



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben

MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl₂-Lösung ("MgO-SEAL")

Förderkennzeichen 02E11435

Ausführende Stelle: Technische Universität Bergakademie Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

Gustav-Zeuner-Str. 1a



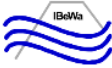



D-09596 Freiberg

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla

Autoren:
M.Sc. Jennifer Arendt
Dr. Daniela Freyer
Dr. Friedemann Grafe
Dr. Matthias Gruner
Hr. Bernd Müller
Dr. Till Popp
Dr. Thomas Wilsnack

Editor: M.Sc. Jennifer Arendt

Das diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02E11435 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Projektpartner	Ansprechpartner	
TU Bergakademie Freiberg Institut für Bergbau und Spezialtiefbau Gustav-Zeuner-Str. 1a 09599 Freiberg	Prof. Dr. Wolfram Kudla Dr. Matthias Gruner M.Sc. Jennifer Arendt Dipl.-Ing. (BA) Martin Hofmann	
TU Bergakademie Freiberg Institut für Anorganische Chemie Leipziger Str. 29 09599 Freiberg	Dr. Daniela Freyer Dr. Iris Paschke Dipl.-Ing. Regina Moßig	
IfG Leipzig GmbH Friederikenstraße 60 04279 Leipzig	Dr. Till Popp Dr. Klaus Salzer Dipl.-Ing. Michael Wiedemann	 Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig Research • Testing • Consulting • Expertise
IBeWa Ingenieurpartnerschaft Meißner Ring 10 09599 Freiberg	Dr. Thomas Wilsnack Dr. Friedemann Grafe	
TS BAU GmbH Niederlassung Jena Am Flugraben 1 07743 Jena	Dipl.-Ing. Olaf Einicke Herr Jürgen Schrade Dipl.-Ing. Toni Schmidt	
GTS GmbH & Co KG Straße der Einheit 9 06179 Teutschenthal	Dipl.-Geol. Erik Fillinger Dipl.-Ing. Jens Biegler	
MFPA Weimar Coudraystr. 9 99423 Weimar	Herr Bernd Müller	

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkungen.....	6
Kurzfassung	7
Abstract	8
1 Einleitung.....	9
2 Versuchsplanung und Voruntersuchungen	11
2.1 Standortbeschreibung	11
2.2 Pneumatische Dichtheitsprüfung.....	14
2.2.1 Pneumatische Vortests am GV2.....	14
2.2.2 Pneumatische Vortests am GV1.....	18
2.2.3 Vergleich der Permeabilität beim GV1 und GV2	19
2.3 Entwicklung der Kontaktdrücke im GV2 vor den Druckbeaufschlagungen	21
2.4 Bohrungen im GV2.....	23
3 Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus dem Bauwerk GV2.....	26
3.1 Bohrkernaufnahme	26
3.2 Kamerabefahrung und Ultraschalluntersuchungen in den Bohrlöchern	31
3.2.1 Kamerabefahrung	31
3.2.2 Ultraschall-Downhole-Messung	32
3.3 Baustoffrezeptur und Phasenbestand	34
3.4 Reaktionen/Verhalten des MgO-Betons bei Lösungskontakt	38
3.5 Optische Mikroskopie (OM) an Kernmaterial.....	40
3.5.1 Injizierter Riss in Bohrung B41	40
3.5.2 Injizierter Kontaktbereich in Bohrung B44	42
3.6 Betonierabschnittsgrenzen	46
3.7 Lagerungsversuche	49
3.7.1 Lagerung bei unterschiedlicher Luftfeuchte	49
3.7.1.1 Methodik.....	49
3.7.1.2 Ergebnisse	50
3.7.2 Lagerung in Lösung	53
3.7.2.1 Methodik.....	53
3.7.2.2 Ergebnisse	54
3.8 Feuchtegehalt.....	58
3.8.1 Methodik	58
3.8.2 Ergebnisse.....	59
3.9 Dichte 61	61
3.9.1 Methodik	61
3.9.2 Ergebnisse.....	62
3.10 Porosität	64
3.10.1 Methodik	64
3.10.1.1 Porosität aus Dichten	64
3.10.1.2 Quecksilberporosimetrie	65
3.10.2 Ergebnisse.....	68
3.10.2.1 Porosität aus Dichten	68
3.10.2.2 Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie	69
3.11 Porenraumsättigung	76
3.11.1 Methodik	76
3.11.2 Ergebnisse.....	76
3.12 Ergebnisübersicht zu den Abschnitten 3.8 bis 3.11.....	77
3.13 Überbohrung der B34: Analyse des mit Lösung in Kontakt stehenden MgO-Betons	82
3.14 Festigkeits- und Kriechverhalten	86
3.14.1.1 Versuchsprogramm	86

3.14.1.2	Triaxiale Druckversuche.....	87
3.14.1.3	Spaltzug- und Haftzugfestigkeit	89
3.14.1.4	Kompaktions- und Relaxationsverhalten.....	90
4	Permeabilitätsuntersuchungen.....	94
4.1	Frühere Untersuchungsergebnisse im Rahmen des FuE-Projektes CARLA	94
4.2	Untersuchungen in den Bohrungen B40, B41 und B44.....	95
4.2.1	In-situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Gas.....	96
4.2.2	Permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial mit Gas	98
4.2.3	Permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial mit Lösung	99
4.2.4	In-situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Lösung.....	101
4.2.5	Bewertung der Druckhaltephase mit Lösung.....	103
4.2.6	Ultraschall-Messungen zur Identifikation von Betonierabschnittsgrenzen.....	106
4.3	Permeabilitätsuntersuchungen an den Bohrungen B38 und B39 sowie an Kernmaterial aus der B42.....	108
4.3.1	Permeabilitätsuntersuchungen am Bohrkern der B42	108
4.3.2	Messungen der Lösungspermeabilität in situ mit 6 m Messtrecke	110
4.3.3	Punktuelle Messungen in situ	116
4.3.4	Zusammenfassung zu den Permeabilitätsmessungen in den Bohrungen B38 und B39 117	
4.3.5	Zusammenfassung der Permeabilitätsuntersuchungen	119
5	Lösungsdruckbeaufschlagung auf den MgO-Beton über die Druckkammer des GV2..	121
5.1	Vorbereitungen	121
5.2	Befüllung der Druckkammer.....	124
5.3	Druckbeaufschlagungen.....	129
5.3.1	Auswertung der Druckbeaufschlagungen.....	129
5.3.2	Einfluss-/ Korrekturfaktoren für die Auswertung der Druckbeaufschlagungen	158
5.4	Ergebnisse der Feuchtesensoren.....	163
6	Planung des selektiven Rückbaus und Untersuchung der Kontaktzone.....	181
7	Vorschläge zur Verbesserung der Spritzbetonrezeptur	187
7.1	Einleitung und Zielstellung	187
7.2	Bewertung der Klebrigkeit	189
7.3	Bestimmung des zeitabhängigen rheologischen Verhaltens der Bindemittelsuspension	190
7.3.1	Vorbetrachtung zu den rheologischen Untersuchungen.....	190
7.3.2	Erste Versuchsreihe – Messungen bei unterschiedlichem Feinsalzgehalt.....	193
7.3.3	Bewertung der Deformationsvorgabe	197
7.3.4	Zweite Versuchsreihe – Messungen mit verändertem Masseverhältnis und weiteren MgO-Sorten	198
7.3.5	Zusammenfassung und Ausblick zu den rheologischen Untersuchungen mit MgO-Bindemittelsuspension	202
7.4	Anpassung der Grundrezeptur des D4-Betons	203
8	Untersuchungen zur Vervollständigung der experimentellen Datenbasis.....	205
9	Aufgabenstellung für einen geeigneten chemo-hydro-mechanischen Nachweis bei MgO- Spritzbeton mit 5-1-8-Phase.....	209
9.1	Einleitung.....	209
9.2	Stoffumwandlungsprozess / phänomenologische Beobachtungen.....	210
9.3	Änderung der Porosität durch Phasenumbildung bei Lösungskontakt im Porenraum.....	211
9.4	Beschreibung einer Spaltströmung	213
9.5	Änderung der Permeabilität durch Verringerung der Porosität.....	215
10	Zusammenfassung und Ausblick	217
	Literaturverzeichnis	221

Abkürzungsverzeichnis	224
Abbildungsverzeichnis.....	225
Tabellenverzeichnis.....	232

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Fotodokumentation
Anlage 2	Diagramme zu den Druckabfallmessungen

Vorbemerkungen

Das Forschungsvorhaben "MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von $MgCl_2$ -Lösung (MgO-SEAL)" wurde unter der Projektnummer 02E11435 aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert und vom Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT) betreut.

Das Projekt MgO-SEAL ist eine Weiterführung des Vorhabens CARLA II, das von April 2004 bis Juni 2010 bearbeitet wurde. Einige der im CARLA II-Vorhaben geplanten Untersuchungen und Fragestellungen konnten nicht umfassend durchgeführt und beantwortet werden, sodass einige Aspekte zurückgestellt wurden. Diese sollten durch das Projekt MgO-SEAL teilweise beantwortet werden.

Die Projektlaufzeit begann am 01.10.2015 und endete am 31.07.2017. Für weitere Versuche und deren Auswertungen wurde zunächst eine einjährige Verlängerung („Haltephase“) bis zum 31.07.2018 beantragt und genehmigt. Im Anschluss wurde das Projekt nochmals bis zum 31.03.2019 verlängert. Der vorliegende Abschlussbericht umfasst somit alle Versuche, Untersuchungen und Auswertungen zwischen dem 01.10.2015 und dem 31.03.2019.

Am Vorhaben waren die folgenden wissenschaftlichen Einrichtungen und Unternehmen maßgeblich unter der Projektleitung der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (IfBuS) (Prof. Dr. W. Kudla, Dr. M. Gruner, J. Arendt, M. Hofmann, V. Beyer) beteiligt:

- TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie (IfAC): Dr. D. Freyer, Dr. I. Paschke
- Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig (IfG): Dr. K. Salzer, Dr. T. Popp
- Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik Wilsnack & Partner Freiberg (IBeWa): Dr. T. Wilsnack, Dr. F. Grafe
- GTS GmbH & Co. KG: E. Fillinger, J. Biegler
- TS-BAU GmbH, Niederlassung Jena: O. Einicke, J. Schrade, T. Schmidt
- Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA): B. Müller

Kurzfassung

Im Rahmen des vorangegangenen FuE-Vorhabens 02C1204 (Projekt CARLA II) wurde 2006 ein Abdichtbauwerk aus MgO-Spritzbeton im Carnallitgebirge in der Grube Teutschenthal errichtet. Nach mehrjähriger Stand- und Reifezeit wurden während des FuE-Projektes MgO-SEAL die Arbeiten und Untersuchungen an dem ca. 10 m langen Dammbauwerk GV2 weitergeführt. Versuchsziel des Vorhabens MgO-SEAL war es, das chemische, geomechanische und geohydraulische Langzeitverhalten des MgO-Spritzbetonbauwerkes (mit 8 Jahren Reifezeit) bei bzw. nach Lösungskontakt im Maßstab eines realen Bauwerkes zu quantifizieren und zu bewerten. Dies ist ein wesentlicher Beitrag zu einem (Langzeitsicherheits-)Nachweis der Integrität von Verschlusselementen aus MgO-Beton für zukünftige HAW-Endlager im Salinar.

Bei der Begutachtung des Bauwerkes wurde besonderes Augenmerk auf die Betonierabschnittsgrenzen (BAG) zwischen den einzelnen Spritzschichten als eine mögliche mechanisch-hydraulische Schwachstelle gelegt. Es wurden mehrere bis zu 6 m lange Bohrungen hergestellt. Die Betonierabschnittsgrenzen wurden in den Bohrlöchern mittels Kamerabefahrung und an den Kernen optisch und durch Festigkeitsprüfungen untersucht. Weiterhin wurden an den Bohrkernen und in-situ in den Bohrlöchern die Permeabilität sowohl mit Gas als auch mit ($MgCl_2$ -haltiger) NaCl-Lösung gemessen. Einige Messbereiche mit Betonierabschnittsgrenzen hatten anfänglich eine höhere Permeabilität als die Permeabilität im Inneren einer Spritzbetonschicht. Über den Messzeitraum von 800 Tagen verringerte sich die Permeabilität durch Selbstabdichtung. Von der Permeabilitätsverringering wurde auf eine Porositätsverringering durch Phasenumbildung geschlossen. Diese Porositätsverringering wurde in einem Modell rechnerisch nachvollzogen.

An den Kernproben wurden im Labor die Trockendichte, der Feuchtegehalt, die Porosität und die Porenraumsättigung bestimmt. Weitere Kernproben wurden phasenanalytisch untersucht und die Reaktionen zwischen MgO-Baustoff und den verwendeten Versuchslösungen analysiert. Entscheidend war dabei auch, wie die MgO-Proben getrocknet wurden. Des Weiteren wurden die Festigkeit und das Kriechverhalten des MgO-Betons in einachsialen Druckversuchen, Spaltzugversuchen, Haftzugversuchen und Kompaktionstests ermittelt.

Ein weiteres großes Arbeitspaket bestand in der Druckbeaufschlagung des Bauwerkes GV2 (aus dem Projekt CARLA) mit $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung über die Druckkammer. In insgesamt 17 einzelnen Druckbeaufschlagungen wurde ein Druck zwischen 0,4 bar und 28 bar aufgebracht und über mehrere Tage bis Monate konstant gehalten. Die in 7,1 m Entfernung zur Druckkammer installierten Feuchtesensoren detektieren mehrmals Flüssigkeitszutritt und Austrocknung. Etwa 16 Monate nach der Befüllung der Druckkammer trat erstmals Lösung an der Luftseite hervor. Die in zwei Messebenen am Widerlagerzahn verbauten Flächendruckgeber reagierten auf die jeweiligen Druckbeaufschlagungen mit Druckanstiegen. In der Messebene, die der Druckkammer am nächsten lag, stieg der Druck bei den höheren Druckstufen auf das gleiche Niveau wie in der Druckkammer an. Bei hohem Druck größer 12 bar fand auf die ersten Meter kein Potenzialabbau statt. Das Fluiddruckkriterium wurde hier aus den im Bericht dargelegten Gründen planmäßig nicht eingehalten.

