Dann folgt eine poröse Schicht mit einer Dicke von etwa 10 mm, die eine hohe Porosität (bis 0.3) mit zugleich großen blasenförmigen Poren (Durchmesser >0.2 mm) aufweist. In weiterer Entfernung von der Kontaktfläche Sohle ist das Material homogen. In M3 und M4 ist diese Schicht dagegen weniger stark ausgeprägt. und dünner.

Zur Parametrisierung dieser Einheiten wurde die Tomogramme in diese fünf Zonen aufgegliedert und jeweils separat der Mittelwert der Porosität, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Porenradienverteilung berechnet (Abbildung 134). Unten ist in dieser Abbildung ein Porositätsprofil für die Probe M1 längs einer Schnittebene senkrecht zu den Strukturen gezeichnet. Bei dieser Probe ist die zusätzliche poröse Schicht im MgO-Baustoffs mit einem Abstand von ca. 15 mm vom Kontakt klar erkennbar. Die Porosität des Kontakts wurde ebenfalls als Mittelwert über einen umhüllenden Quader berechnet. Durch die subjektive Wahl des Quaders stellt sie eine grobe Abschätzung des Hohlraumvolumens dar.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 und Abbildung 135 als Balkendiagramme dargestellt. Es fällt die Abnahme des Hohlraumvolumens der Kontaktfläche (Fuge) von Probe M1 nach M4 auf. Die Porosität des MgO-Betons variiert weniger, allerdings wird die höchste Porosität in der porösen Schicht von M1 erreicht. Diese poröse Schicht war in den übrigen Proben nicht mehr klar erkennbar.

Unter der Porosität sind die Porenradienverteilungen dargestellt (Mittellinie mit colorierten Balken der Standardabweichung), grau ist die Dicke (D) der dichten MgO-Baustoffschicht gezeichnet. Offensichtlich korreliert diese Schichtdicke mit der Porosität und Weite (rote Balken) der Kontaktfläche. Die übrigen Parameter zeigen keine signifikante Variation.

Vermutlich handelt es sich um eine lokale Anomalie, die von M1 nach M2 abnimmt. Ein Zusammenhang mit der Sohlenstruktur und der Dynamik des Gieß- und Abbindevorgangs liegt nahe und sollte näher untersucht werden, um solche Ablösungen und Inhomogenitäten kontrollieren und vermeiden zu können.

Tabelle 32 Porositäten und mittlere Porengrößen in den fünf unterschiedlichen Zonen der Proben aus dem Kontakt zwischen Bauwerk und Wirtsgestein, außerdem Dicke (D) der dichten MgO-Zone (n.e.= nicht erkennbar).

Probe	Porosität [-]					Mittlere Porengröße [mm]					D [mm]
	MgO	MgO _{por}	MgO-dicht	Fuge	Steinsalz	MgO	MgO _{por}	MgO-dicht	Fuge	Steinsalz	
M1	0,052	0,088	0,019	0,10	0,003	0,60	0,87	0,26	1,13	0,23	18
M2	0,052	n.e.	0,008	0,06	0,001	0,79	-	0,24	0,98	0,2	14
M3	0,036	n.e.	0,010	0,05	0,002	0,71	-	0,26	0,62	0,22	9
M4	0,068	n.e.	0,007	0,02	0,0003	0,90	-	0,38	0,59	0,17	7

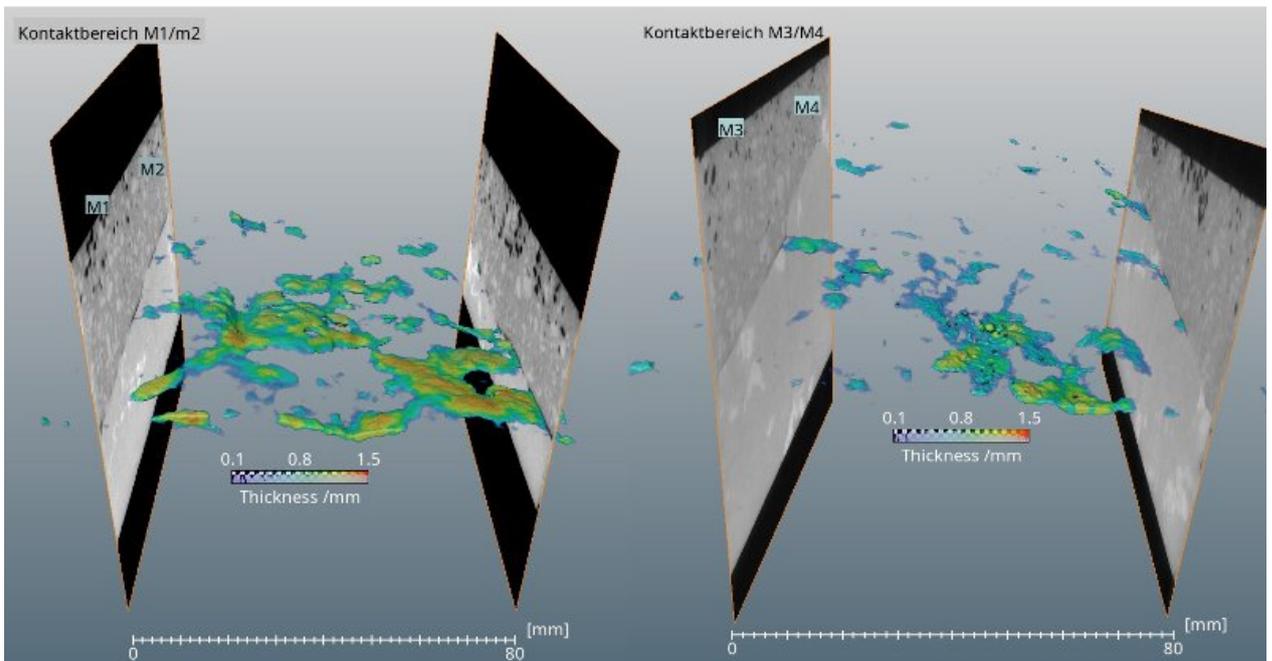
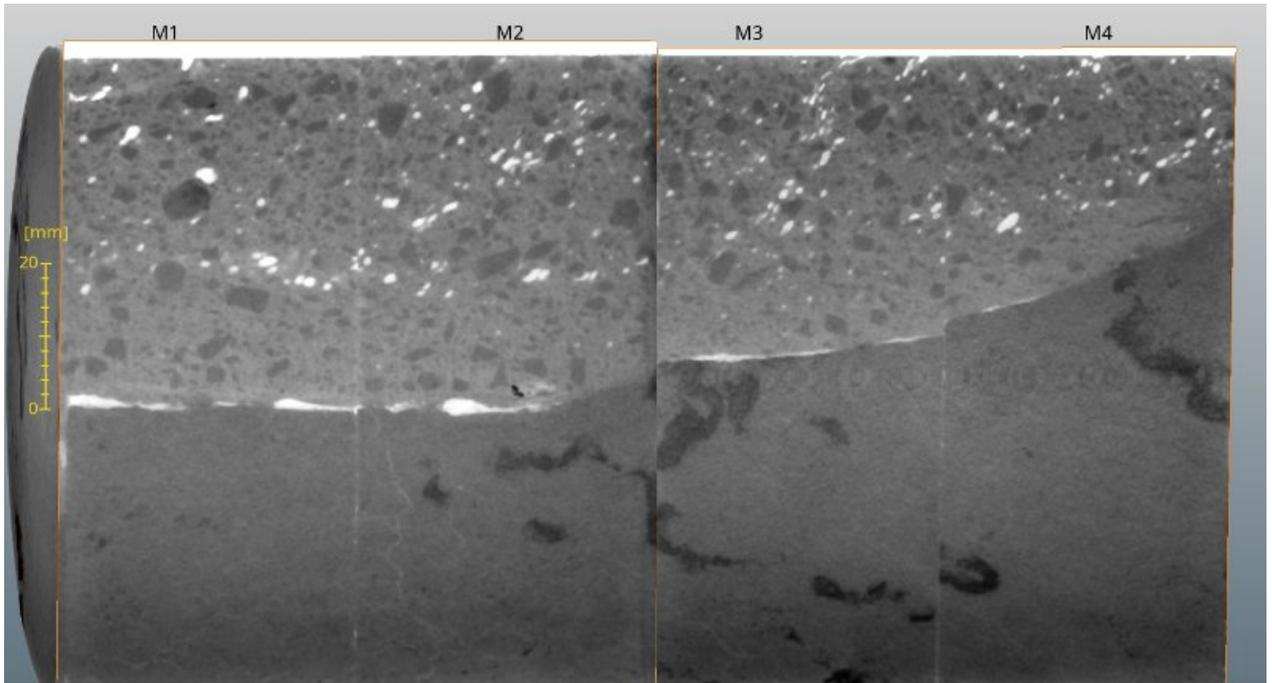


Abbildung 130 Kernscheiben aus dem Steinsalz-Baustoff-Kontakt des Bauwerks. Oben: CT-Schnitte, unten: Darstellung der Fugenweite (Thickness Map) dieser vier Proben.

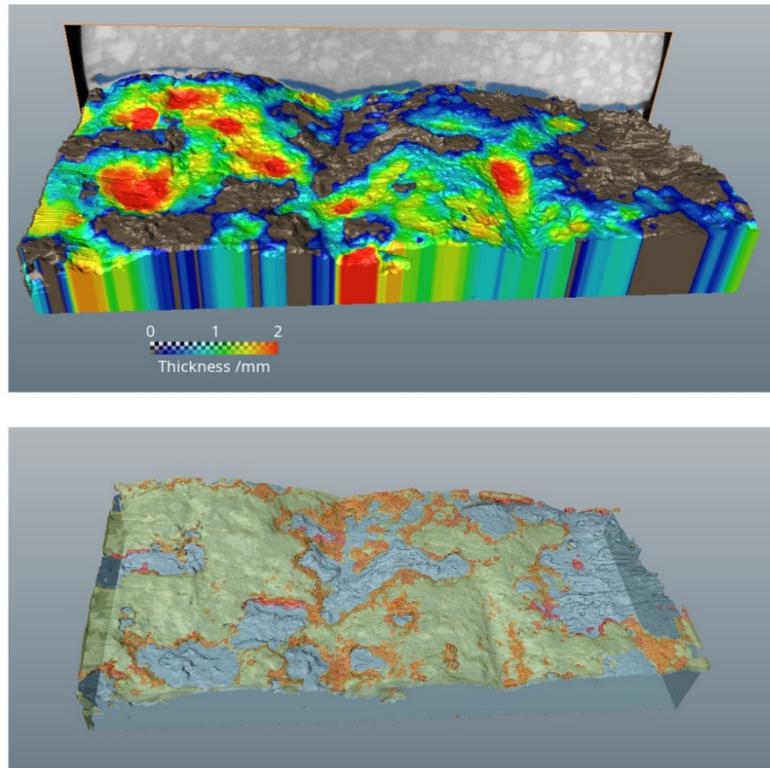


Abbildung 131 Oben: Fugenweite überlagert mit der Trennflächen-Topographie der Probe M1. Unten: Trennflächenoberfläche (hellblau), überlagert mit luftgefüllter Zone (grünlich) und mit dichterem Material gefüllten Bereichen (orange).