Nach der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung und einer möglichst langen Einwirkzeit der Salzlösung ist ein Teil-Rückbau des Bauwerkes GV2 vorgesehen. Dieser wurde bereits während des Projektes MgO-SEAL geplant.

Im anschließenden Folgeprojekt („MgO-S³⁴“, Projektnummer: 02E11769A) wird das Vorhaben weitergeführt, da noch nicht alle Aspekte umfassend betrachtet werden konnten und sich neue Fragestellungen ergeben haben. So wird das GV2-Bauwerk an einem Bereich mit Lösungszutritt selektiv zurückgebaut und es sind weitere Bohrungen und Überbohrungen geplant. Außerdem soll die Spritzbetonrezeptur derart angepasst werden, dass die Spritzschichten dicker ausgeführt werden können, was zu einem homogeneren Damm mit weniger Spritzschichten führt. In Labor- und in-situ-Versuchen soll die neue Rezeptur erprobt werden.

Abstract

As part of the previous R & D project 02C1204 (project CARLA II), a sealing structure made of MgO shotcrete was constructed in 2006 in the in the mostly of carnallite bearing salt rock formation in the Teutschenthal mine. After several years of standing and maturing, the work and investigations on the approximately 10 m long dam GV2 were continued during the R & D project MgO SEAL. The objective of the project MgO-SEAL was to quantify and evaluate the chemical, geo-mechanical and geo-hydraulic long-term behavior of the MgO shotcrete construction (with 8 years maturing time) during and after solution contact on the scale of a real building. This is an essential contribution to the (long-term-safety-)proof of integrity of closure elements made of MgO concrete for future HAW repositories in saliferous system.

During the appraisal of the structure, special attention was given to the joints of concrete sections (BAG) between the individual sprayed layers as a possible mechanical and/or hydraulic weak point. Several drillings up to 6 m long were made. The BAGs were examined visually in the boreholes by means of camera inspection and by strength tests on the cores. Furthermore, permeability was measured with gas as well as with (MgCl₂-containing) NaCl solution at the cores and in-situ in the boreholes. At the beginning a few borehole sections with some BAGs had higher permeability. Over the measurement period of 800 days, the permeability decreased by self-sealing. This porosity reduction was computationally understood.

At the core samples the dry density, the humidity content, the porosity and the pore space saturation were determined in the laboratory. Further core samples were analyzed by phase analysis and the reactions between MgO-building-material and the used experimental solutions were considered. Another decisive factor was how the MgO samples were dried. Furthermore, the strength and creep behavior of the MgO concrete were determined in uniaxial compression tests, splitting tensile tests, adhesive tensile tests and compaction tests.

Another major work package was the pressurization of the dam with MgCl₂ / CaCl₂ solution via the pressure chamber. In a total of 17 individual pressure loads, pressures between 0.4 bar and 28 bar were applied and kept constant over several days to months. The humidity sensors, installed in a distance of 7.1 m from the pressure chamber, detected liquid ingress and subsequent drying several times. About 16 months after the filling of the pressure chamber, solution appeared for the first time on the air side. The surface pressure sensors installed in the two measuring planes on the abutment tooth reacted to the respective pressure loads with pressure increase. In the measuring plane closest to the pressure chamber, the pressures at higher pressure levels rose to the same level as in the pressure chamber. No potential reduction took place here at a pressure above 12 bar. The fluid pressure criterion was not met as planned for the reasons explained in the report.

After applying the liquid pressure and allowing the salt solution to react as long as possible the dismantling is planned and was already planned during the MgO-SEAL project.

In the subsequent follow-up project ("MgO-S³", project number: 02E11769A) the project will be continued, as not all aspects have been comprehensively considered or new questions have emerged. Thus, the dam is selectively dismantled at an area of solution entry and further drilling and overbores are performed. In addition, the sprayed concrete formulation should be adapted so that the sprayed layers are thicker, resulting in a more homogeneous dam with fewer sprayed layers. In laboratory and in-situ experiments, the new recipe is being tested.

1 Einleitung

MgO-Beton ist als möglicher Baustoff für Verschlussbauwerke (Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse) für zukünftige HAW-Endlager im Salinar bekannt.

Am 28.-29. April 2015 fand ein Fachgespräch "*Verschlusssysteme – In-situ-Bauwerke aus Magnesiabaustoff und dessen chemisch-mechanische Eigenschaften im Hinblick auf HAW-Endlager*" statt. Im Rahmen der auf dieser Veranstaltung gehaltenen Vorträge wurde der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zum MgO-Baustoffsystem dokumentiert. Vom Projektträger Karlsruhe – Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) wurde ein Materialband aller Vorträge herausgegeben, der öffentlich über die folgende Adresse verfügbar ist: http://www.ptka.kit.edu/downloads/ptka-wte-e/FG_Verschluss_2015_Vortraege_Web-Version.pdf. Auf den Inhalt dieses Materialbandes wird ausdrücklich verwiesen.

Ein Meilenstein bei der Entwicklung von MgO-Baustoffen sind die im Rahmen des FuE-Vorhabens 02C1204 (Projekt CARLA II) in der Grube Teutschenthal im Carnallitgebirge errichteten Versuchsbauwerke aus MgO-Beton. Insbesondere der im Jahr 2008 in Spritzbetonbauweise errichtete Großversuch GV2 stellt ein maßgebliches Untersuchungsobjekt für den Nachweis der Funktionstüchtigkeit und Langzeitstabilität von MgO-Beton dar.

Mit den im Vorhaben CARLA II erzielten Forschungsergebnissen wurden die wissenschaftlichen Grundlagen für die Errichtung langzeitsicherer Abdichtbauwerke in horizontalen Grubenbauen im leichtlöslichen Carnallit-Gebirge geschaffen. Diese Grundlagen sind nicht nur für Carnallit, sondern auch für Steinsalz als potentiell Wirtsgestein und somit auch für zukünftige HAW-Endlager relevant.

Hervorzuheben ist das im Vorhaben CARLA II entwickelte Verfahren für die Errichtung eines kompletten Verschlusselementes aus MgO-Beton in Spritzbetonbauweise. Gegenüber der traditionellen Ortbetonbauweise kann durch die Spritzbetonbauweise die infolge Hydratation maximal mögliche Temperatur im Bauwerk und an der Gebirgskontur erheblich gesenkt werden. Durch die niedrigere Temperatur (40°C – 45°C) verringert sich die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur ($\Delta T < 20$ K) und damit der Temperaturgradient im Bauwerk, was zu geringeren thermisch induzierten Zugspannungen führt. Weiterhin wird die thermische Kontraktion des Bauwerkes verringert, wodurch die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung potenzieller Fugen im Kontaktbereich vermindert wird.

Eine zentrale Fragestellung bei MgO-Beton ist das Verhalten des Baustoffes bzw. des Dammbauwerkes bei bzw. nach Zutritt von MgCl₂-haltiger Salzlösung. Das aus MgO-Spritzbeton erstellte Bauwerk GV2 wurde im Zeitraum Februar bis September 2008 errichtet. Es weist somit zum Beginn des Forschungsvorhabens MgO-SEAL (2015) eine Stand- bzw. Reifezeit von ca. 7 Jahren auf.

Da der entwickelte MgO-Spritzbeton im Bauwerk GV2 auch bei einem Angriff von MgCl₂-haltigen Lösungen seine positiven Eigenschaften (sehr geringe Permeabilität und hohe Festigkeit) nicht verliert bzw. sogar verbessern sollte, ist das Verhalten von realen Dammbauwerken aus MgO-Beton für möglicherweise in Steinsalz- oder Kalisalzformationen zu errichtende Abdichtbauwerke in Deutschland von großem Interesse. MgO-Beton mit der 5-1-8-Bindemittelphase kann unter Einspannung als geeigneter Baustoff für Widerlagerelemente mit Dichtfunktion betrachtet werden. Der Langzeitsicherheitsnachweis ist als Integritätsnachweis (Umwandlung in die 3-1-8-Bindemittelphase bei Lösungszutritt ohne Verlust der erforderlichen mechanisch-hydraulischen Parameter) zu führen.

Die diesbezüglich an der GV2-Spritzbeton-analogen Baustoffrezeptur D4 im Labormaßstab durchgeführten Versuche belegen, dass beim Angriff von NaCl-gesättigter, MgCl₂-haltiger Lösung die Phasenumwandlung der 5-1-8-Phase in die thermodynamisch stabile 3-1-8-Phase

mit einem Volumenzuwachs und bei einer entsprechenden Einspannung mit dem Aufbau eines Kristallisationsdruckes verbunden ist. Dies führt bei einer vollständigen Einspannung zu einer „Selbstabdichtung“, d.h. zu einer weiteren Reduzierung der ohnehin bereits geringen Permeabilität [AU1].

Das noch nicht mit einer Salzlösung beaufschlagte Dammbauwerk GV2 mit der vorhandenen und bis heute funktionierenden Instrumentierung (Druckgeber, Feuchtedektoren) bietet die Möglichkeit, das Verhalten von MgO-Beton mit 5-1-8-Bindemittelphase auch im Maßstab eines realen Dammbauwerkes zu verifizieren (siehe Abschnitte 3 bis 5).

Weiterhin wurden Langzeit-Bohrlochversuche in-situ im MgO-Beton mit Lösungsbeaufschlagung durchgeführt. Dazu wurden zwei Lösungen eingesetzt: eine NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung (ca. 2 mol Mg²⁺/kg H₂O) und eine reine, gesättigte NaCl-Lösung (Mg²⁺-frei).

Ziel der vorgesehenen Untersuchungen war es, das Langzeitverhalten des MgO-Spritzbetonbauwerkes nach Lösungskontakt im Maßstab eines realen Bauwerks, einschließlich des geomechanischen und geohydraulischen Verhaltens, zu quantifizieren und zu bewerten. Dies ist ein wesentlicher Beitrag für einen Nachweis der Integrität von Verschlusselementen aus MgO-Beton mit 5-1-8-Bindemittelphase für zukünftige HAW-Endlager im Salinar im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. Nach entsprechenden pneumatischen und hydraulischen Tests am GV2 ist dazu auch ein selektiver Rückbau des GV2 mit anschließenden detaillierten Materialuntersuchungen (Phasenbestand, Festigkeiten) vorgesehen. Dieser Rückbau ist nicht Bestandteil des Vorhabens MgO-SEAL. Er wird aber im Rahmen dieses Vorhabens geplant (siehe Abschnitt 6).

Der MgO-Beton D4 kann in zukünftigen HAW-Endlagern als Widerlagermaterial mit Dichtfunktion für Schachtverschlüsse (als Ortbeton) und für Streckenverschlüsse (als Spritzbeton) sowohl im Steinsalz als auch im Anhydrit eingesetzt werden.

2 Versuchsplanung und Voruntersuchungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV“ (CARLA) war eine Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung der zwei Bauwerke GV1 und GV2 vorgesehen. Jedoch wurde aufgrund der geringen Kontaktdruckspannungen zwischen Gebirge und Bauwerk auf eine Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung zunächst verzichtet. Es wurden alternativ pneumatische Vortests an beiden Bauwerken während und nach Abschluss der Errichtung durchgeführt. Hierfür wurde mit Tracergas dotierte, trockene Druckluft verwendet. Diese strömungstechnischen Bauwerkstests und deren Auswertung wurden von der IBeWa-Ingenieurpartnerschaft durchgeführt. [AU1] [AU2]

2.1 Standortbeschreibung

Während des Forschungsvorhabens CARLA wurden in der Grube Teutschenthal drei Großversuchsbauwerke zur Erprobung von Funktionselementen zum Streckenverschluss realisiert. Die Bauwerke befinden sich jeweils in einem Streckenstummel auf der 3a-Sohle in der Grube Teutschenthal in einer Tiefe von 613,45 mNN bzw. 723,45 m unter Gelände. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsortes. Von der Versuchsstrecke aus wurden die Streckenstummel aufgefahren. Von der parallelen Begleitstrecke werden die Bauwerke über die jeweiligen Druckleitungen und -kammern mit Luft bzw. Flüssigkeit beaufschlagt, um so einen Lösungszutritt zu simulieren.