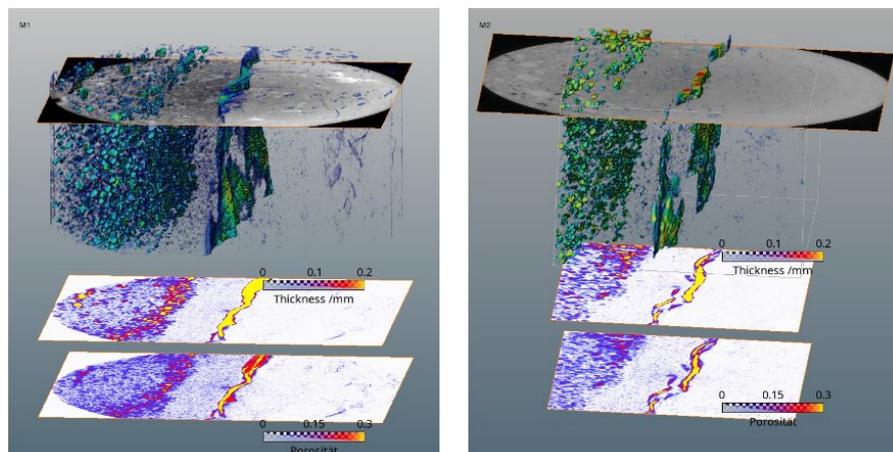


Abbildung 132 Räumliche Verteilung der Porenweiten (oben), sowie Karten der axialen Projektion der mittleren Porengröße (mitte) und der Porosität (unten) für Proben M1 und M2.

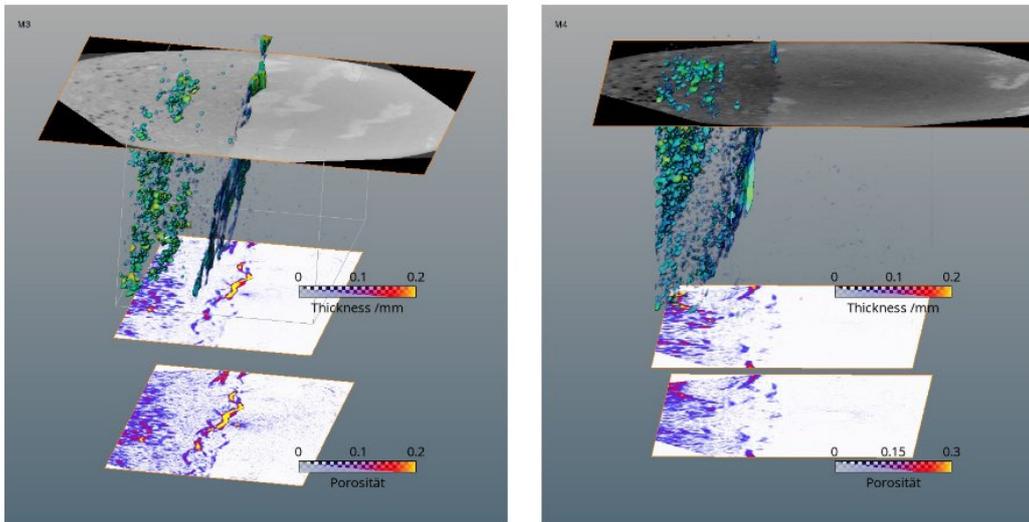


Abbildung 133 Räumliche Verteilung der Porenweiten (oben), sowie Karten der axialen Projektion der mittleren Porengröße (mitte) und der Porosität (unten) für Proben M3 und M4.

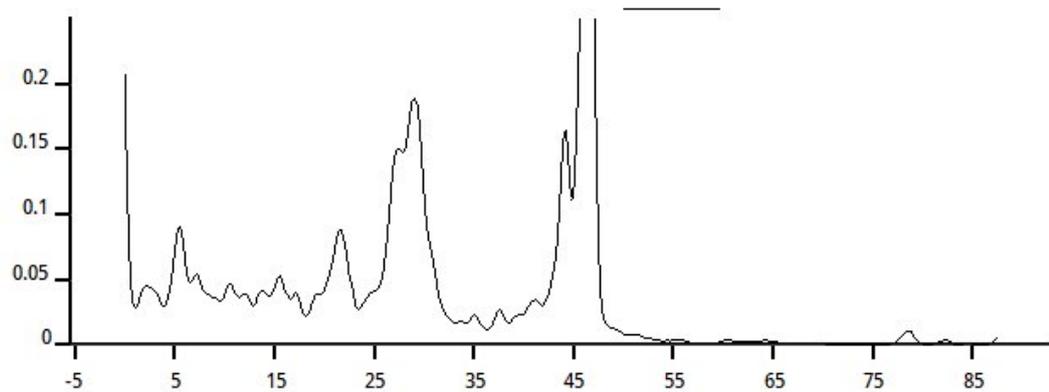
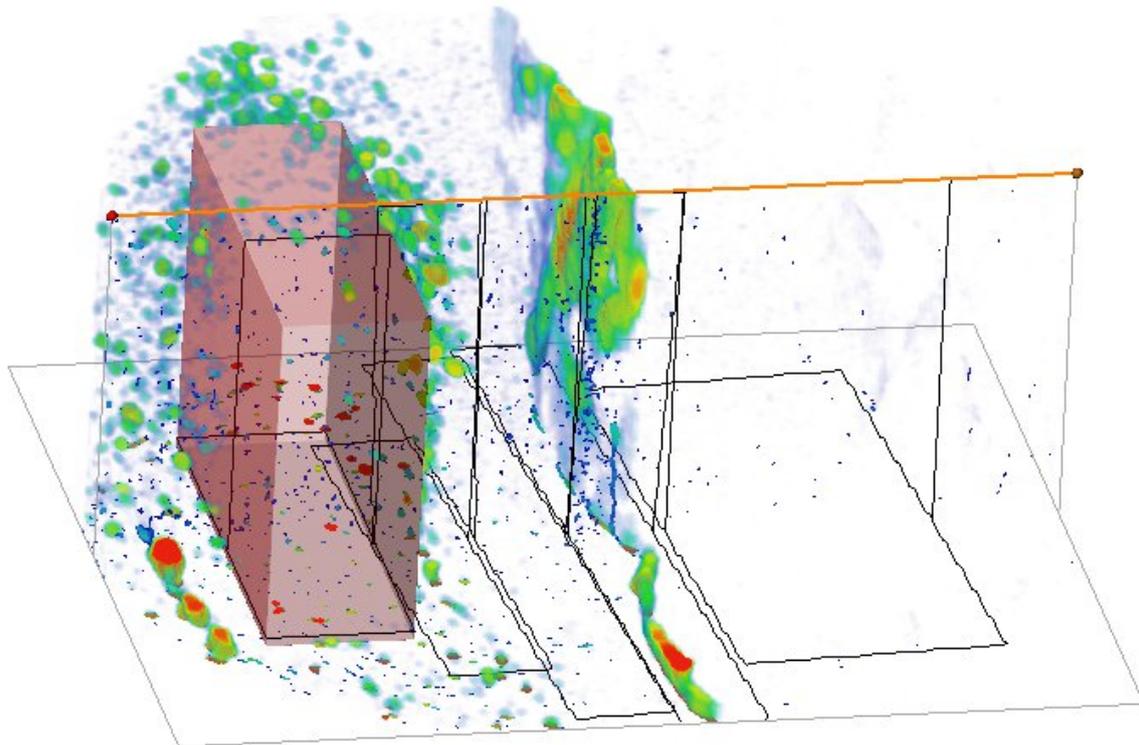
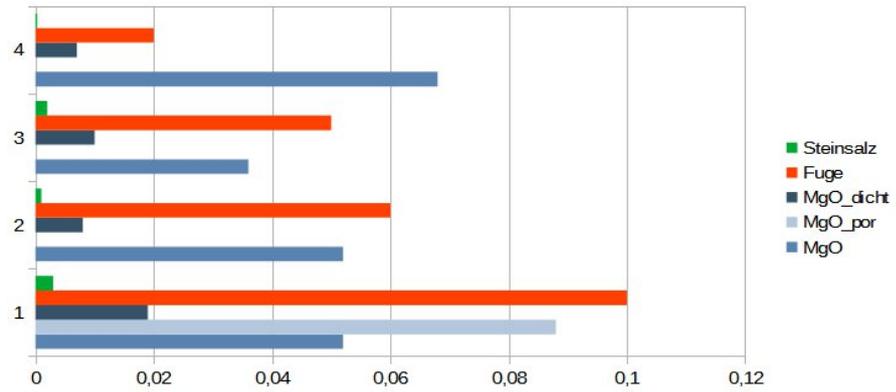


Abbildung 134 Oben: Aufgliederung der Tomogramme in 5 Zonen (von links nach rechts: "normaler" MgO-Baustoff, poröse Zone, dichte Zone, Fuge, Steinsalz. Der Block der ersten Zone ist rot markiert. Unten: Porositätsprofil längs des Durchmesseres (orange im Bild oben), berechnet als Flächenanteil über transaxiale Schnittebenen.

Porosität



Porenradien

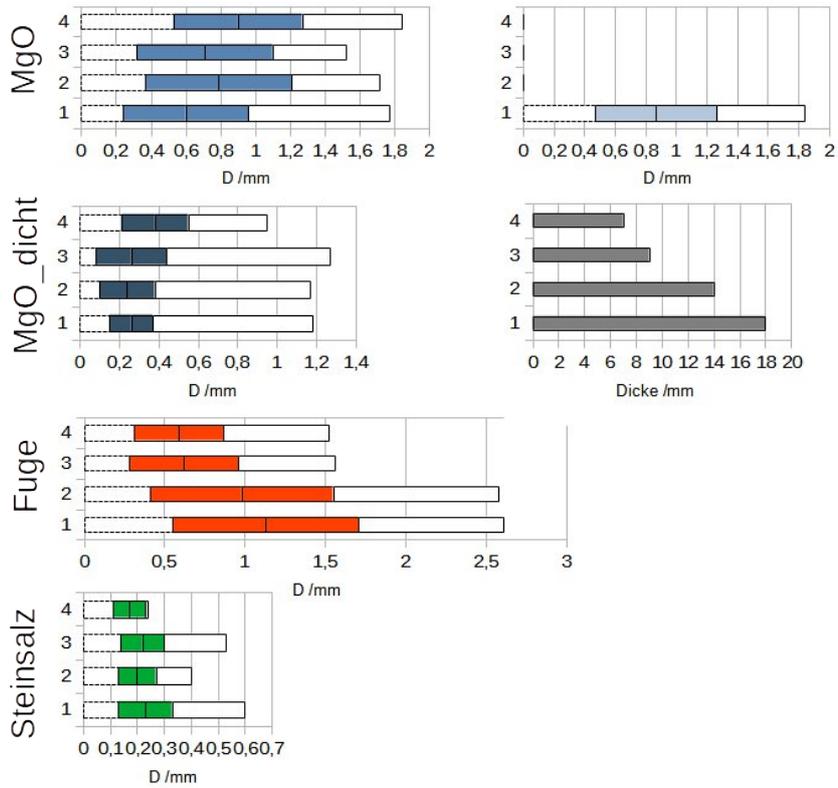


Abbildung 135 Balkendiagramme der Ergebnisse zu Abbildung 134 Oben Porositäten der 5 Zonen für alle 4 Proben. Darunter Porenradien (Mittelwert und Standardabweichung).

Anlage 7.4 Anhang: CT-Tomogramme

Anlage 7.4.1 Arbeitsschritte und Auswertungsversuche Wirtsgestein

(s. auch Abbildung 136)

- Achsparallele Ausrichtung der Tomogramme, Rebinning, Ausschneiden der Probe
- Anwendung non-local-means-Filter (NLM) (spatial standard dev. = 3, gray level sd = 0.3, search window = 5, local neighbourhood = 5), um homogene Bereiche selektiv zu glätten (deutliche Kontraste bleiben erhalten)
- Segmentierung des Probenkörpers: Einfache Schwellwertsegmentierung mit manueller Nachbearbeitung der Bereiche, an denen die Verpackungsfolie die Probe berührt (kein signifikanter Grauwertkontrast). Der Probenkörper wird benötigt als Maske für die weitere Bearbeitung und zur Bestimmung der Oberflächenrauheit.
- Morphologische Nachbearbeitung: Auffüllen von „Löchern“ durch convex hull (fehleranfällig), fill holes, closing
- Korrektur des inhomogenen Hintergrundes. Test mehrerer Optionen:
- Boxfilter (arithm. Mittelwert): Zunächst werden die dichten Komponenten „herausmaskiert“, anschließend wird über die Probe ein Boxfilter mit großer Weite (z.B. 50 Voxel) angewendet. Das Ergebnis hat Randartefakte mit der Größe des Filters und das Verfahren benötigt den kompletten Speicher von 120 GByte.
- Verbesserung der Hintergrundkorrektur: Der Außenraum und die dichten Bestandteile wurden mittels Opening gefüllt und mit einem Boxfilter geglättet. Anschließend wurde der Hintergrund mittels background detection correction mit Splineglättung über 20% der Probendimension berechnet und vom Originalbild abgezogen. Das Ergebnis ist befriedigend, allerdings zeichnet sich ein Teil der Risse nun weniger deutlich im Rauschen ab, das nun aufgrund des gewünschten Effekts der verringerten Dynamik wieder mehr hervortritt.
- Statt der Funktion „background detection correction“ wurde auch „background image“ getestet. Dies funktioniert bei kleineren Bildern mit wenig Hintergrundvariation und bei Anwendung einer Maske gut (bei „background detection correction“ nicht möglich). Bei den gegebenen großen Bildern ist es anscheinend nicht hilfreich, weil nur ein Polynom 2. Ordnung berechnet wird, das zur Beschreibung komplexerer Hintergrundvariationen nicht ausreicht.
- Bei diesen Prozeduren zur Hintergrundkorrektur wurde ein Teil des Nutzsignals verschlechtert und Risse zum Teil schlechter erkennbar. Diesem Effekt wurde abgeholfen durch die Anwendung von background detection correction auf ein 4-fach heruntergesamplertes Bild. Dies reduzierte den Aufwand beträchtlich (64-fach), war erheblich schneller und führte zu einem besseren Endergebnis.
- Im Prinzip kann die Korrektur additiv oder multiplikativ durchgeführt werden. Der Test ergab keinen signifikanten Unterschied der Homogenität des Resultats, so dass der schnelleren additiven Korrektur der Vorrang gegeben wurde.
- Glättung: Die weitere Glättung sollte möglichst nicht die Schärfe erkennbarer Strukturen vermindern. An Teilmengen des Tomogramms erwies sich „curvature driven diffusion“ als beste Methode, die aber aufgrund des Rechenaufwandes nicht für die gesamte Probe einsetzbar war. Eine effiziente Möglichkeit der Filterung ist „despeckle“, das bei ungleich geringerem Rechenaufwand ein Ergebnis bringt, das mit NLM vergleichbar ist.
- Segmentierung der Poren: Schwellwertsegmentierung ist aufgrund des geringen Kontrastes und der verbleibenden Variation des Hintergrundes nicht gut geeignet. Deshalb war „adaptive thresholding“ (dabei passt sich der Schwellwert dem Mittelwert des lokalen Hintergrundes an) die Grundlage für die erste quantitative Auswertung. Hierin war ein deutlicher Rauschanteil zu verzeichnen.
- Auf Empfehlung der Avizo-Benutzerberatung wurde stattdessen eine „black top-hat“-Segmentierung durchgeführt. Im Unterschied zum adaptive thresholding wird dabei eine Schwellwertsegmentierung der Differenz zu einem Bild der lokalen Umgebung durchgeführt. Dies erwies sich nach längeren Tests als effizienter und brachte klarere, rauschärmere Ergebnisse. Allerdings entstehen Segmentierungsartefakte im Bereich

der Korngrenzen zu Anhydritkristallen, die sich durch eine Begrenzung der Grauwertamplitude verringern lassen.

- Subtraktion der Umgebung dichter Elemente: Um diesen Effekt von dichten Korngrenzen zu beheben, wurden diese Korngrenzen mit einem „white top-hat“ segmentiert und durch eine Dilatation erweitert. Dieses Binärbild wurde vom vorherigen abgezogen („not-and“).
- Morphologische Nachbearbeitung: Kleine Objekte wurden durch Opening beseitigt, anschließend wurden Lücken zwischen der verbleibenden Objekten durch Closing aufgefüllt.
- Labelling: Die Auftrennung der einzelnen Objekte geschah mit einer „connected components“ – Prozedur, durch die dreidimensionale zusammenhängende Figuren oberhalb einer wählbaren Voxelzahl markiert werden. Hierdurch ließen sich Risse als größte zusammenhängende Gebilde herausfiltern. Prinzipiell kann das Labelling-Ergebnis einer 3D-Bildanalyse zugrunde gelegt werden, die für klastische Sedimente oder für Beton gut geeignet ist, etwa um Breite, Länge, Volumen, Oberfläche, Trägheitsmomente und Konnektivität der Poren zu bewerten. Leider sind diese Parameter kaum für die Beschreibung von Rissystemen geeignet, die in diesem Fall vorherrschen.
- Porenradien: Anstelle der Analyse von Einzelfiguren wurde eine „thickness map“ berechnet. Die thickness map (Hildebrand and Rüeggsegger, 1997) ordnet den Volumenelementen einer Figur den Durchmesser der größten Kugel zu, die dies Volumenelement an irgendeiner Stelle anthält und sich in die Figur einpassen lässt. Diese thickness map ist deshalb eine adäquate und verständliche Definition der Porenradienverteilung.

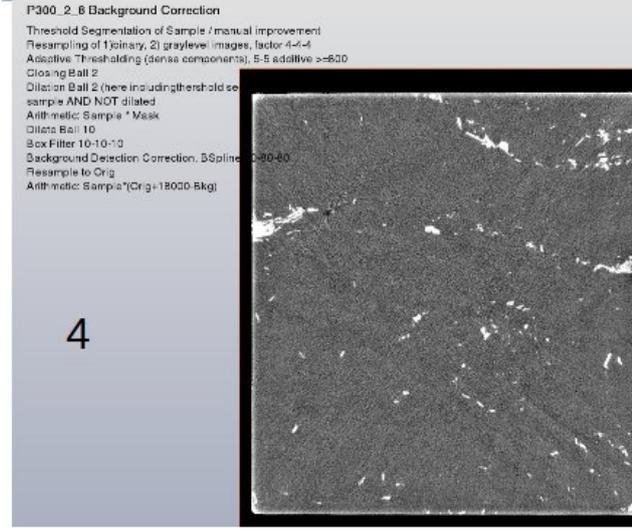
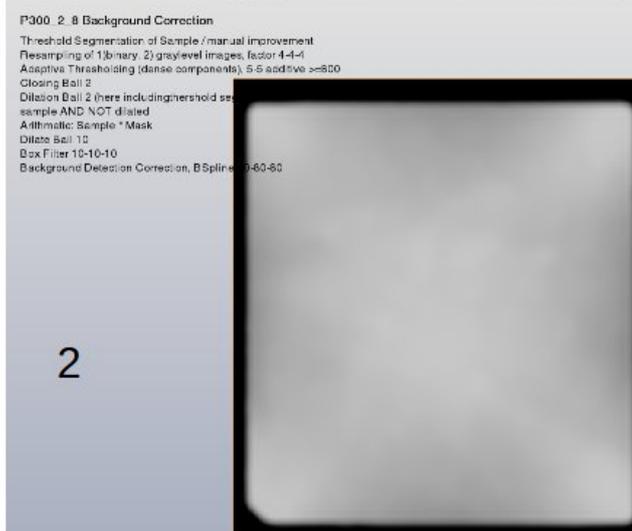
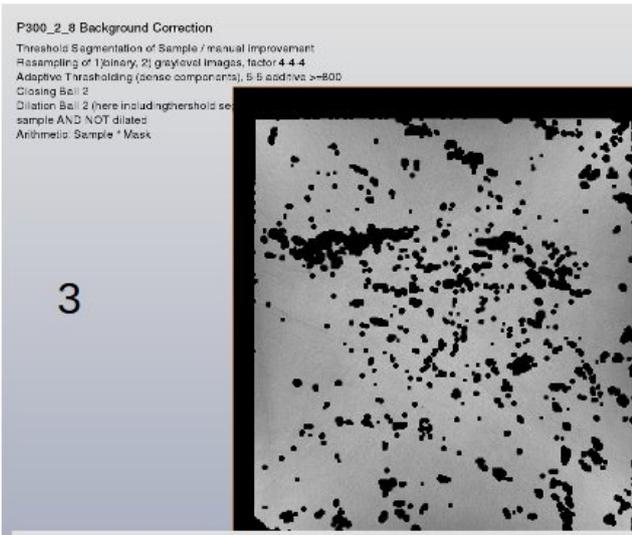
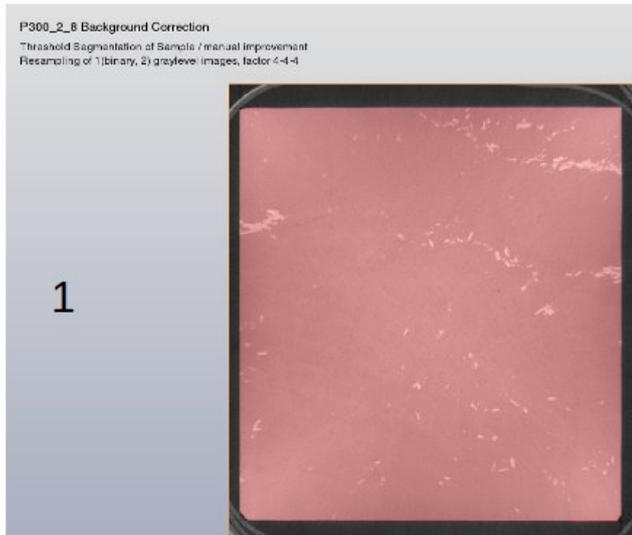
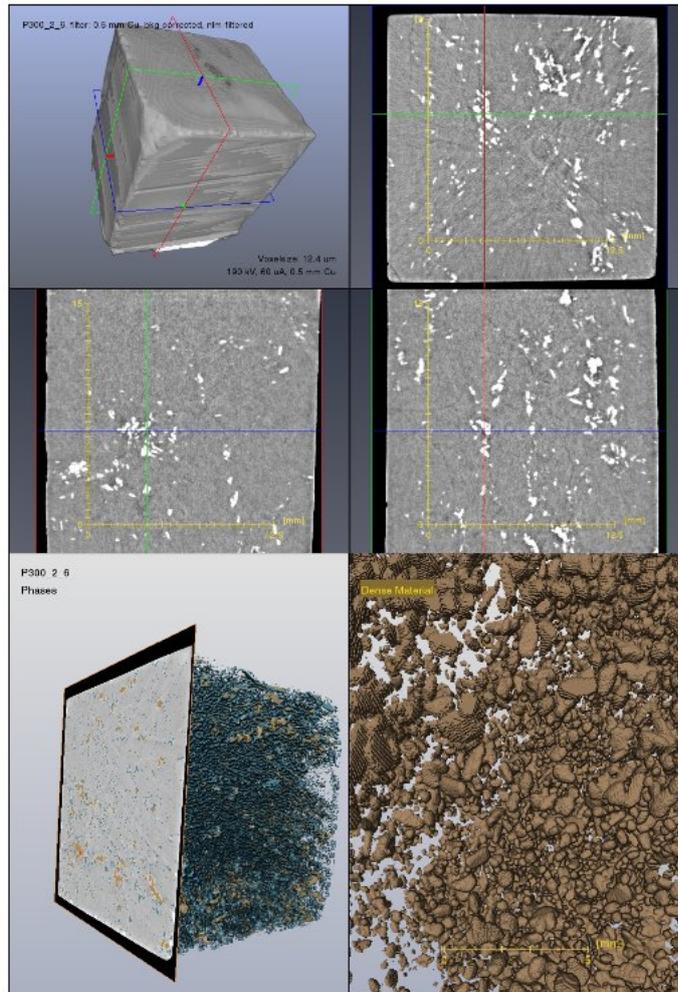