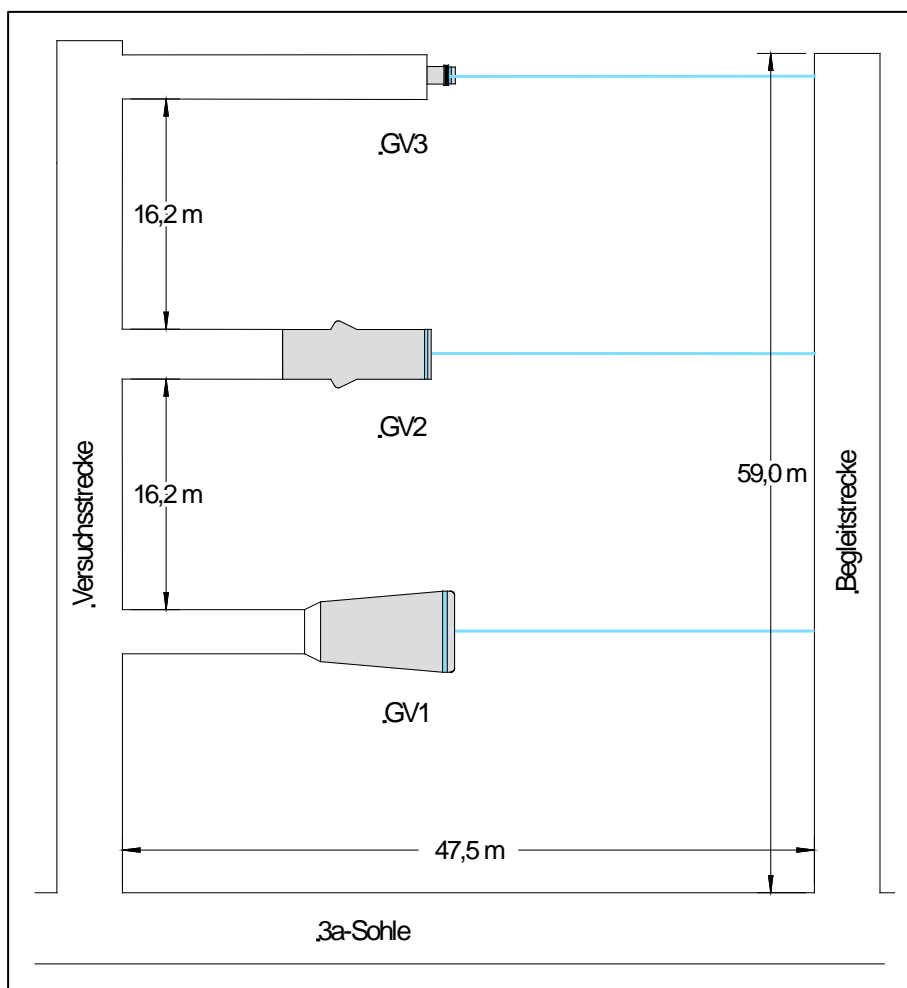


Abbildung 1: Lage und Anordnung der in-situ Großversuche GV1, GV2 und GV3 am Versuchsort (Grundriss)

Für die Bauwerke kamen zwei verschiedene Materialien und drei verschiedene Einbautechnologien zum Einsatz. Der GV1 besteht aus einem MgO-Beton, der als Ort beton verbaut wurde. Der GV2 besteht ebenfalls aus einem MgO-Beton, mit einer veränderten Zusammensetzung gegenüber dem GV1. Dieser wurde als Spritzbeton eingebracht. Der GV3 besteht aus einem Asphaltdichtelement und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Der GV1 besteht aus einem kegelstumpfförmigen Pfropfen. Eine Übersicht zum Bauwerk GV1 zeigt Abbildung 2.

Das Bauwerk hat an der Druckkammer einen Durchmesser von 5,60 m und an der Luftseite von 4,37 m. Der Dammkörper wurde von September 2006 bis Oktober 2007 erstellt. Die 0,25 m mächtige Druckkammer besteht aus Korundfiltersteinen. Das 9,5 m lange Versuchsbauwerk GV1 wurde in 13 Betonierabschnitten hergestellt. Vor der Betonage wurde eine Schalung aus Holz aufgestellt, hinter die der Beton eingefüllt wurde. Die Betonierabschnitte haben eine durchschnittliche Mächtigkeit von ca. 0,65 m. Im Bauwerk wurden zwei Ebenen (ME1 und ME2) zur Messung der Kontaktdrücke zwischen Bauwerk und dem umliegenden Gebirge sowie eine Messebene zur Indikation eines Feuchtezutritts (Feuchtemessebene) in Nähe der Luftseite errichtet. Weiterhin wurde erstmalig die Kontaktzone mit 2K-Injektionsbitumen über umlaufende Ringleitungen verpresst.

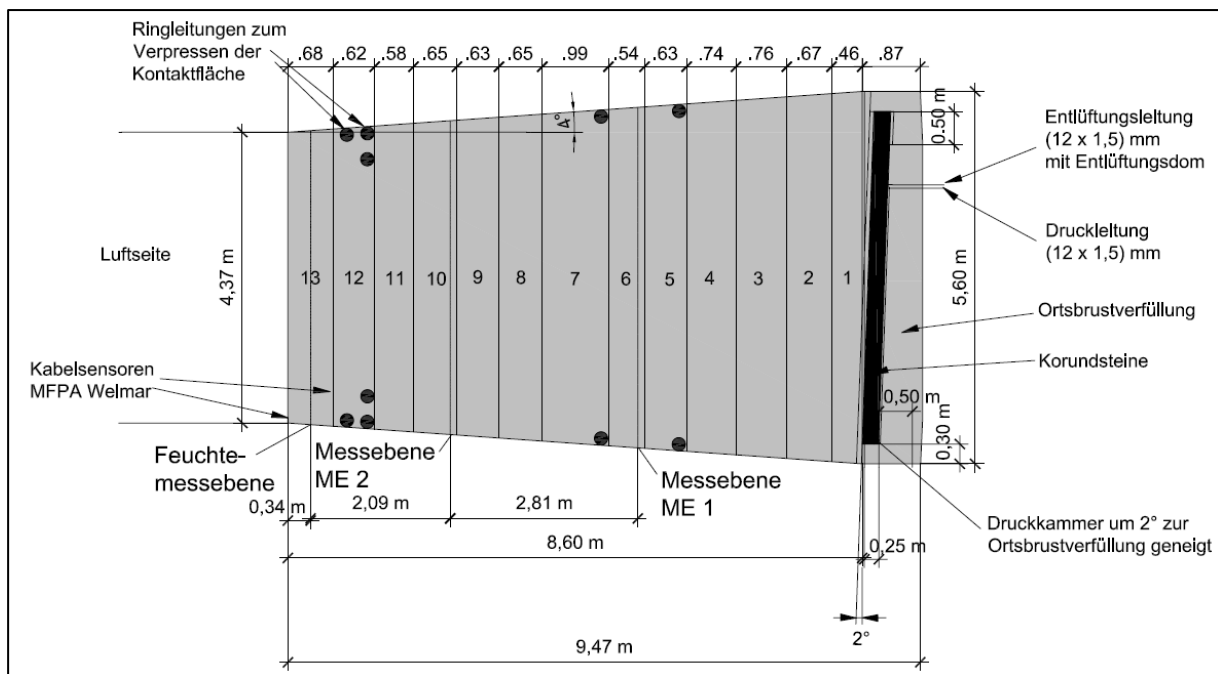


Abbildung 2: Versuchsbauwerk GV1 im Profilschnitt

Der Querschnitt des Bauwerkes **GV2** ist annähernd quadratisch. Eine Übersicht des Bauwerkes GV2 zeigt Abbildung 3. Der Hohlraum wurde mit einer Teilschnittmaschine vom Typ Alpine Miner AM 50 aufgeföhrt. Dadurch sind die Ecken entsprechend der Schneidkopfgeometrie mit einem Radius von 0,3 m abgerundet. Der für den GV2 mit der Teilschnittmaschine aufgeföhrtene Streckenstummel hat einen Querschnitt von ca. 3,20 m Breite und 3,20 m Höhe. Dieser wurde mit Hilfe des Minibaggers, der mit einem Fräskopf ausgestattet war, auf einen Querschnitt von ca. 3,55 m Breite und 3,55 m Höhe nachgeschnitten, sodass die seit der Aufgeföhrtung des Streckenstummels gebildete Verwitterungsschicht abgetragen wurde. Die Zahnkontur wurde mittels Seilsägeverfahren hergestellt. Der Dammkörper wurde von Februar 2008 bis September 2008 erstellt. Analog zum GV1 besteht auch die Druckkammer des GV2 aus 0,25 m mächtigen Korundfiltersteinen. Auf diese wurde der Spritzbeton direkt aufgetragen.

Der Pfropfen wurde aus insgesamt 104 Lagen gespritzt, bis die geplante Länge von 10,25 m erreicht wurde. Aus Vorversuchen war bekannt, dass trotz des Fehlens eines Erstarrungsbeschleunigers eine Spritzschichtmächtigkeit von ca. 10 cm möglich ist, die auch im Großversuch angestrebt wurde. In der Realität konnten vereinzelt Schichtmächtigkeiten von 14 cm bis in einem Fall 19 cm erreicht werden. Andererseits wurden in schwierigen Bereichen im Widerlagerzahn (größerer Querschnitt, Verlegung von Messkabeln und Injektionsleitungen) nur Schichtmächtigkeiten von 4 cm bis 8 cm (in einem Fall 2 cm) erreicht.

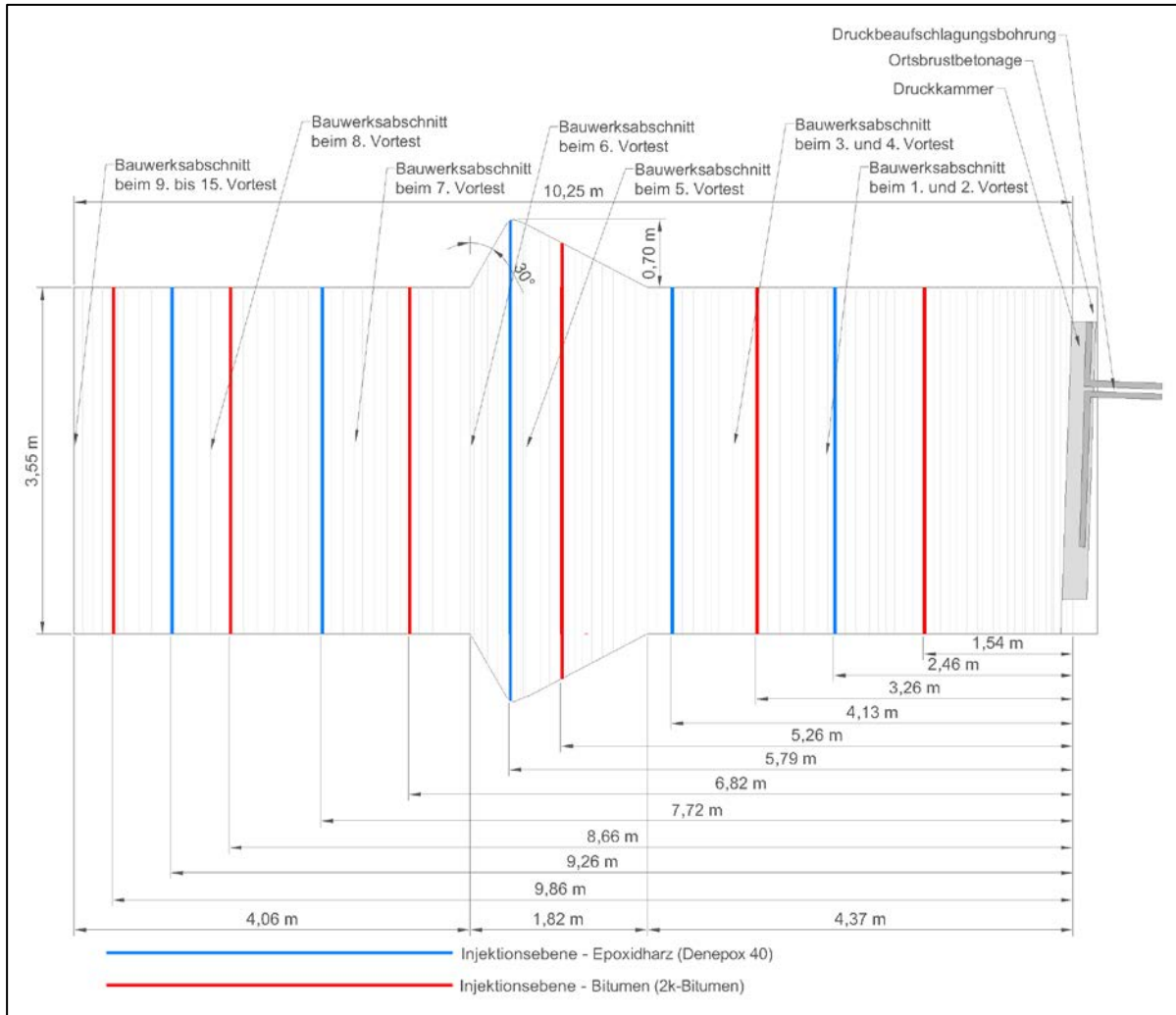


Abbildung 3: Versuchsbauwerk GV2 im Profilschnitt

Es wurde erstmalig eine für die Spritzbetontechnologie geeignete MgO-Beton-Rezeptur entwickelt, die folgende Zusammensetzung hat:

MgO:	15,6 Masse-%
Zuschlag 0-8 mm	73,0 Masse-%
R-Lösung:	11,4 Masse-%

Als MgO wurde die Sorte G75 von der Firma STYROMAG aus der Steiermark / Österreich verwendet. Der Sand/Kies-Zuschlag wurde entsprechend den Vorgaben hinsichtlich der Kornverteilung von der Firma QuickMix geliefert. Die R-Lösung ist eine Mg-reiche Lösung, die im Gleichgewicht mit den Mineralen Halit, Carnallit, Kainit und Kieserit steht. Diese Lösung stand in der Grube Teutschenthal in einer einheitlichen Zusammensetzung zur Verfügung.

Da bei dem vorliegenden Chemismus der hochsalinaren Anmchlösung der Einsatz handelsüblicher Erstarrungsbeschleuniger nicht möglich war, konnte das Nassspritzverfahren nicht eingesetzt werden. Daher musste das Trockenspritzverfahren angewandt werden.

2.2 Pneumatische Dichtheitsprüfung

2.2.1 Pneumatische Vortests am GV2

Am Bauwerk GV2 wurden zwischen April 2008 und April 2009 15 pneumatische Vortests (PV) durchgeführt. Dabei wurde das Bauwerk über die Druckkammer mit Druckluft beaufschlagt.

PV 1 bis PV 8 fanden statt, während das Bauwerk errichtet wurde und PV 9 bis PV 15 nach der Fertigstellung des Bauwerkes. Während der Bauwerksherstellung wurde der Kontaktbereich mit Injektionen aus 2K-Bitumen und Denepox 40 schrittweise in verschiedenen Injektionsebenen vergütet (siehe Abbildung 3) [AU3]. Die Vortests wurden dabei meist nach der Injektion in einer der Verpressebenen durchgeführt, um den Erfolg der Injektionsmaßnahme zu überprüfen. Dabei variierten die Wartezeiten zwischen der Verpressung und dem Vortest zwischen einem Tag und 183 Tagen.

Die Ergebnisse aller pneumatischen Vortests am GV2 sind in Tabelle 1 aufgeführt (einschließlich des Vortests PV16, der im Projekt MgO-SEAL durchgeführt wurde).