Abbildung 136 Verarbeitungsschritte zur Filterung und Segmentierung des Binärbildes:

1. Binarisierung des gesamten Probenvolumens als Bearbeitungsmaske,
2. Binarisierung und Auffüllen der dichten Bereiche mit dem mittleren Grauwert,
3. Bestimmung der Hintergrundvariation (Background Detection Correction)
4. Korrektur des Hintergrundes

Anlage 7.4.2 Tomogramme Wirtsgestein



P300 2/6

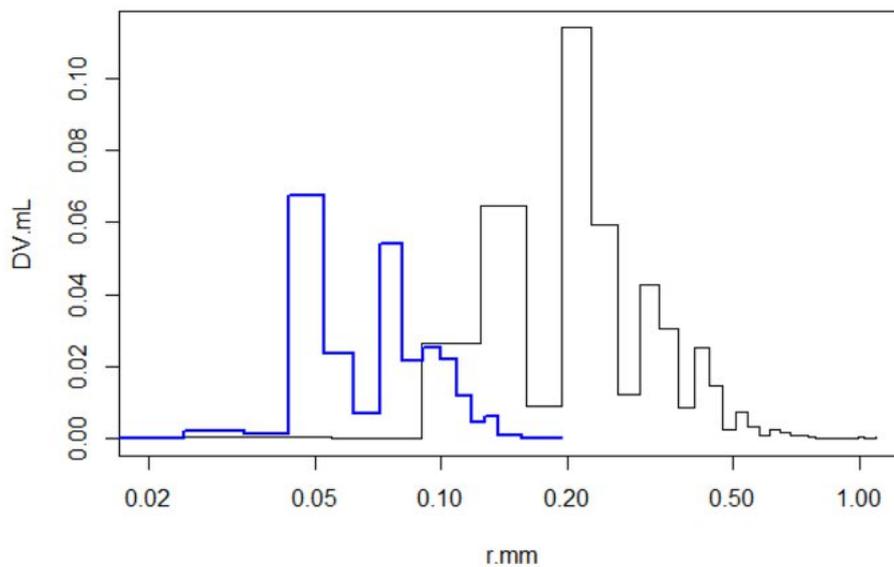


Abbildung 137 Probe P300 2/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (blau: Poren, schwarz: Oberfläche).

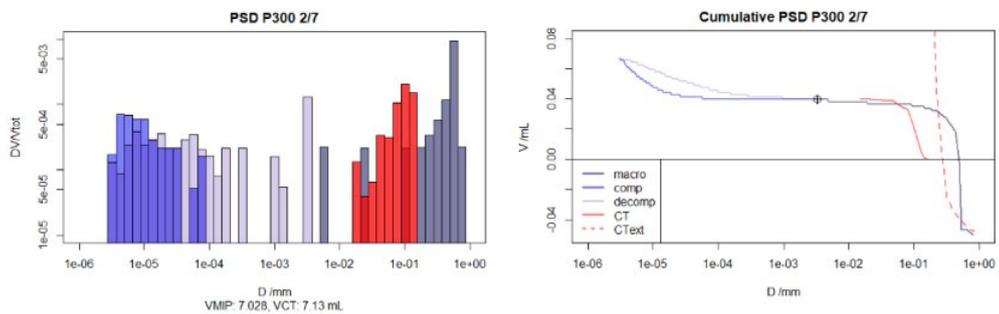
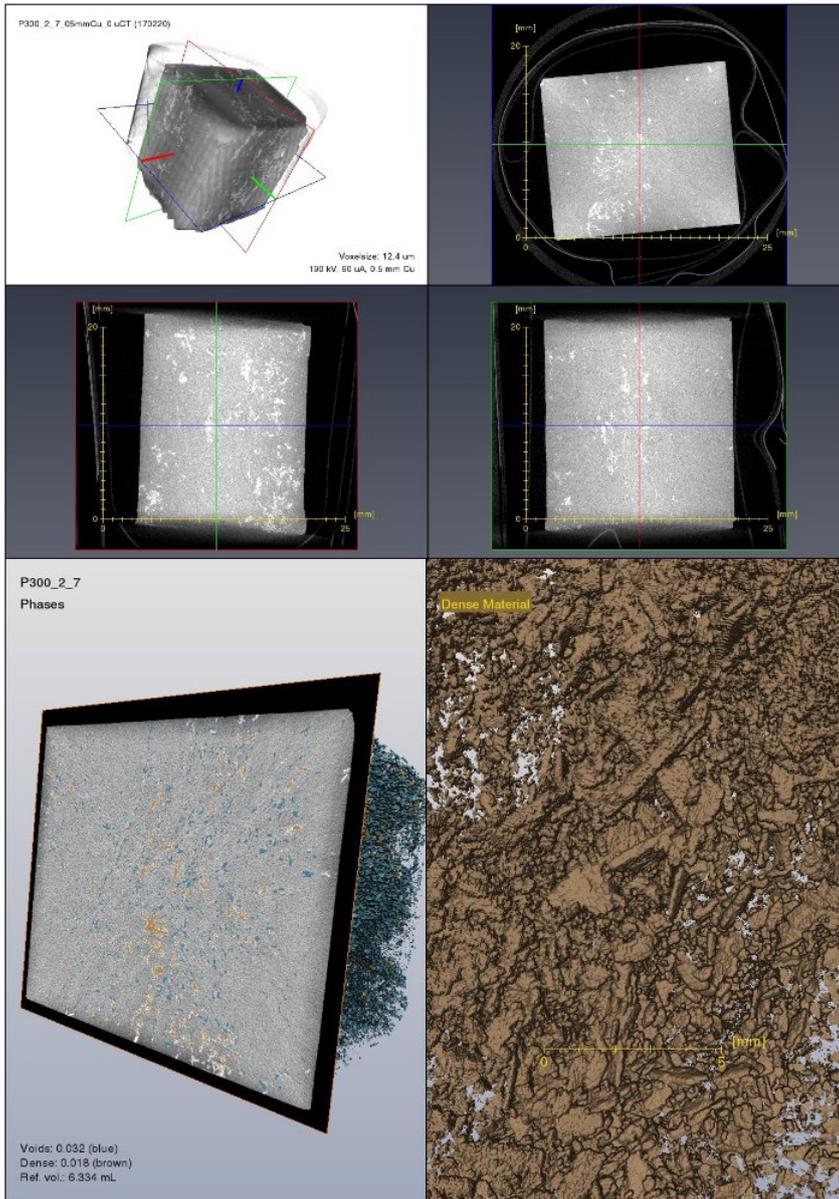
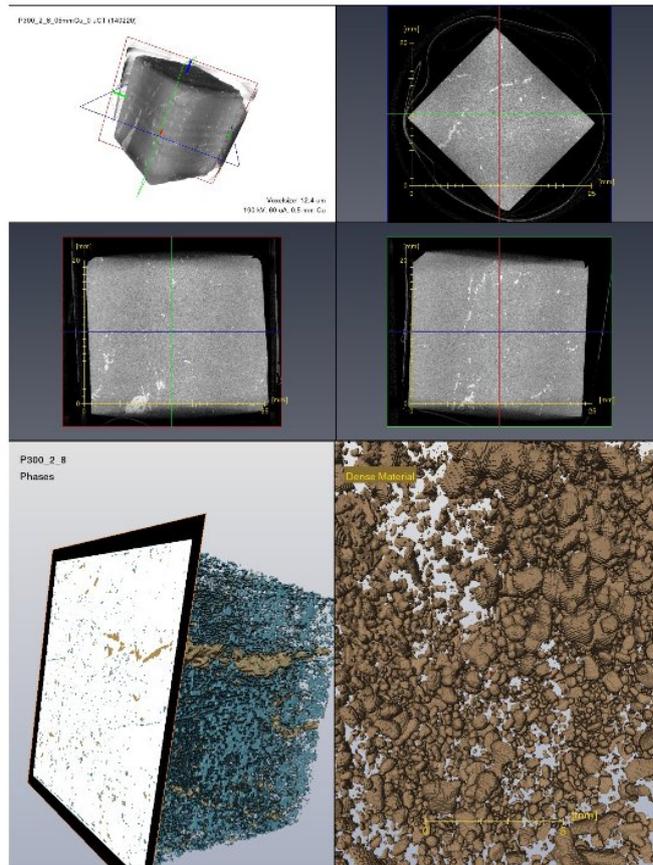


Abbildung 138 Probe P300 2/7 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit)



P300 2/8

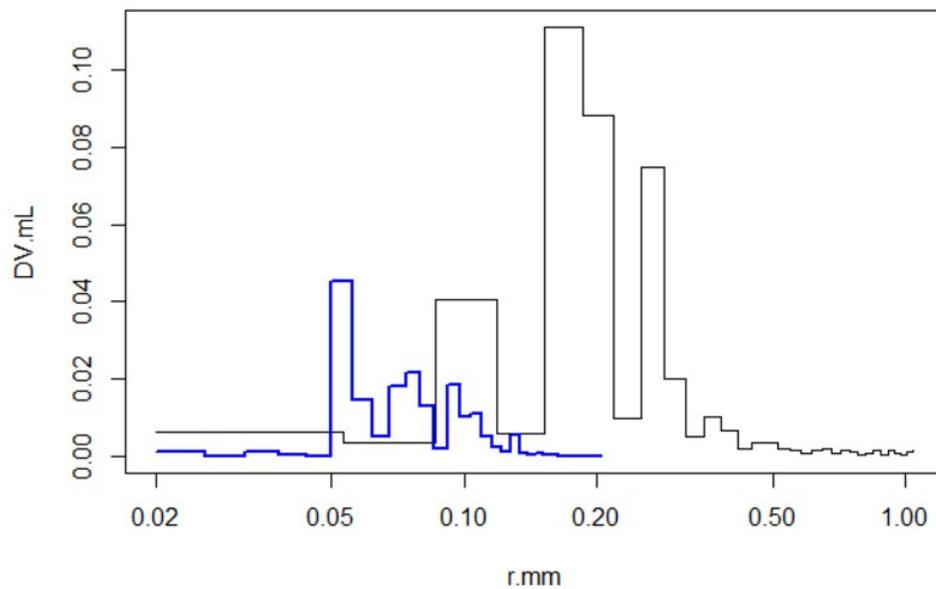


Abbildung 139 Probe P300 2/8(Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (blau: Poren, schwarz: Oberfläche).