Bei den ersten drei Vortests (**PV 1 bis PV 3**) wurde eine effektive Gaspermeabilität (= Systempermeabilität) integral für das Abdichtsystem von $2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ bzw. $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ festgestellt. Diese generell hohe Permeabilität wird zum einen auf die geringe Bauwerkslänge und zum anderen auf eine nicht ausreichende Verpressung bei einer einfachen 2K-Bitumeninjektion im Kontaktbereich zurückgeführt.

Anschließend erfolgte die erste Denepox-Injektion. Beim direkt anschließenden **PV 4** (1 Tag nach der ersten Denepox-Injektion) konnte die Permeabilität durch die Verpressung um ca. drei Größenordnungen auf $4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ für das Abdichtsystem reduziert werden. Allerdings hat sich die Permeabilität ca. 49 Tage nach der ersten Denepox-Injektion auf ca. $5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ erhöht (**PV 5**).

Nach weiteren drei Denepox-Injektionen wurde eine geringe effektive Gaspermeabilität für das Abdichtsystem von ca. $3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ in **PV 6 bis PV 10** ermittelt. Der Prüfdruck betrug bis zum PV 10 einheitlich ca. 0,1 MPa. Da nach der Fertigstellung des Bauwerkes die Abhängigkeit der Permeabilität vom Prüfdruck untersucht werden sollte, wurde der Prüfdruck auf 0,3 MPa im **PV 11** erhöht. Durch den höheren Prüfdruck erhöhte sich die Permeabilität um ca. eine Größenordnung auf $2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Eine Reduzierung des Prüfdruckes in den nachfolgenden Tests auf 0,1 MPa bei **PV 12** und 0,2 MPa bei **PV 13** konnte daran nichts mehr ändern. Auch bei **PV 14** und **PV 15** war die gemessene Systempermeabilität mit $3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ähnlich hoch wie in den vorherigen Tests.

Basierend auf diesen Beobachtungen wurde das Normalspannungskriterium (Lösungsdruck kleiner als die kleinere Hauptspannung) im Kontaktbereich bzw. der konturnahen Auflockerungszone wahrscheinlich überschritten oder die Verwitterung des tachyhydrit- und kieserithaltigen Carnallitgebirges ist für diese Permeabilitätserhöhung ursächlich. [AU2]

Die effektive Gaspermeabilität für den Kontaktbereich (von wenigen Zentimetern) zwischen Bauwerk und Gebirge liegt bei allen pneumatischen Vortests sowohl aufgrund der geringen, ermittelten effektiven Gaspermeabilität von Baustoff und Auflockerungszone als auch aufgrund der Flächenverhältnisse zwischen Kontaktbereich und gesamtem Abdichtsystem um etwa zwei Größenordnungen höher als $3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und damit bei ca. $3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$. [AU2]

Die Entwicklung der effektiven Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem bei den pneumatischen Vortests über die Zeit und somit über die Bauwerkslänge und die Injektionsstufen sind in Abbildung 4 dargestellt. Sowohl die Vergrößerung der Bauwerkslänge als auch die Injektionen des Kontaktbereiches hatten einen erheblichen Einfluss auf die Permeabilität des gesamten Systems (Bauwerk, Kontaktbereich einschl. Auflockerungszone). Bei geringer Bauwerkslänge ist die Permeabilität mit $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ noch vergleichsweise hoch. Mit zunehmender Bauwerkslänge und insbesondere mit der zweiten Denepox-Injektion verringerte sich die Permeabilität um mehrere Größenordnungen auf ein konstantes Niveau von etwa $3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Bei erhöhtem Prüfdruck während des PV 11 ($p_{\text{Prüf}} > p_{\text{max-Kontakt}}$) erhöhte sich die Permeabilität auf ca. $2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$.

Um die Permeabilität des Gesamtsystems nach über sieben Jahren Reifezeit und die Voraussetzungen eines Lösungsangriffes auf den MgO-Spritzbetondamm über die Druckkammer des GV2 zu prüfen, wurde im November 2015 ein weiterer pneumatischer Vortest (**PV 16**) im Rahmen des Projektes MgO-SEAL durchgeführt. Die ermittelte effektive Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem betrug ca. $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$. **Diese Erhöhung der Permeabilität wird auf eine fortschreitende Alteration des anstehenden, leichtlöslichen Carnallitgebirges durch Feuchte (Verwitterung) im Kontaktbereich bzw. in der Auflockerungszone zurückgeführt.**

In Abbildung 5 sind die Druckabfallkurven aller pneumatischen Vortests dargestellt. Da es sich bei einem pneumatischen Vortest prinzipiell um einen strömungstechnischen Bauwerkstest mit Gas in einem von hydraulisch abbindendem Baustoff beeinflussten Strömungsraum handelt, wurde in [AU2] prinzipiell darauf verwiesen, dass die Permeabilität über die gegebenenfalls im Bauwerk bzw. im Kontaktbereich verbliebene Feuchte beeinflusst sein kann. Dies würde bei einer Reduzierung der Feuchte (z.B. durch Schwinden, Abkühlen) im Laufe der Zeit zu einer Erhöhung der effektiven Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem führen. [AU2]

Das unverritzte Carnallitgebirge außerhalb der Auflockerungszone weist eine Permeabilität von kleiner 10^{-22} m^2 auf. [AU4], [AU26]

Tabelle 1: Ergebnisse der pneumatischen Vortests am GV2; nach [AU2]

Versuch	Datum	Bauwerkslänge [m]	Injektion	Prüfdruck [MPa]	Integrale Systempermeabilität [m ²]
PV 1	07.04.2008	2,47	keine	0,10	$2 \cdot 10^{-14}$
PV 2	08.04.2008	2,47	1. Bitumen		
PV 3	13.05.2008	3,64	1. Denepox 2. Bitumen		$5 \cdot 10^{-14}$
PV 4	15.05.2008	3,64			$4 \cdot 10^{-17}$
PV 5	02.07.2008	5,66			$5 \cdot 10^{-15}$
PV 6	22.07.2008	6,20	2. Denepox	0,11	$3 \cdot 10^{-17}$
PV 7	16.09.2008	7,39	3. Bitumen	0,10	
PV 8	08.10.2008	8,80	3. Denepox		
PV 9	29.10.2008	10,26	4./5. Denepox 4./5. Bitumen		
PV 10	17.12.2008				
PV 11	22.01.2009			0,30	$2 \cdot 10^{-16}$
PV 12	20.02.2009			0,10	
PV 13	23.02.2009			0,20	
PV 14	25.03.2009			0,10	$3 \cdot 10^{-16}$
PV 15	29.04.2009			0,10	
PV 16	05.11.2015			0,30	

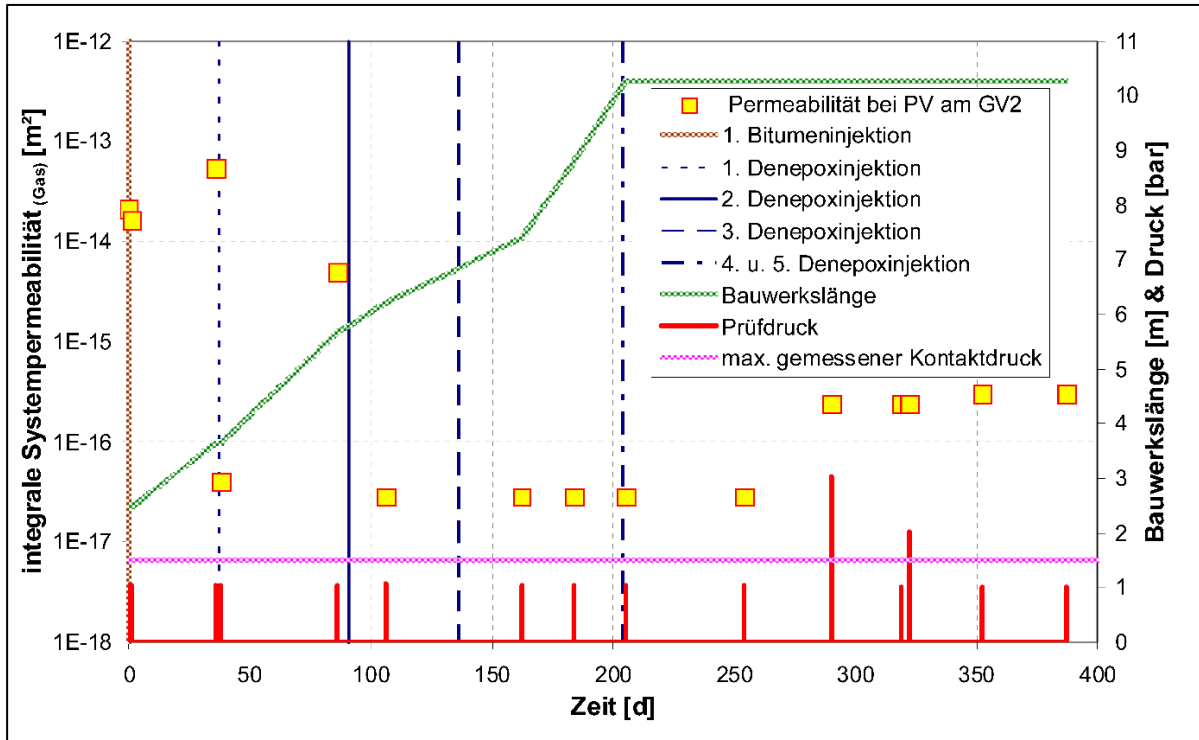


Abbildung 4: Permeabilität bei PV 1 bis PV 15

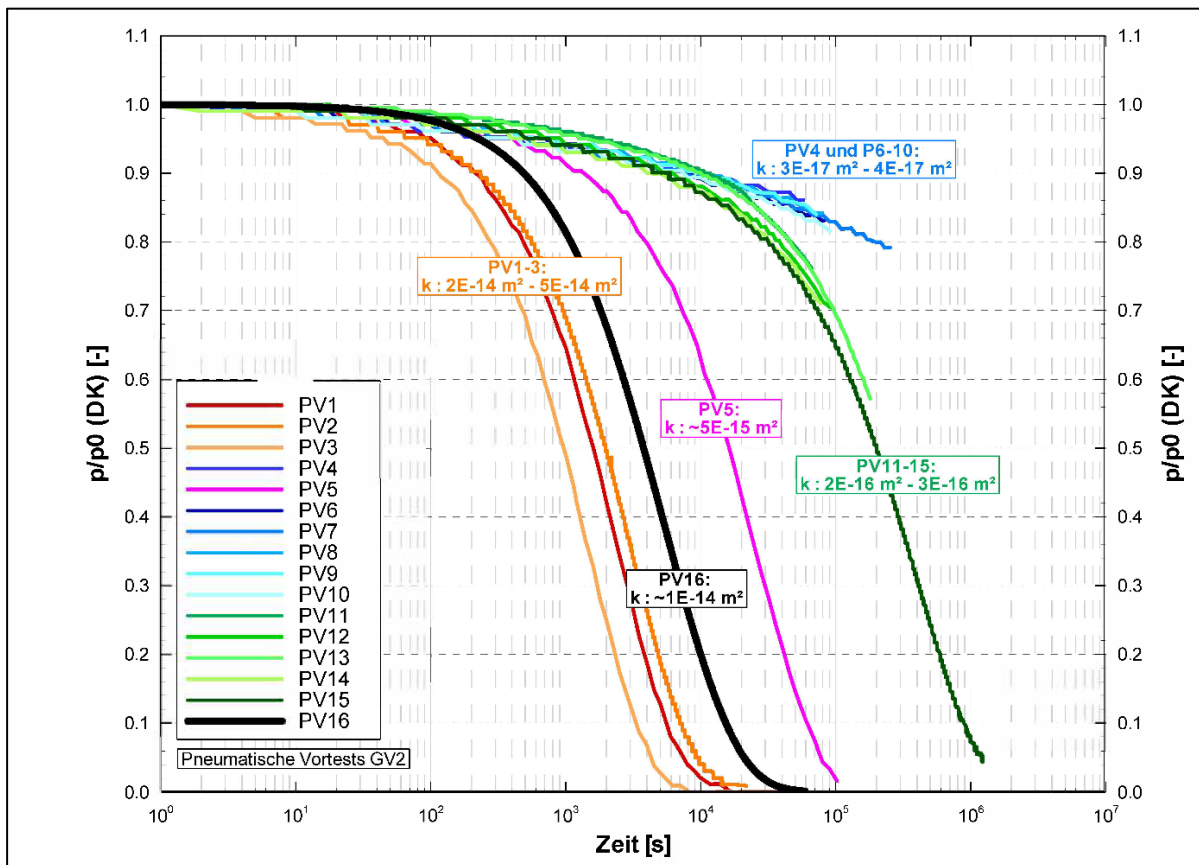


Abbildung 5: Druckabfallkurven bei den pneumatischen Vortests beim GV2

Bei den ersten drei pneumatischen Vortests wurde auf der Luftseite des Bauwerkes nahezu im gesamten Kontaktbereich **Tracergas** detektiert. An bis zu 70 Messpunkten konnte der Austritt gemessen werden.

Beim PV 4 wurde luftseitig kein Tracergas festgestellt. Gleichzeitig wurde ein Druckabfall aufgezeichnet, der auf das Abfließen des Gases innerhalb des Bauwerks bzw. in das Gebirge zurückgeführt wurde.

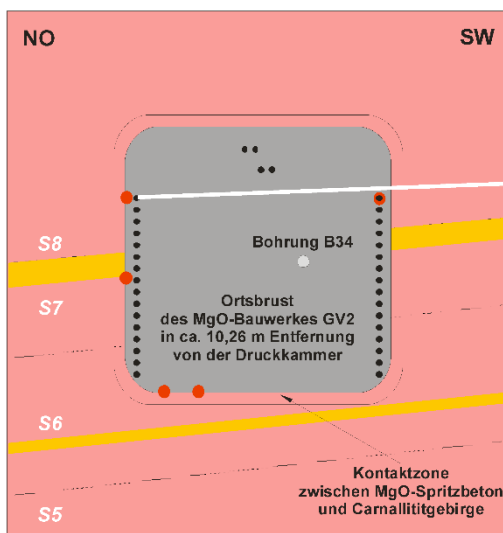
Beim PV 5 wurde ebenfalls kein Tracergas detektiert, jedoch ein stärkerer Druckabfall. Dies deutet an, dass der Gasaustritt lediglich verpasst wurde.

Bei den PV 6 bis PV 10 wurde ein geringerer Druckabfall als bei den anderen Vortests gemessen. Hier war luftseitig kein Tracergas ausgetreten.

Bei den PV 11 bis PV 15 konnte luftseitig Tracergas detektiert werden, welches insbesondere im Kontaktbereich ausgetreten ist. An bis zu 11 Messpunkten wurde ein Austritt registriert (Abbildung 6). [AU2]

Beim PV 16 wurde luftseitig an 38 Messpunkten der Austritt von Tracergas detektiert (Abbildung 7). Es hat sich somit nicht nur die Anzahl der Durchtrittsstellen erhöht, sondern das Gas trat auch wesentlich schneller durch (30 Minuten nach Aufbringen des Maximaldrucks bei PV 16 und 150 Minuten bei PV 15). Da der Großteil der Gasaustritte im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge detektiert wurde, kann daraus geschlossen werden, dass die Permeabilität dieser Kontaktzone die effektive Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem bestimmt.

PV 15

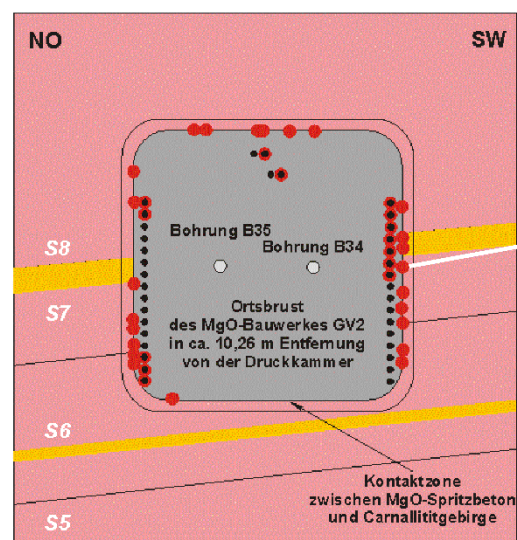


Legende

- Kaliflöz Staßfurt (K2), mittlerer Lagerteil
- stark auswitternde, tachyhydritreiche Zonen
- Punktmessung => hohe Tracergaskonzentration
- Leitungen mit Randumläufigkeiten (Tracergas)
- Leitungen ohne Randumläufigkeiten

Abbildung 6: Tracergasaustritte beim PV 15

PV 16



Legende

- Kaliflöz Staßfurt (K2), mittlerer Lagerteil
- stark auswitternde, tachyhydritreiche Zonen
- Punktmessung => hohe Tracergaskonzentration
- Leitungen mit Randumläufigkeiten (Tracergas)
- Leitungen ohne Randumläufigkeiten

Abbildung 7: Tracergasaustritte beim PV 16

Aufgrund des Durchtrittes von Tracergas und der gemessenen effektiven Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem, insbesondere der Permeabilitätssteigerung beim letzten pneumatischen Vortest, wurde auch ein Durchtritt von Lösung bei einer späteren Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung der Druckkammer zur Untersuchung des Lösungsangriffes als möglich/wahrscheinlich bewertet. Folglich wurde luftseitig eine Auffangrinne für durchgetretene Lösung im Mai 2016 gebaut (Abschnitt 5.1).

Des Weiteren wurden Argumente für und gegen nachträgliche Injektionen im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge diskutiert. Für weitere Injektionen spricht, dass die Druckbeaufschlagung mit geringerer Leckrate und eventuell höherem Flüssigkeitsdruck möglich ist. Außerdem besteht eine bessere Möglichkeit, die Kontaktdrücke infolge der Einwirkung der Lösung auf den MgO-Beton und das Gebirge unter höherem Druck zu messen. Gegen weitere Injektionen sprechen, dass eine effektive Permeabilität von $< 10^{-16} \text{ m}^2$ bei Zersetzung/ Verwitterung des Tachyhydrits nicht sicher erreicht werden kann. Ferner ist das vorliegende Gebirge nicht endlagerrelevant. Die ungewisse Erfolgswahrscheinlichkeit und der hohe, bisher nicht geplante Aufwand sprachen gegen Injektionen. Als Ergebnis wurde beschlossen, die Kontaktzone nicht zu injizieren.

2.2.2 Pneumatische Vortests am GV1

Für den GV1 waren nach Abschluss des CARLA-Projektes keine weiteren Untersuchungen geplant, da bereits die Spritzbetontechnologie im GV2 gegenüber der Ortbetonbauweise im GV1 als Vorzugsvariante erprobt und für sinnvoller und effektiver erachtet wurde. Aufgrund der Verschlechterung der Permeabilität um zwei Größenordnungen innerhalb von sieben Jahren am GV2 wurde beschlossen, auch am GV1 einen weiteren pneumatischen Vortest durchzuführen, um die Ergebnisse gegenüberstellen zu können.

Am Bauwerk GV1 wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens CARLA zwischen April 2007 und Oktober 2009 vier pneumatische Vortests durchgeführt. Der fünfte Vortest wurde analog zu PV 16 am GV2 nach sieben Jahren Reifezeit gegen Ende 2015 im Rahmen des Forschungsvorhabens MgO-Seal durchgeführt. Die Ergebnisse der Vortests sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Der **PV 1** erfolgte bei einer Bauwerkslänge von ca. 3,6 m ohne Injektionen. Die Vortests **PV 2 bis PV 4** erfolgten nach Fertigstellung und Vergütung des Bauwerks. Die effektive Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem konnte mit $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ bis $2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ bestimmt werden. Bei allen pneumatischen Vortests kam es an der Luftseite des Bauwerks zum Austritt von Tracergas, insbesondere im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge. Die effektive Gaspermeabilität integral im 4 cm breiten Kontaktbereich liegt in der Größenordnung von $4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ bis $6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$. Das konturnahe Carnallitgebirge weist eine effektive Gaspermeabilität von etwa $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ auf. [AU2]

Nach sieben Jahren Reifezeit konnte im **PV 5** aufgrund des ohnehin schon hohen Permeabilitätsniveaus nur eine unwesentliche Erhöhung ($3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$) festgestellt werden. Diese Vergrößerung der effektiven Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem wurde ebenfalls auf die Verwitterung und die damit einhergehende Schädigung des umgebenden Gebirges (insbesondere im Kontaktbereich und in der Auflockerungszone) zurückgeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse der pneumatischen Vortests am GV1; nach [AU2]

Versuch	Datum	Bauwerkslänge [m]	Injektionen	Prüfdruck [MPa]	Integrale Systempermeabilität [m^2]
PV 1	24.04.2007	3,6	keine	$< 0,05$	nicht bestimmt/ Nullmessung
PV 2	15.01.2008	8,4	1.-5. Bitumeninjektion	0,08	$1 \cdot 10^{-12}$
PV 3	23.01.2009			0,05	$2 \cdot 10^{-12}$
PV 4	29.10.2009			0,05	$1 \cdot 10^{-12}$
PV 5	16.12.2015			0,06	$3 \cdot 10^{-12}$

2.2.3 Vergleich der Permeabilität beim GV1 und GV2

Die gemessene effektive Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem aus den pneumatischen Vortests zwischen 2008 und 2015 für den GV1 und GV2 ist in Tabelle 3 enthalten. Beim GV1 liegt die Permeabilität des Abdichtsystems bei 10^{-12} m² über den gesamten Betrachtungszeitraum. Beim GV2 wurde eine Permeabilitätsreduzierung um zwei Größenordnungen (PV 1 zu PV 15) durch Vergütungsmaßnahmen des Kontaktbereiches am Ende des Projektes CARLA auf $3 \cdot 10^{-16}$ m² nachgewiesen. Diese Permeabilität konnte nach siebenjähriger Reifezeit nicht reproduziert werden. Es wurde eine Permeabilität von $1,2 \cdot 10^{-14}$ m², wie sie etwa auch im PV 1 bei geringer Bauwerkslänge und ohne Vergütung des Kontaktbereiches gemessen wurde, im PV 16 gemessen.

Wie aus dem Projekt CARLA bekannt, ist die Permeabilität integral für den Kontaktbereich alleine durchaus um etwa zwei Größenordnungen höher als die integral für das Abdichtsystem ermittelte Permeabilität.

Tabelle 3: Vergleich der gemessenen Permeabilität an GV1 und GV2

Pneumatischer Vortest	effektive Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem [m ²]	
	GV1	GV2
PV 1 (2008)	PV 1: $1 \cdot 10^{-12}$	PV 1: $2 \cdot 10^{-14}$
Letzter PV bei CARLA (2009)	PV 4: $1 \cdot 10^{-12}$	PV 15: $3 \cdot 10^{-16}$
Aktueller PV (2015)	PV 5: $3 \cdot 10^{-12}$	PV 16: $1,2 \cdot 10^{-14}$

Bei dem in Ortbetonbauweise hergestellten GV1 traten beim Abbinden hohe Temperaturen von über 100°C im Inneren und bis zu 75°C im Kontaktbereich auf [AU4]. Beim Abkühlen schrumpft der Beton. Somit kann der Betonkörper vom Gebirge abreißen [AU5]. Weiterhin begünstigt die hohe Temperatur die Zersetzung des Tachyhydrits. Somit war die ermittelte Permeabilität seit dem ersten pneumatischen Vortest vergleichsweise sehr hoch.

Im Gegensatz dazu war die Abbindetemperatur bei dem in Spritzbetonweise hergestellten GV2 mit maximal 43°C im Inneren des Baukörpers bzw. maximal 38°C an der Gebirgskontur deutlich geringer. [AU4] Das Spritzbetonverfahren war somit zunächst schonender für das umliegende Gebirge. Über den gesamten Betrachtungszeitraum verwitterte das konturnahe Gebirge allmählich, was zu einer langfristigen Erhöhung der Porosität und der Permeabilität in der Kontaktzone geführt hat. Dies wird dadurch bestätigt, dass ein Großteil der Tracergasaustritte im Kontaktbereich detektiert wurde.

Für beide Großversuche kann geschlossen werden, dass die effektive Gaspermeabilität integral für das Abdichtsystem durch lokale Wegsamkeiten im Kontaktbereich dominiert wird. Am GV1, der in Ortbetonbauweise hergestellt wurde, betrug die Permeabilität der Kontaktzone etwa $5 \cdot 10^{-11}$ m². Im Vergleich dazu war die Permeabilität der Kontaktzone beim Spritzbeton um bis zu drei Größenordnungen geringer. Diese wurde zwischen $1 \cdot 10^{-15}$ m² und $2 \cdot 10^{-12}$ m², in Abhängigkeit der Bauwerkslänge, der durchgeführten Injektionen und des Prüfdruckes gemessen.

Des Weiteren unterscheidet sich die Reichweite der Schädigung des carnallitischen Gebirges durch Temperatureinwirkung beim Abbinden des MgO-Baustoffes beim GV1 und GV2. So reichte die Schädigung beim Ortbeton 4 cm ins Gebirge, während es beim Spritzbeton nur ca. 1 cm war [AU5]. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich somit nicht nur auf den direkten Kontaktbereich, sondern auch auf den Bereich bis ca. 1 cm bis 4 cm in das Gebirge hinein.

Da Verschlussbauwerke für ein HAW-Endlager nicht in einem Tachyhydrit- und Kieserit-haltigen Gebirge errichtet werden, ist dieser Effekt allerdings nicht relevant für ein HAW-Endlager im Steinsalz.

Bereits während des vorangegangenen Projektes CARLA wurde die Verwitterungszone untersucht. Die Ergebnisse sind in [AU5] und [AU6] dargelegt. In Abbildung 8 ist die verwitterte

Kontur an einem Bohrkern zu sehen. Unmittelbar nach dem Freilegen der Kontur beginnt die Verwitterung, bei der sich der Carnallit zersetzt. Die Verwitterungszone hat eine Ausdehnung von wenigen Dezimetern in das Gebirge. Innerhalb der Verwitterungszone verringert sich die Permeabilität mit zunehmendem Konturabstand.