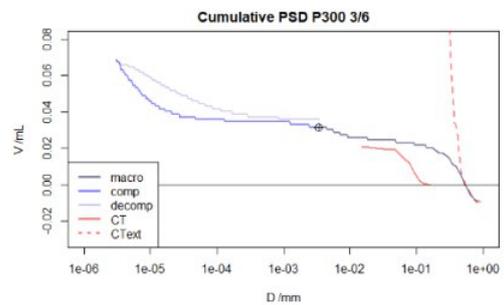
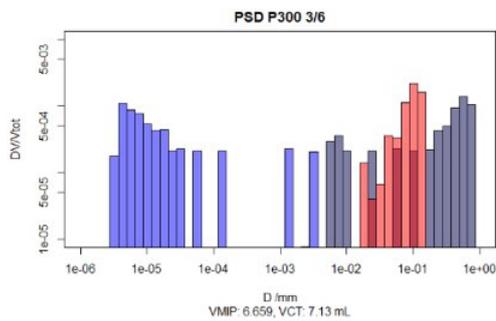
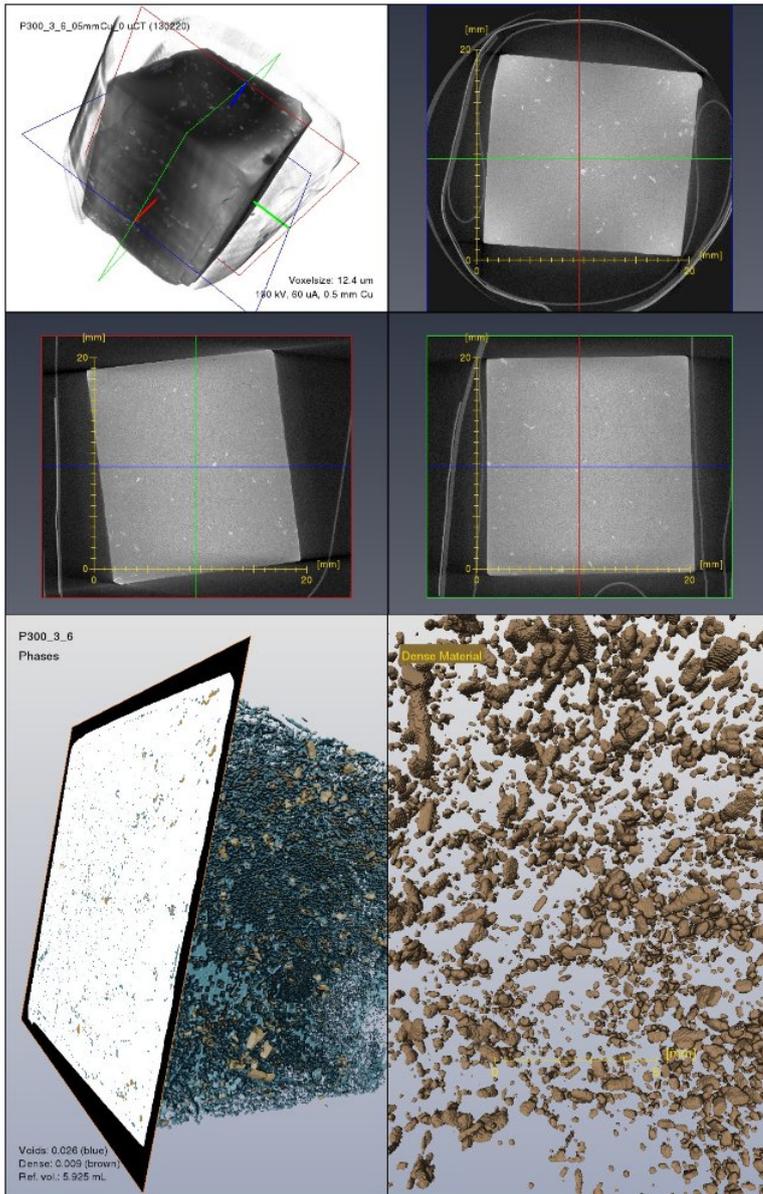


Abbildung 140 Probe P300 3/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit).

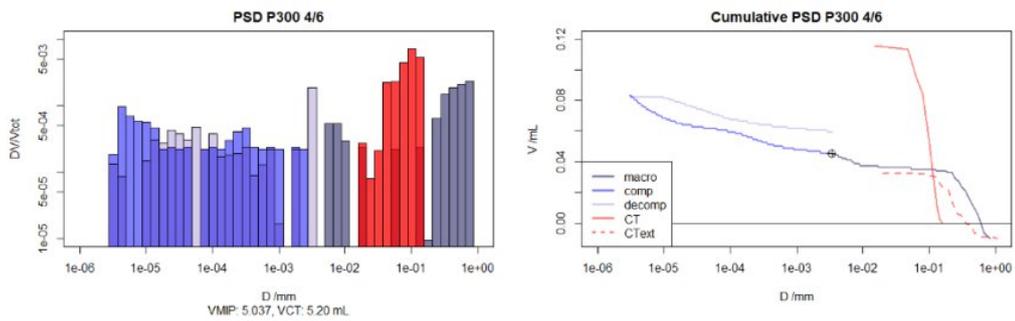
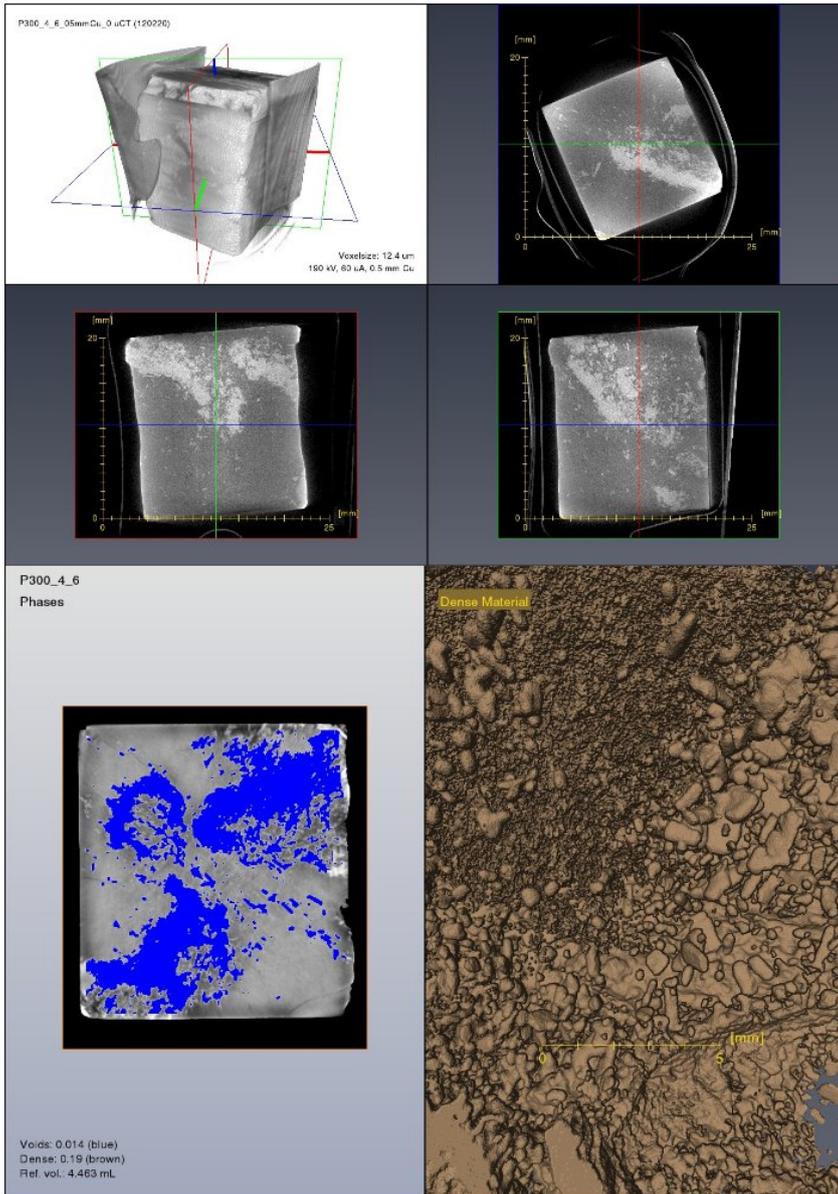


Abbildung 141 Probe P300 4/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit).