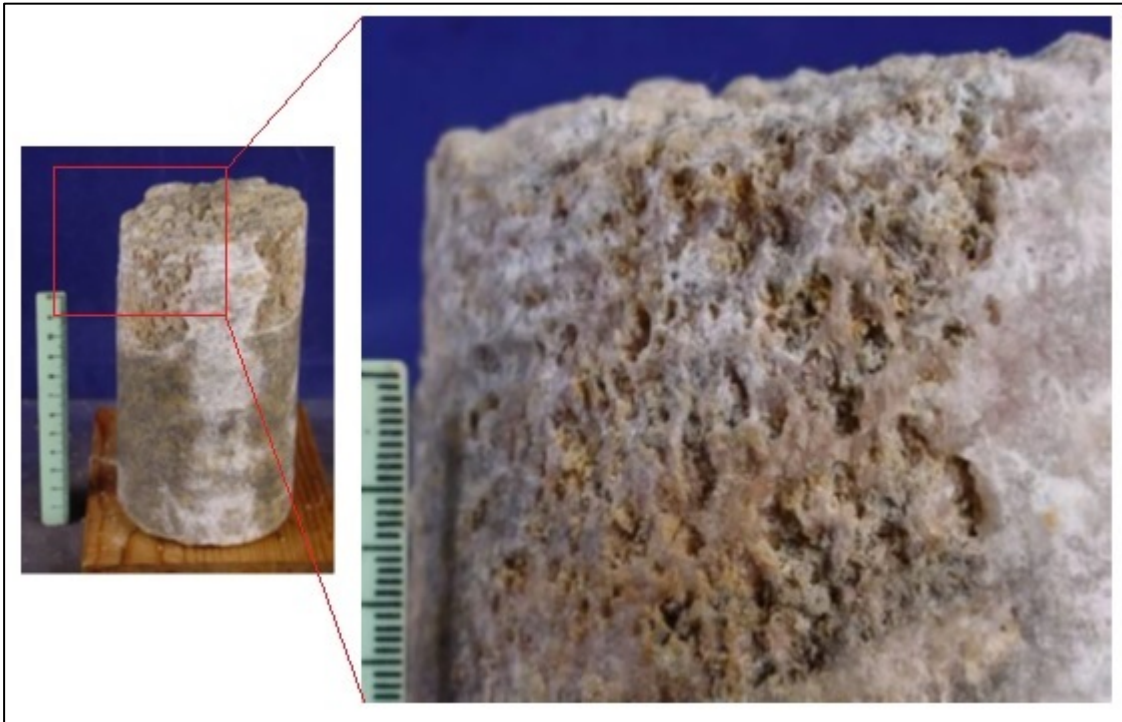


Abbildung 8: verwitterte Kontur [AU6]

Bereits während der Laufzeit des CARLA-Projektes [AU6] wurden für das Nahfeld der Großversuche strömungstechnische Kennwerte des Gebirges abgeleitet. Diese sind für GV1 und GV2 in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Abgeleitete strömungstechnische Kennwerte für die Großversuche 1 und 2

Kennwerte	Einheit	Konturabstand	GV1	GV2
Anzahl Messwerte	[-]	-	11	12
gemessene Permeabilität	[m ²]	0 m bis ca. 0,8 m	4·10 ⁻¹⁵ bis 2·10 ⁻²²	2·10 ⁻¹⁵ bis 3·10 ⁻²⁰
abgeleitete Permeabilität (Regression)	[m ²]	0 m	>7·10 ⁻¹⁶	>1·10 ⁻¹⁵
abgeleitete Permeabilität (integral)	[m ²]	0 m bis < 0,3 m	1·10 ⁻¹⁶	8·10 ⁻¹⁷
abgeleitete Permeabilität (Regression)	[m ²]	> 0,3 m	1·10 ⁻¹⁷	1·10 ⁻¹⁸

2.3 Entwicklung der Kontaktdrücke im GV2 vor den Druckbeaufschlagungen

Als Teil des Messkonzepts von CARLA wurden während der Errichtung des GV2 acht Glötzl-Druckkissen (GD) in zwei Messebenen im Bereich des Zahns (unsymmetrisch gestaltetes, prismatisches Widerlager mit steilerer Flanke entgegen der Druckbelastungsrichtung) installiert (Abbildung 3 und Abbildung 9). Die Messebene 1 befindet sich in 5,15 m Entfernung zur Druckkammer, die Messebene 2 in 6,0 m Entfernung. Zielstellung war es, die Kontaktdrücke zwischen Bauwerk und Gebirge vor bzw. während den Druckbeaufschlagungen zu messen. Zudem sollten die Messwerte mit den Berechnungsergebnissen zum geomechanischen und hydraulischen Verhalten für das Komplettbauwerk (Dammelemente, Kontaktbereich, ALZ, unverritztes Gebirge) verglichen werden.

Die detaillierten Einbau- und messtechnischen Randbedingungen sowie die vorläufigen geotechnischen Messergebnisse sind in den Berichten zum Vorhaben CARLA ausführlich dokumentiert ([AU4], [AU6], [AU7], [AU3]). Da möglichst hohe Injektionsdrücke bei einer Druckbeaufschlagung des Dammes realisiert werden sollten, sind die eingesetzten Druckkissen mit $p_{\max} \leq 10 \text{ MPa}$ (100 bar) entsprechend hoch ausgelegt, was die Auflösung der Messwerte in der hier angetroffenen Größenordnung von wenigen bar begrenzt.

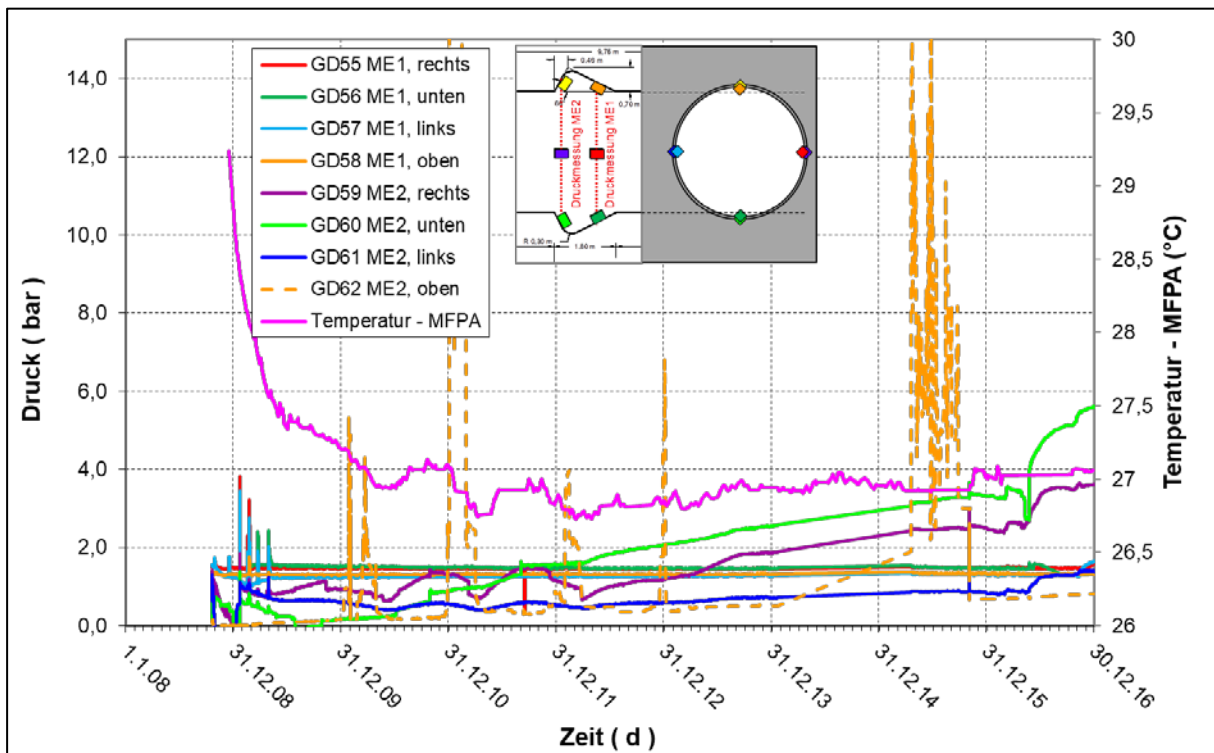


Abbildung 9: Entwicklung des Kontaktdruckes und der Temperatur beim GV2-Bauwerk seit Messbeginn (20.10.2008) bis zum 30.12.2016.

Entgegen den Erwartungen waren die gemessenen Kontaktdrücke nach Fertigstellung der Bauwerke GV2 und GV1 auf einem niedrigen Niveau ($\ll 1 \text{ MPa}$) und ohne zeitliche Zunahme, weshalb im Vorhabenszeitraum von CARLA auf eine hydraulische Druckbeaufschlagung verzichtet wurde (zur Vermeidung einer Verletzung des Minimalspannungskriteriums mit einem möglichen Aufreißen der Kontaktfuge). Es wurden nur pneumatische Drucktests mit einem geringen Druck zwischen 0,1 MPa und 0,3 MPa durchgeführt (Abschnitt 2.2). Darüber hinaus

wurde empfohlen, auch über die Vorhabenslaufzeit hinaus die Normalspannungen am Gebirgskontakt zu überwachen, was durch das IfG gewährleistet wurde. Als Ergebnis liegt vor den Druckbeaufschlagungen eine Messreihe von 8 Jahren¹ vor.

Von den ursprünglich acht Messgebern zeigen nur fünf (drei in Messebene 1 und zwei in Messebene 2) vor allem in Verbindung mit dem Langzeit-Temperaturverlauf (gemessen von MFPA) signifikante Druckänderungen (Abbildung 9). Zusätzlich ist (zeitlich höher aufgelöst) in Abbildung 10 die Entwicklung aller Messsignale dargestellt. Seit Frühjahr 2017 werden zusätzlich in der Zugangsstrecke zum GV2 die Lufttemperatur, -feuchte und der Luftdruck gemessen. Folgende Punkte sind hierbei von Bedeutung:

- Nach Fertigstellung von GV2 im Frühjahr 2009 nehmen die von MFPA im vorderen Dammbereich gemessenen Temperaturen von ca. 29°C über einen Zeitraum von mindestens 2 Jahren exponentiell ab und erreichen bis Mitte 2010 annähernd die Gebirgstemperatur von ca. 27°C. Die damit verbundene Bauwerkskontraktion ist an den Druckkissen an dem abnehmenden Kontaktdruck erkennbar. Die jahreszeitlichen Schwankungen bei Temperatur und Luftfeuchte wirken sich ebenfalls leicht auf den Kontaktdruck aus. Während vor allem die Luftfeuchte F_R jahreszeitlich bedingt zwischen ca. 25 % im Frühjahr und ca. 47 % im Juli/August variiert, ist die Temperatur mit ca. 27°C konstant und der Luftdruck schwankend (1065 mbar - 1090 mbar).
- Erst mit der Temperaturangleichung (ca. 2 Jahre nach Bauwerkserstellung) nimmt der Kontaktdruck bei einzelnen Druckkissen unterschiedlich stark und teilweise diskontinuierlich bis in die Größenordnung von wenigen Bar zu bzw. bleibt auch konstant. Die Funktionsfähigkeit der Druckkissen wird durch die durchgeführten pneumatischen Drucktests nachgewiesen, wobei jeweils eine Druckspitze zum Zeitpunkt des Tests auftritt.

Insgesamt dokumentieren die Messergebnisse, dass entgegen den in [AU8] beschriebenen Annahmen und durchgeführten Modellrechnungen der Kontaktdruck zu Beginn des Vorhabens MgO-SEAL nur auf einem sehr geringen Niveau liegt. Ursächlich ist vermutlich die unterschätzte Kompressibilität der verwitterungsbedingten Zone (VWZ, zusätzlich zur Auflockerungszone), die das Aufkriechen des Gebirges abpuffert. Weiterhin ist die Einbaulage der Druckkissen im Zahn wohl ungünstig, weil der Druck nicht senkrecht zur Dammachse gemessen wird. Insofern sind die tatsächlichen, konvergenzbedingten in der Kontaktfläche zwischen Damm und Gebirge vorliegenden Spannungsbedingungen unklar².

¹ in 2014 kam es mit Umstellung der Stromversorgung in der Grube zu einer langandauernden Messlücke.

² Zur Abklärung der in situ-Spannungsverhältnisse im Bauwerk (Dammkörper), Betonierabschnittsgrenzen und umgebenden Salzgebirge wird empfohlen, vor einem Rückbau von GV2 (z.B. im Rahmen des beantragten BMWi-Vorhabens MgO-S³) ein vollständiges Spannungsprofil der kleinsten Hauptspannung senkrecht zum Dammkörper zu bestimmen. Dafür ist eine horizontale Messbohrung aus dem Querschlag GV3 senkrecht in Richtung auf den Dammkörper von GV2 zu stoßen, womit an definierten Messpunkten sowohl die Spannungsverteilung im Bauwerk als auch im umgebenden Gebirge bestimmt werden kann. Zum Vergleich liegen IfG-Messungen aus 2009 vor, mittels derer in einem Messprofil vor GV2 in drei Messbohrungen (Firste, Ulme und Stoß) die Spannungsverteilung im Pfeiler zwischen GV2 und GV3 mittels Hydrofrac-Messungen bestimmt wurde. Sie zeigen das Bild eines Einzelpfeilers mit einem breiten Spannungsplateau von σ_{\min} = ca. 16 MPa und damit, in der Größenordnung des theoretischen Überlagerungsdrucks im Zentrum und einem Spannungsabfall in einer Saumzone von ca. 2 m (ALZ) in Richtung der angrenzenden Streckenstummel. Durch den Damm einbau sollte im angrenzenden Konturbereich zu GV2 σ_{\min} zwischenzeitlich konvergenzbedingt angestiegen sein, was durch die zunehmenden Kontaktdrücke teilweise dokumentiert wird.