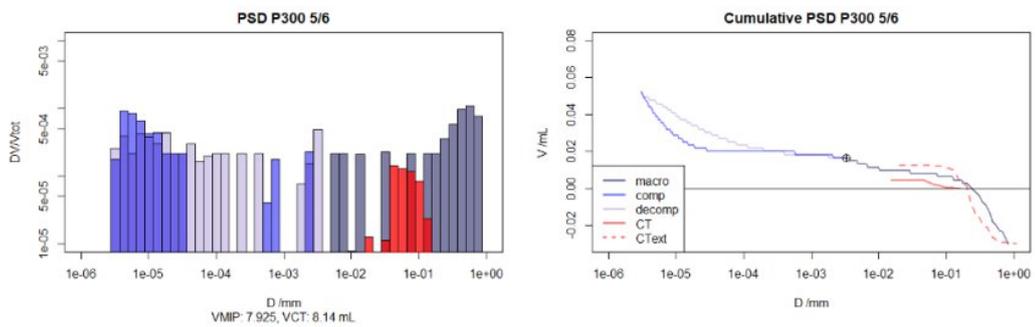
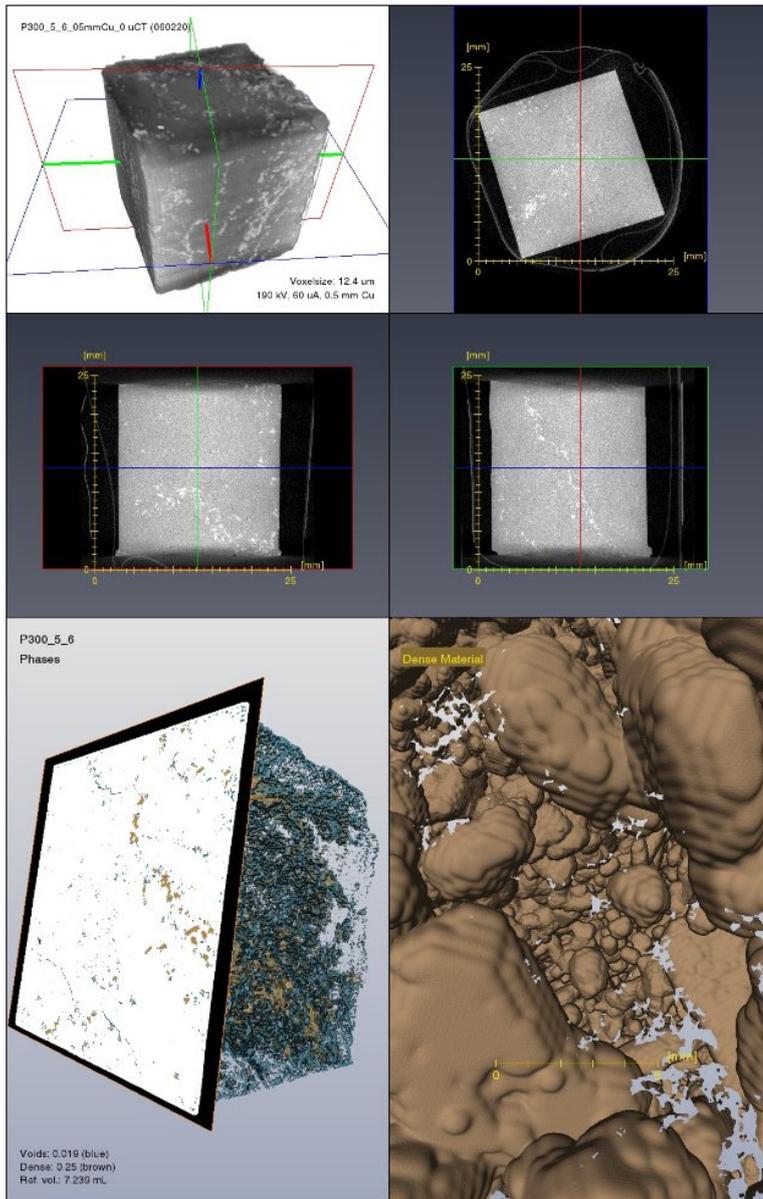


Abbildung 142 Probe P300 5/6 (Steinsalz), CT-Bild, Modalanalyse und Radienverteilung (MIP Makroporen, MIP Kompressionsast, MIP Dekompressionsast, CT-Poren, CT-Rauheit).

Anlage 7.4.3 CT-Tomogramme MgO-Baustoff

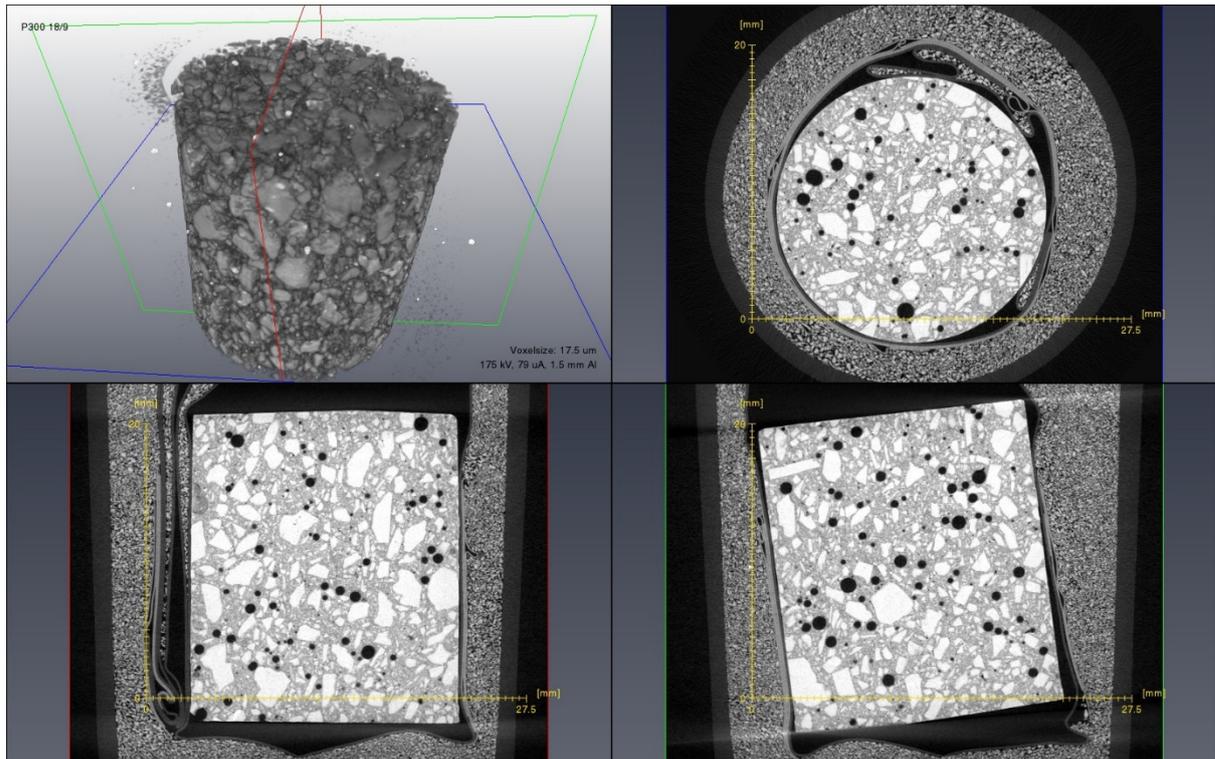


Abbildung 143 P300 18/9 CT-Bild

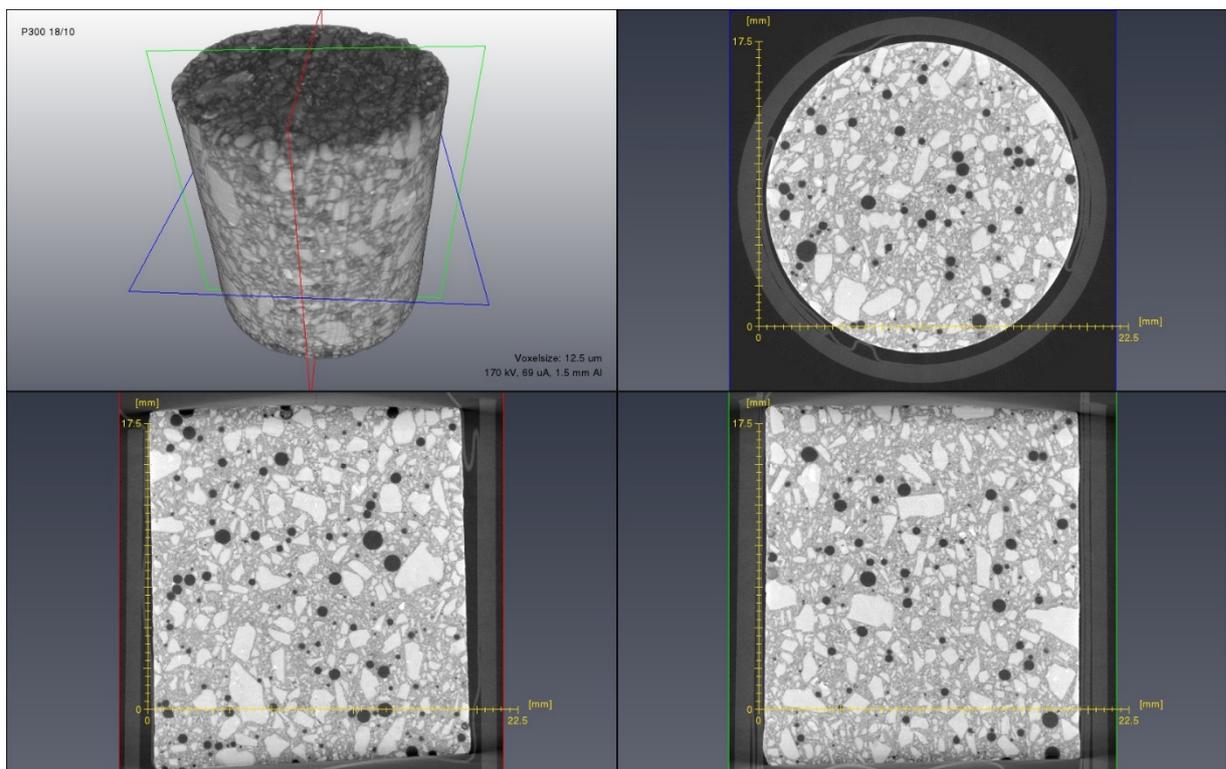


Abbildung 144 P300 18/10 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Bild

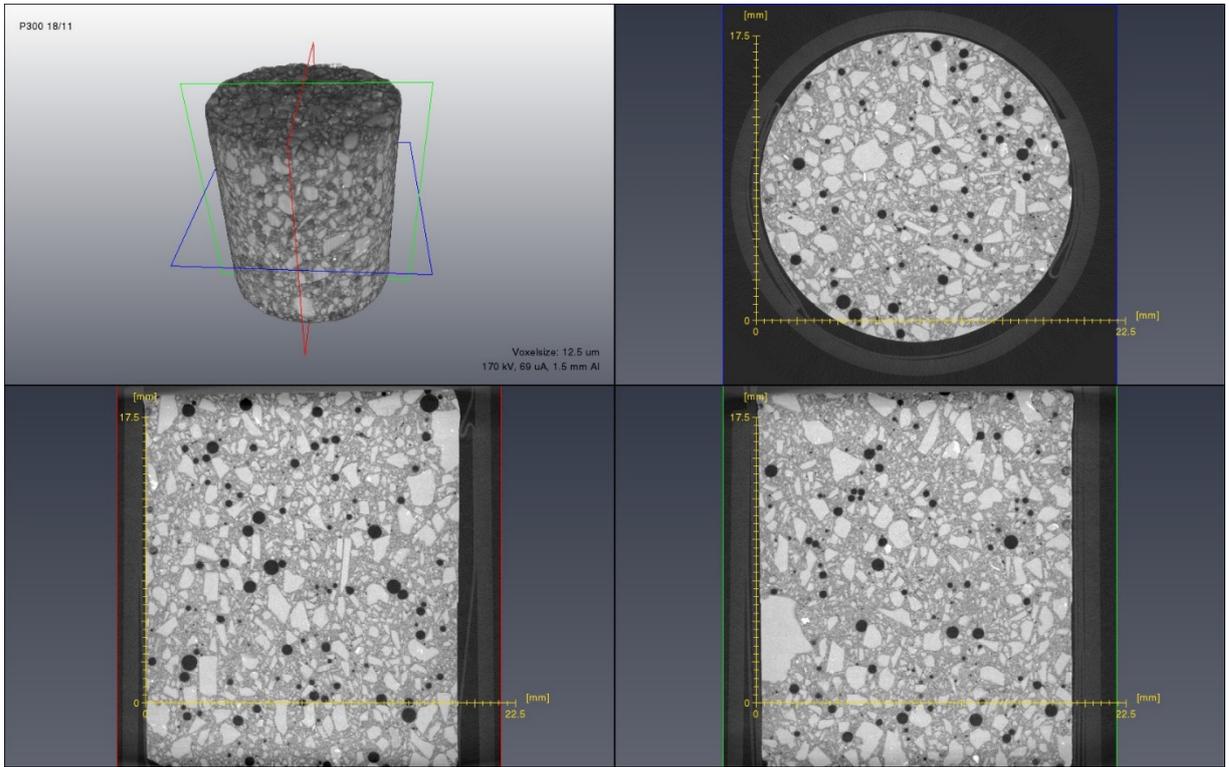


Abbildung 145 P300 18/11 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Bild

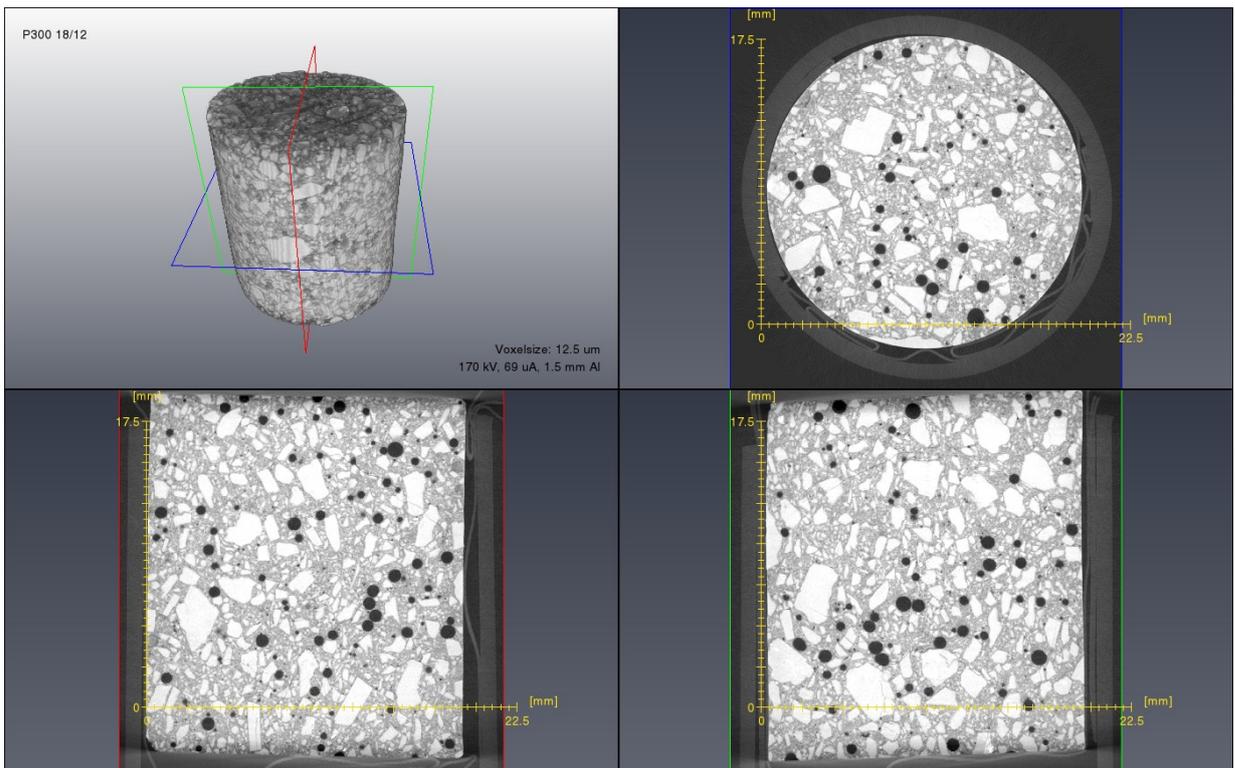


Abbildung 146 P300 18/12 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Bild

Anlage 7.4.4 CT-Porenradienverteilungen Baustoff

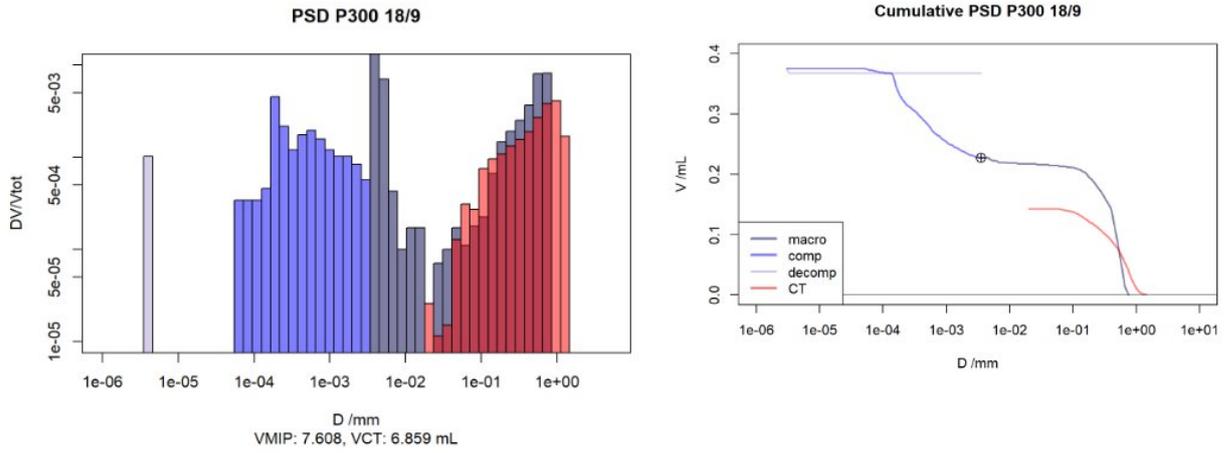


Abbildung 147 P300 18/9 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung

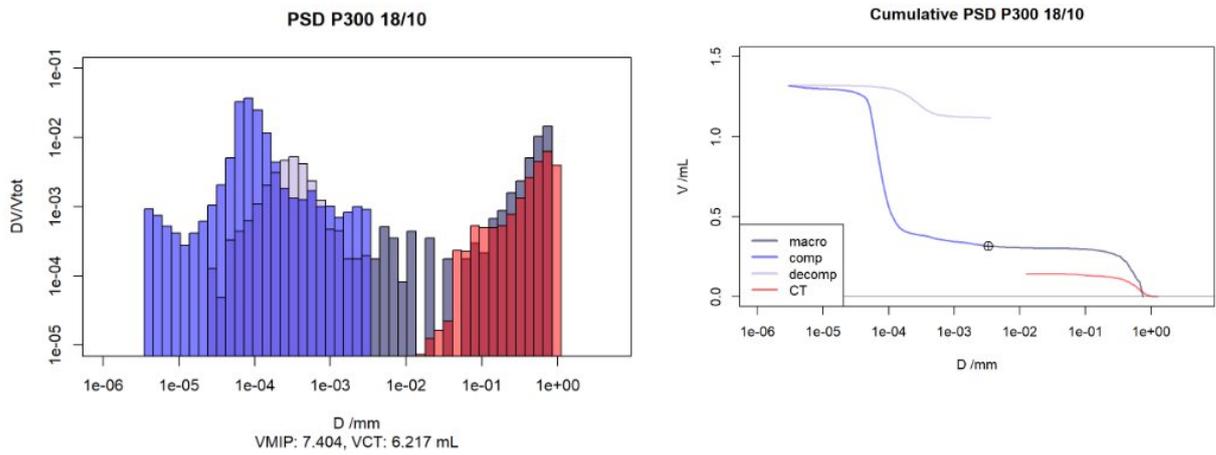


Abbildung 148 P300 18/10 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung

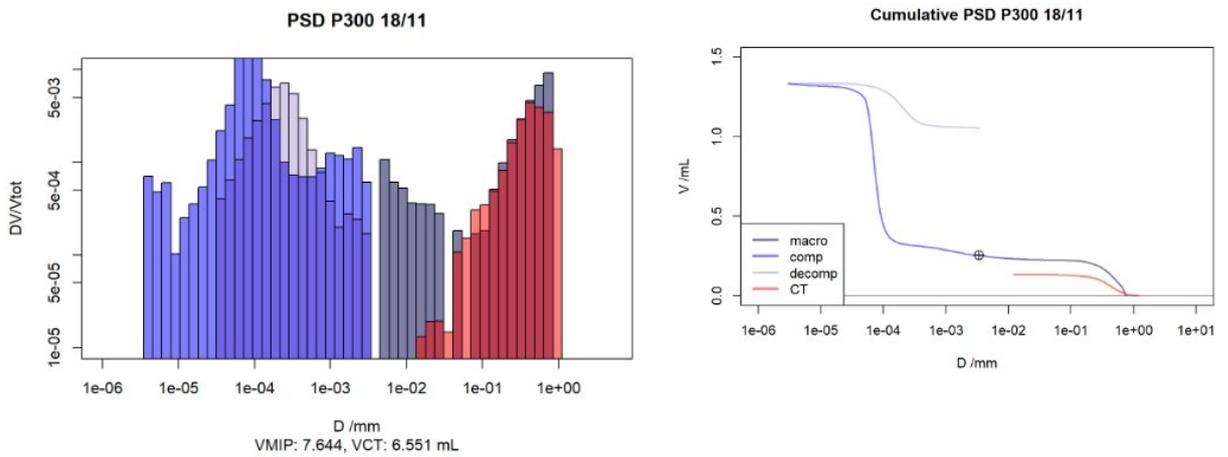


Abbildung 149 P300 18/11 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung

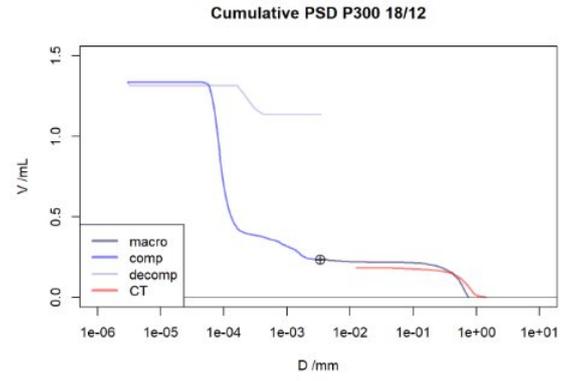
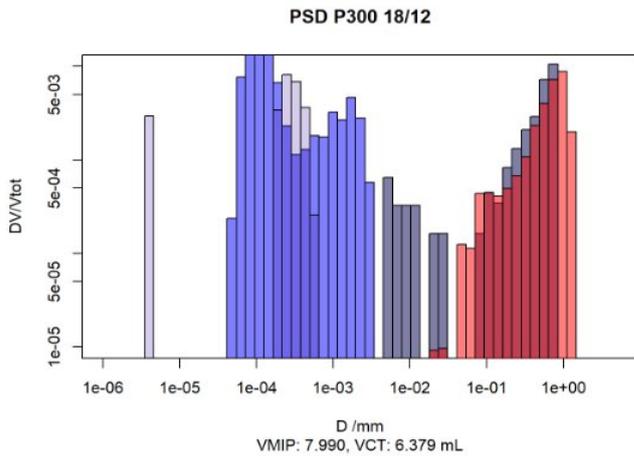