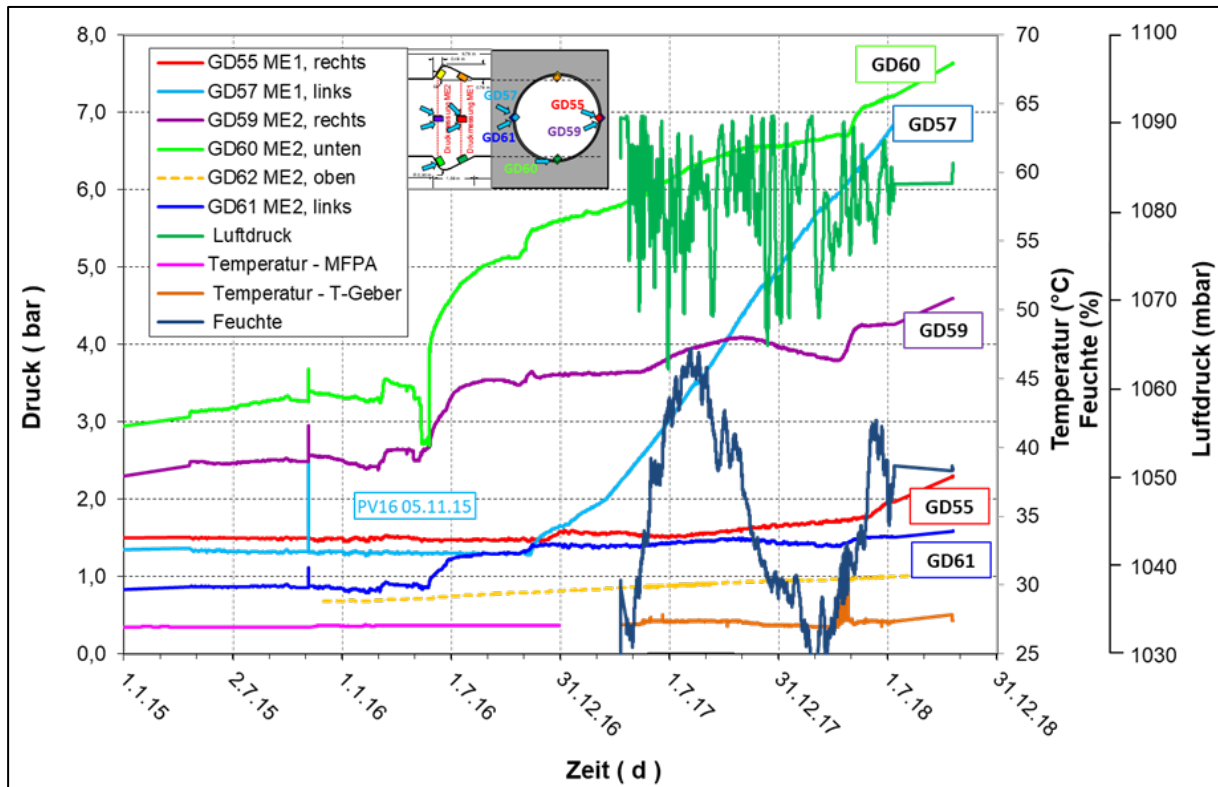


Abbildung 10: Entwicklung der Kontaktdrücke im GV2-Bauwerk nach Wiederaufnahme der in-situ-Arbeiten seit März 2016 sowie die Messwerte für Feuchte-, Temperatur und Luftdruckänderungen. Das Inset zeigt die Messposition der Druckkissen im Bereich des Zahns.

2.4 Bohrungen im GV2

Für die Untersuchungen des MgO-Betons wurden 11 Bohrungen hergestellt. In den Bohrlöchern wurde die Gas- und Lösungspereabilität untersucht. Des Weiteren wurden Bohrkern gewonnen, die im Labor hinsichtlich Phasenbestand, Porosität, Festigkeit und Permeabilität untersucht wurden.

In Tabelle 5 sind die am GV2 hergestellten Bohrungen aufgelistet. Abbildung 11 zeigt die Ortsbrust mit den Bohransatzpunkten. In Abbildung 12 ist der Längsschnitt mit den Bohrungsverläufen dargestellt. Die Lage der Bohrungen bezieht sich dabei auf das in Abbildung 11 angegebene Koordinatensystem.

Bei den Bohrlochuntersuchungen stand das Verhalten des MgO-Spritzbetons bei Lösungsangriff im Fokus. Außerdem sollte die Permeabilität an den Betonierabschnittsgrenzen genauer untersucht werden. Die Bohrungen B34 und B35 wurden bereits während des vorherigen Forschungsvorhabens CARLA hergestellt und in den Bohrlöchern die Permeabilität untersucht. Von besonderem Interesse war die zeitliche Entwicklung der Permeabilität.

In den Bohrungen B38 und B39 wurden durch das IfG Permeabilitätsuntersuchungen und Kamerabefahrungen durchgeführt. Die Bohrungen B42, B42a und B42b dienten der Gewinnung von Kernmaterial. Die Bohrungen B42a und B42b wurden jedoch aus technischen Gründen abgebrochen.

Für die vollständig gekernt abgeteufte 70-mm-Messbohrungen B40, B41 und B44 wurde ein Arbeitsprogramm entwickelt, welches die Kerndokumentation (Fotodokumentation, Kernansprache), Probenahme für Lösungsgehalts-, Permeabilitäts-, Porositäts- und Porengrößen-

verteilungsuntersuchungen für den kompakten MgO-Spritzbeton und für die Bereiche mit Betonierabschnittsgrenzen beinhaltet. Parallel dazu wurden die in-situ-Permeabilitätsuntersuchungen so geplant, dass ein Vergleich von in-situ und Laborergebnissen möglich ist [AU9]. Die Bohrungen B44 und B44a wurden schräg zur Sohle ausgeführt, um den Kontaktbereich und die Verpressmaterialien begutachten zu können.

Die Bohrlöcher wurden von TS BAU mit trockener Druckluft als Bohrspülung hergestellt.

In Anlage 1 ist eine Fotodokumentation zum Versuchsort zusammengestellt. Hier finden sich unter anderem auch Aufnahmen von der Herstellung der Bohrlöcher und von den Bohrkernen.

Tabelle 5: Übersicht zu den Bohrungen im GV2

Bezeichnung	Länge [m]	Durchmesser [mm]	Neigung [°]	Lage	
				x [m]	y [m]
B34	1,80	70	-12,0	2,45	1,97
B35	1,50	70	-12,0	1,06	2,07
B38	6,00	42	-5,5	1,76	1,29
B39	6,00	42	-5,5	2,56	1,31
B40	3,65	70	-11,5	0,92	2,82
B41	3,70	70	-11,5	2,65	2,70
B42	4,10	107	0	0,67	1,09
B42a	0,13	132	0	0,78	1,33
B42b	1,19	132	0	0,80	0,99
B44	1,82	70	-15,5	1,38	0,46
B44a	1,59	70	-15,0	2,11	0,41

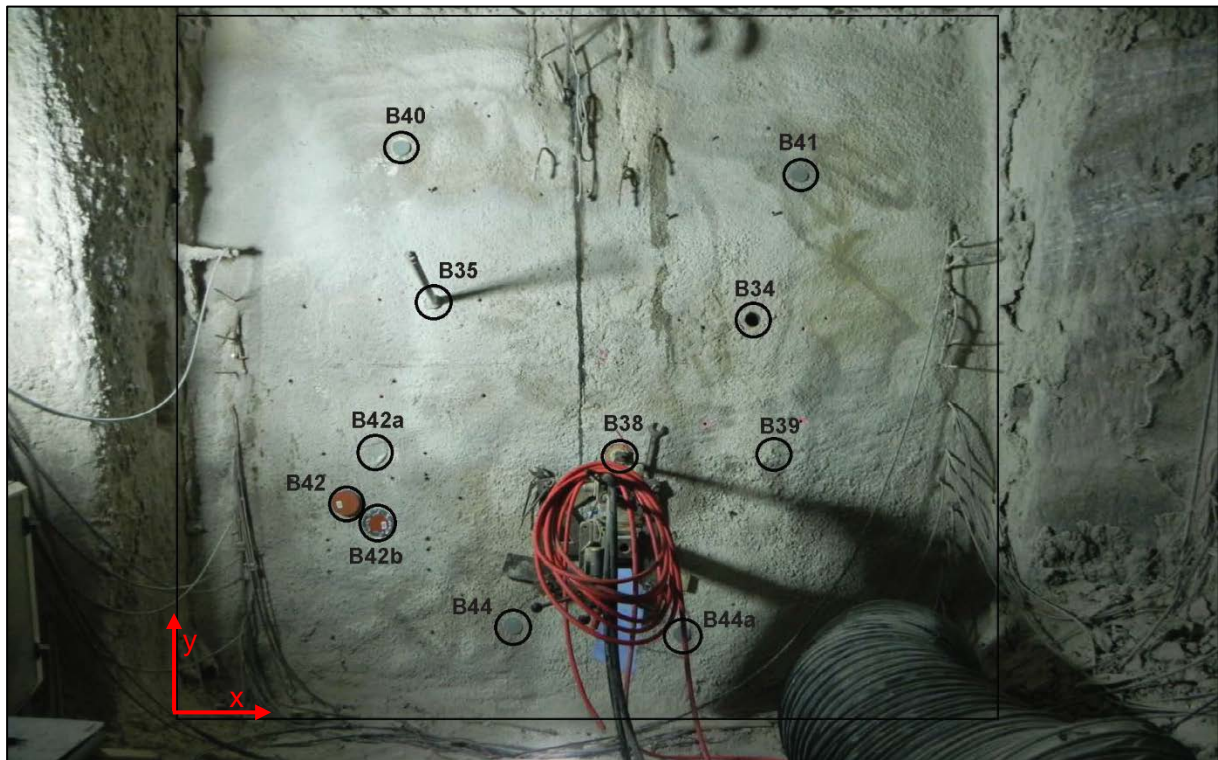


Abbildung 11: Ansicht der Ortsbrust des GV2 mit Lage der Bohransatzpunkte

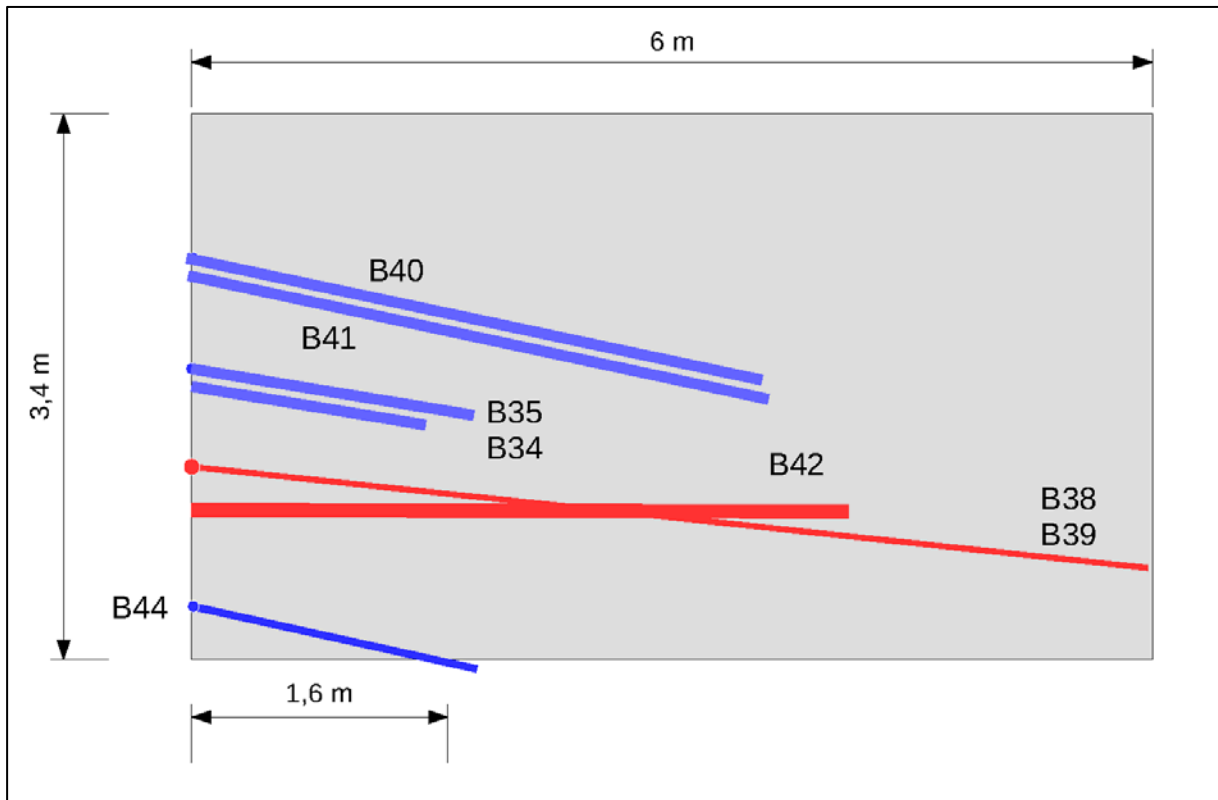


Abbildung 12: Längsschnitt zu den Bohrungsverläufen

3 Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus dem Bauwerk GV2

3.1 Bohrkernaufnahme

Aus den Kernbohrungen B40, B41 und B44 wurde über die gesamte Bohrlänge Kernmaterial mit ca. 50 mm Durchmesser bei einem Bohrdurchmesser von ca. 70 mm gewonnen. Bei jeder der Bohrungen konnte ein vollständiger Kern gewonnen werden. Bei der Ansprache der drei Kerne wurde insbesondere versucht, die Betonierabschnittsgrenzen (BAG) zu identifizieren. Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 fassen die Kernansprache für die Bohrungen B40, B41 und B44 zusammen.