Abbildung 150 P300 18/12 (gegossene Probe A1-Basisrezeptur) CT-Porenradienverteilung

Anlage 7.4.5 CT-Tomogramme Kompositproben

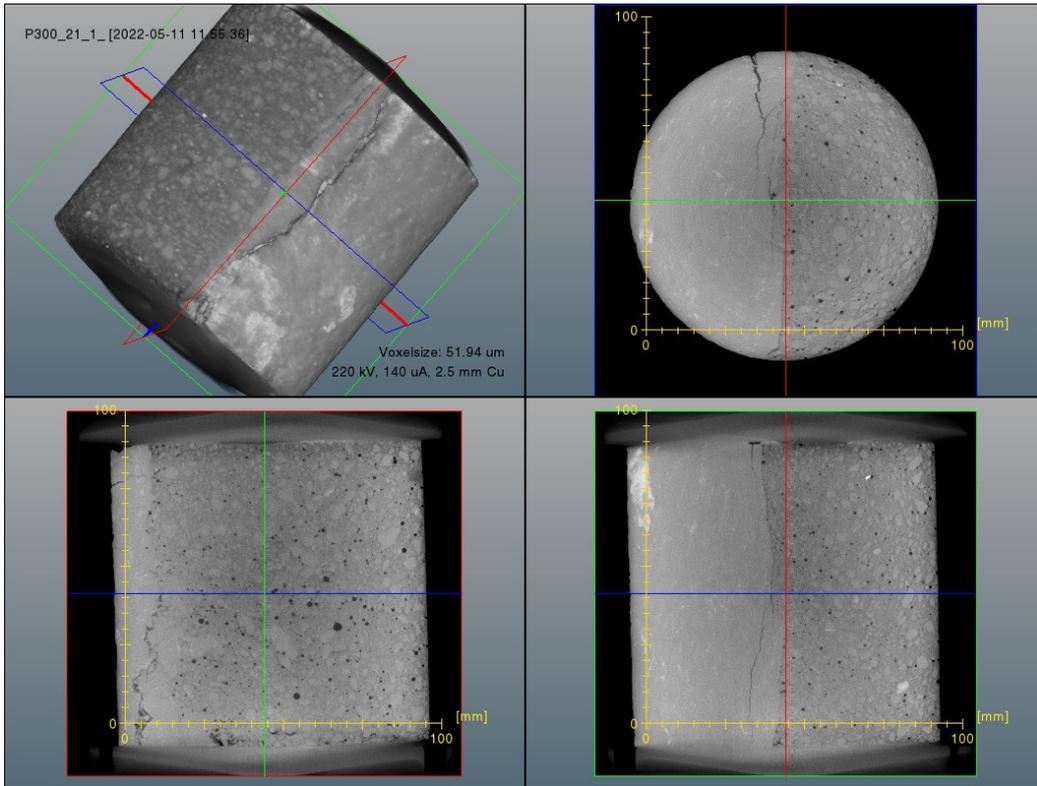


Abbildung 151 P300 21/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm vor der Injektion

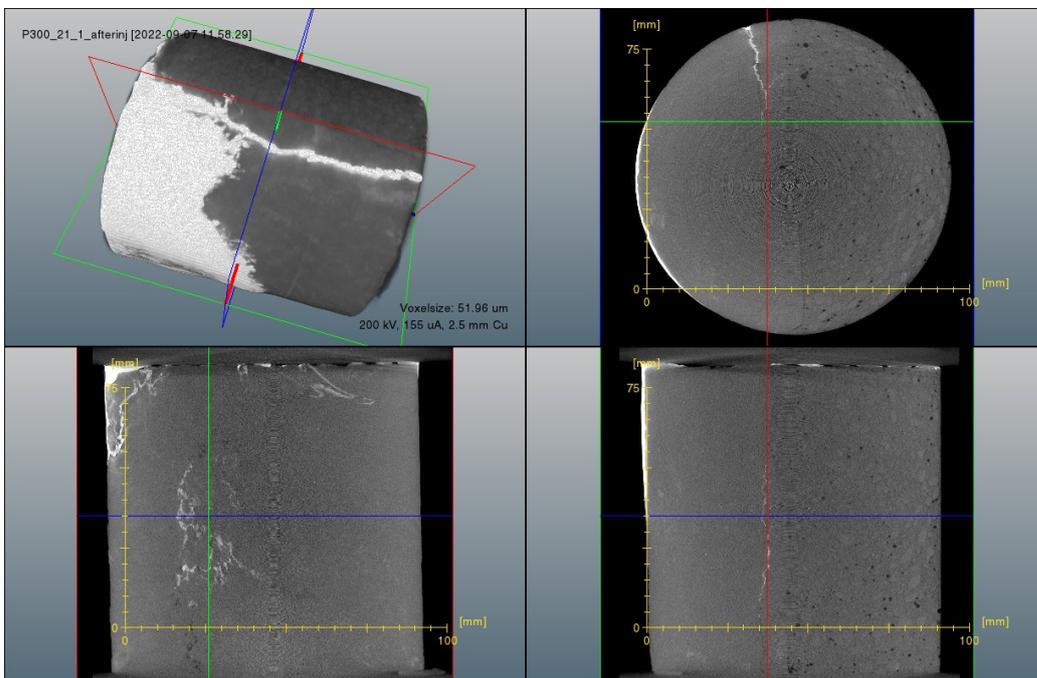


Abbildung 152 P300 21/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm nach der Injektion

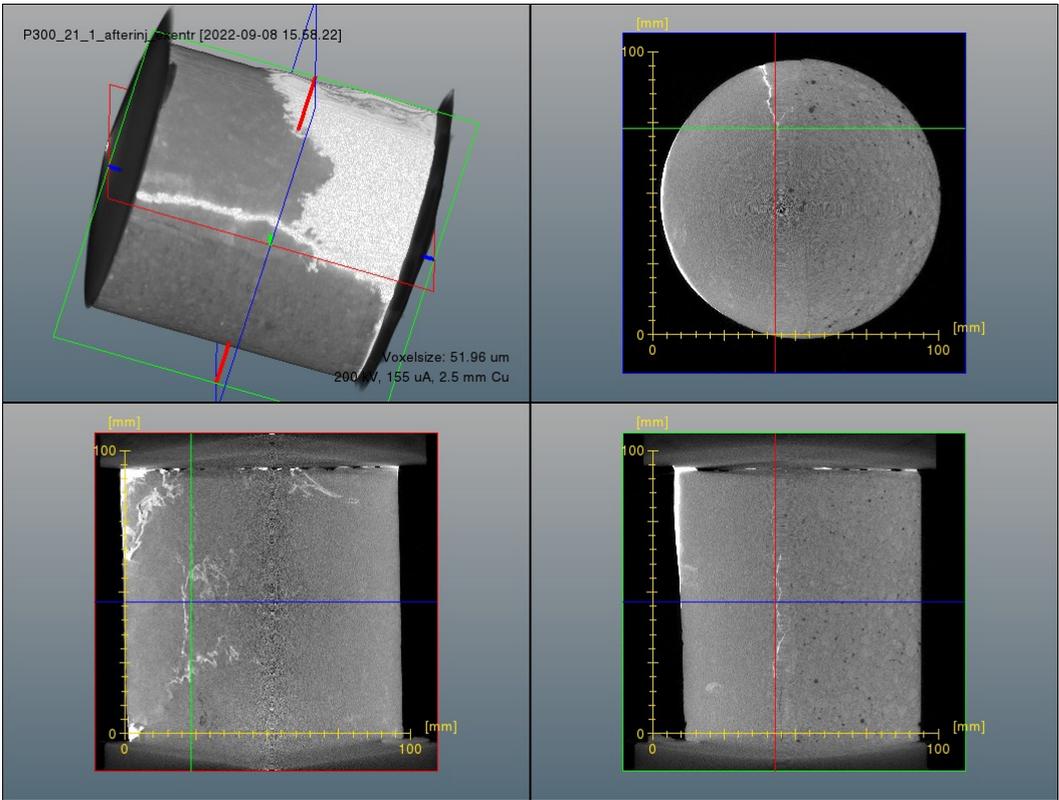


Abbildung 153 P300 21/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm nach der Injektion, Wiederholung

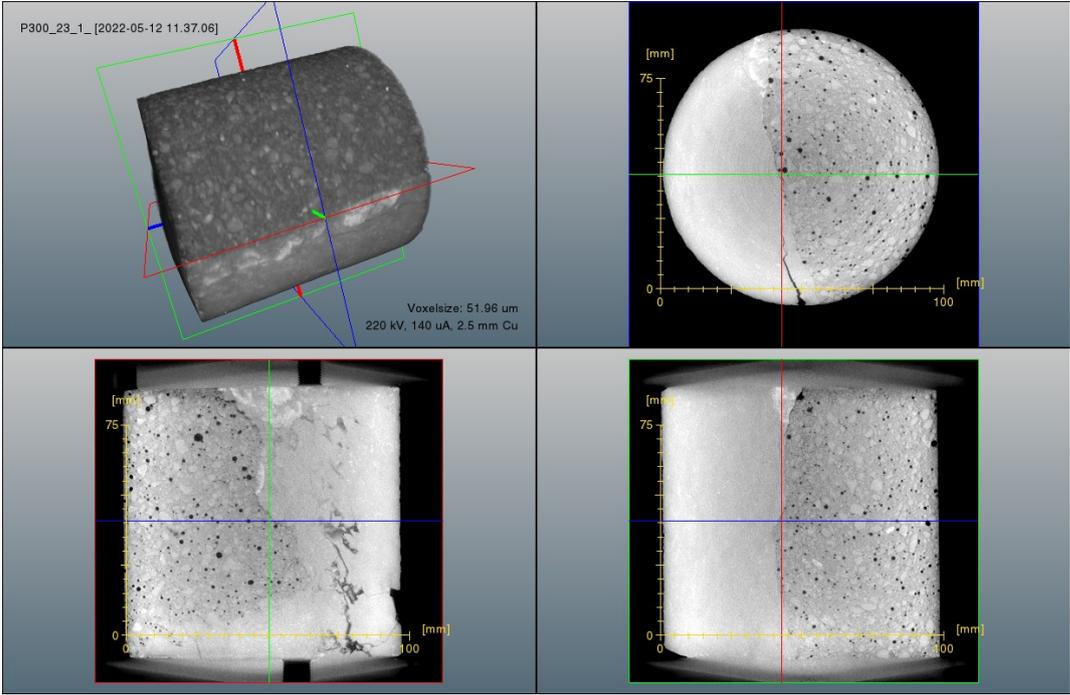


Abbildung 154 P300 23/1 (Laborkomposit A1-Basisrezeptur/Salinar) CT-Tomogramm