Tabelle 6: Kernansprache B40

KS	Kernbereich	Kernstücklänge	Betonierabschnittsgrenzen				Brüche/ Besonderheiten
			aus Bauablauf [AU4]		aus Kernansprache*		
-	[m]	[m]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. AP]
1	0,00 - 0,34	0,34	10,16	0,09	10,19	0,06	0,03 ^a
							0,12 ^{a,d}
			10,06	0,19	10,08	0,17	0,16 ^a
							0,20 ^a
			9,96	0,29	9,96	0,30	0,23 ^a
				0,34 ^d			
2	0,34 - 0,80	0,46	9,86	0,4	9,83	0,43	0,50 ^a
			9,80	0,46	-	-	
			9,74	0,52	9,72	0,55	0,53
			9,59	0,67	9,53	0,74	0,58 ^d
							0,61
				0,70 ^d			
3	0,80 - 1,60	0,8	9,45	0,82	9,47	0,80	1,11 ^b
			9,26	1,01	9,39	0,88	
					9,30	0,97	
			9,15	1,12	9,18	1,09	
					9,14	1,13	
			8,99	1,29	8,99	1,29	1,40 ^a
		8,85	1,43	8,85	1,43		
4	1,60 - 2,04	0,44	8,66	1,62	-	-	durchgehend ohne Brüche
			8,51	1,78			
			8,37	1,92	8,42	1,87	
5	2,04 - 2,54	0,5	8,20	2,09	8,25	2,04	durchgehend ohne Brüche
			8,06	2,23	8,05	2,25	
			7,95	2,35	7,96	2,34	
			7,84	2,46	7,84	2,46	
6	2,54 - 3,04	0,5	7,72	2,58	7,72	2,58	durchgehend ohne Brüche
			7,61	2,69	7,67	2,63	
			7,49	2,82	7,51	2,80	
			7,37	2,94	-	-	
			7,29	3,02			
7	3,04 - 3,54	0,50	7,17	3,14	7,20	3,11	durchgehend ohne Brüche
			7,04	3,28	7,02	3,30	
			6,90	3,41	6,92	3,40	

KS	Kernbereich	Kernstücklänge	Betonierabschnittsgrenzen				Brüche/ Besonderheiten
			aus Bauablauf [AU4]		aus Kernansprache*		
-	[m]	[m]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. AP]
			6,82	3,50	-	-	
8	3,54 - 3,67	0,13	6,71	3,61	-	-	durchgehend ohne Brüche
			6,57	3,76			
Erläuterung: a) glatt durchgebrochen, b) unregelmäßiger Bruch, c) nicht durchgebrochen d) äußere Kanten abgeschlagen, e) äußere Kanten stark abgeschlagen, AP – Ansatzpunkt, DK – Druckkammer, KB – Kernbereich * anhand von Material- und Farbwechseln z.T. mit Poren (nicht gebrochen)							

Tabelle 7: Kernansprache B41

KS	Kernbereich	Kernstücklänge	Betonierabschnittsgrenzen				Brüche/ Besonderheiten			
			aus Bauablauf [AU4]		aus Kernansprache*					
-	[m]	[m]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. AP]			
1	0,00 - 0,27	0,27	10,16	0,09	10,22	0,03				
			10,06	0,19	10,09	0,16				
2	0,27 - 1,03	0,76	9,96	0,29	9,97	0,29	0,48 ^a			
			9,86	0,4	-	-				
			9,80	0,46	9,81	0,45				
						9,79	0,47			
						9,74	0,52	-	-	0,58 ^a
						9,59	0,67	9,65	0,61	0,72 ^a
						9,45	0,82	9,40	0,87	
			9,26	1,01	-	-				
			9,15	1,12	-	-				
3	1,03 - 1,68	0,80	8,99	1,29	9,01	1,27	1,11 ^a			
			8,85	1,43	8,84	1,44	1,38-1,58 m schräg verlaufender Riss (injiziert mit Denepox 40)			
			8,66	1,62	8,65	1,63				
4	1,68 - 2,14	0,46	8,51	1,78	8,58	1,79	2,02 ^b			
			8,37	1,92	8,50	1,93				
			8,20	2,09	8,35	2,08				
5	2,14 - 2,54	0,4	8,06	2,23	8,21	2,23				
			7,95	2,35	8,06	2,37				
			7,84	2,46	7,93	2,46				
6	2,54 - 2,93	0,39	7,72	2,58	7,83	2,54				
			7,61	2,69	7,76	2,70				
			7,49	2,82	7,60	2,84				
7	2,93 - 3,52	0,59	7,37	2,94	-	-				
			7,29	3,02	7,46	3,02				
			7,17	3,14	7,29	3,18				
			7,04	3,28	7,13	3,31				
			6,90	3,41	7,00	3,44				
			6,82	3,50	-	-				
8	3,52 - 3,72	0,20	6,71	3,61	6,88	3,56				

KS	Kernbereich	Kernstücklänge	Betonierabschnittsgrenzen				Brüche/ Besonderheiten
			aus Bauablauf [AU4]		aus Kernansprache*		
-	[m]	[m]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. AP]
Erläuterung: a) glatt durchgebrochen, b) unregelmäßiger Bruch, c) nicht durchgebrochen d) äußere Kanten abgeschlagen, e) äußere Kanten stark abgeschlagen, AP – Ansatzpunkt, DK – Druckkammer, KB – Kernbereich * anhand von Material- und Farbwechselln z.T. mit Poren (nicht gebrochen)							

Tabelle 8: Kernansprache B44

KS	Kernbereich	Kernstücklänge	Betonierabschnittsgrenzen				Brüche/ Besonderheiten
			aus Bauablauf [AU4]		aus Kernansprache*		
-	[m]	[m]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. DK]	[m v. AP]	[m v. AP]
1	0,00 - 0,65	0,65	10,16	0,09	10,18	0,07	
			10,06	0,20	10,11	0,15	
			9,96	0,31	9,96	0,30	
			9,86	0,41	9,85	0,42	
			9,80	0,47	-	-	
			9,74	0,53	9,72	0,55	
2	0,65 - 1,53	0,88	9,59	0,68	9,63	0,65	0,65
			9,45	0,83	9,47	0,81	
					9,33	0,95	
			9,26	1,03	9,21	1,08	
			9,15	1,14	9,04	1,25	
			8,99	1,31	-	-	
8,85	1,45	8,89	1,41	1,53			
3	1,53 - 1,77	0,24	8,66	1,65	8,65	1,66	1,61-1,70 m schräg verlaufender KB MgO-Beton/ K2C (injiziert mit 2K-Bitumen und Denepox 40)
4	1,77 - 1,82	0,05	-	-	-	-	1,77
							1,80
							1,82
Erläuterung: a) glatt durchgebrochen, b) unregelmäßiger Bruch, c) nicht durchgebrochen d) äußere Kanten abgeschlagen, e) äußere Kanten stark abgeschlagen, AP – Ansatzpunkt, DK – Druckkammer, KB – Kernbereich * anhand von Material- und Farbwechselln z.T. mit Poren (nicht gebrochen)							

Die Betonierabschnittsgrenzen sind in der Kernansprache sowohl bezogen auf die Druckkammer (m v. DK) als auch bezogen auf den Ansatzpunkt der Bohrung (m v. AP) angegeben. Kernabbrüche sind hingegen nur bezogen auf den Ansatzpunkt der Bohrung. Auf eine Interpretation der Kernabbrüche im Hinblick auf mögliche Betonierabschnittsgrenzen wurde bewusst verzichtet, da die Kerngewinnung sowohl aus der Bohrung als auch aus dem Kernrohr mit entsprechender mechanischer Belastung des Kerns verbunden war.

In der Bohrung B41 wurde im Kernbereich von 1,38 m v. AP bis 1,58 m v. AP (Tabelle 7) ein mit Denepox 40 injizierter Riss (Abschnitt 3.5) erbohrt.

Bei der Bohrung B44 wurde im Kernbereich von 1,61 m v. AP bis 1,70 m v. AP (Tabelle 8) der Kontaktbereich zwischen MgO-Spritzbeton und umgebendem Carnallitgebirge im Bereich einer Betonierabschnittsgrenze (Abschnitt 3.5.2) planmäßig erbohrt, da die Bohrung B44 schräg in die Kontur gebohrt wurde.

Basierend auf den Kernansprachen wurden die Proben für die Untersuchung der strömungstechnischen Parameter (Abschnitte 3.8, 3.9, 3.10 und 4) ausgewählt. Da festgestellt werden sollte, ob Unterschiede in der Permeabilität bei Kernen aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen im Vergleich zu Kernen aus dem Inneren einer Spritzschicht vorhanden sind, wurden sowohl Proben mit als auch ohne Betonierabschnittsgrenze (aus dem Inneren einer MgO-Spritzbetonschicht) genommen. Die Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Kerne der Bohrungen B40, B41 und B44 und die entsprechenden Probenahmebereiche.

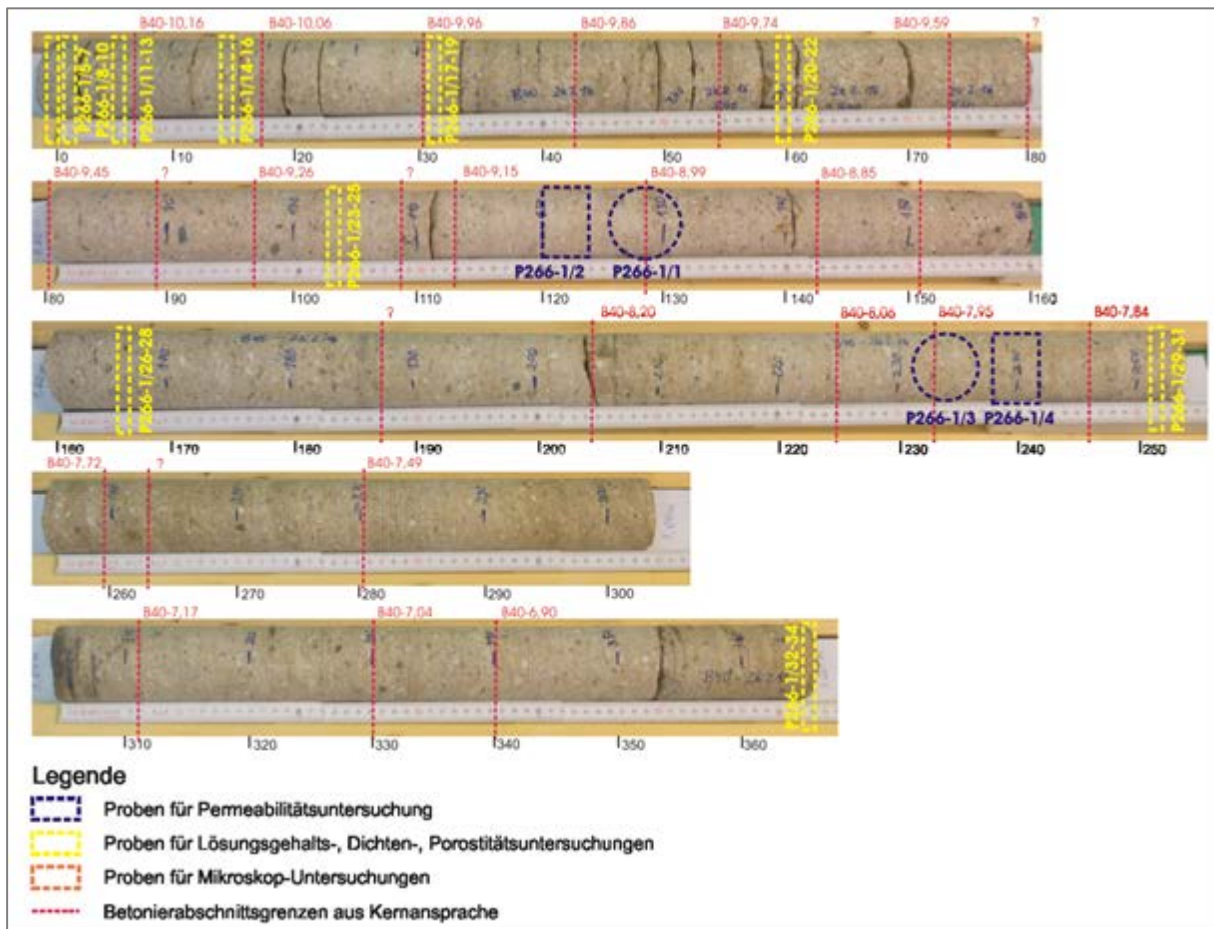


Abbildung 13: Kernfotos der Bohrung B40 mit Probenahmebereichen



Abbildung 14: Kernfotos der Bohrung B41 mit Probenahmebereichen

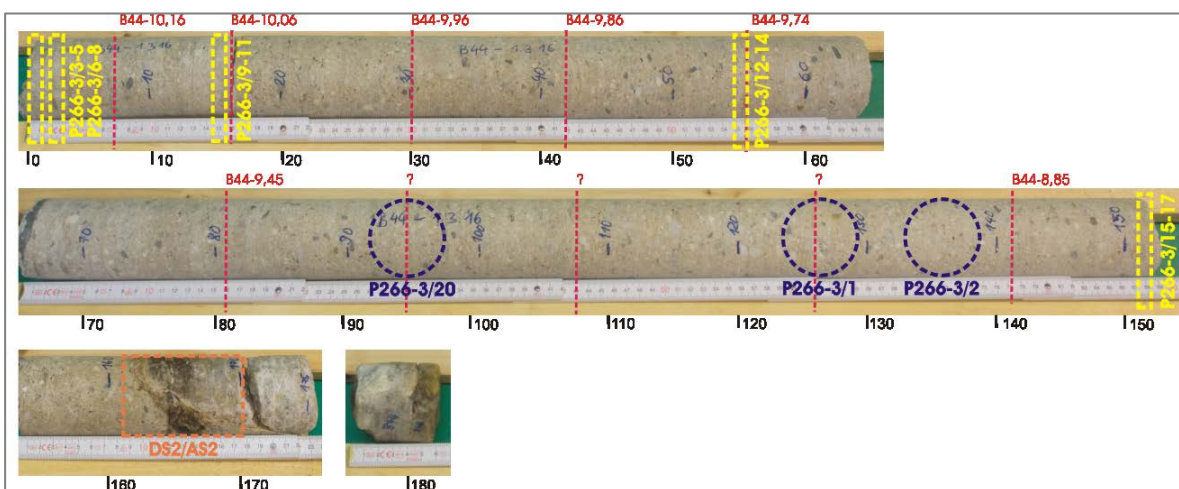


Abbildung 15: Kernfotos der Bohrung B44 mit Probenahmebereichen

3.2 Kamerabefahrung und Ultraschalluntersuchungen in den Bohrlöchern

Die Bohrungen B40, B41 und B44 mit einer Länge zwischen 1,8 und 3,7 m wurden planmäßig mit Lösung befüllt. Bei der Erstbefüllung der 6 m-langen Bohrungen B38 und B39 mit Lösung traten jedoch starke Lösungsverluste auf, die auf mögliche Fehlstellen eventuell bei Betonierabschnittsgrenzen bzw. im Spritzbeton hindeuteten.

Zur Identifikation von Inhomogenitäten (Fehlstellen) im Spritzbeton als mögliche Ursache der Lösungsverluste wurden die Bohrungen B38 und B39 leer gepumpt und danach jede Bohrung mittels Videokamera befahren. Des Weiteren wurden Ultraschallmessungen mittels einer Bohrlochsonde durchgeführt.

3.2.1 Kamerabefahrung

Bei einer Videokamera-Befahrung wird eine Bohrlochkamera beginnend von der Ortsbrust kontrolliert und möglichst kontinuierlich in die Bohrung geschoben, wobei gleichzeitig ein hochaufgelöster Videofilm erzeugt wird. In der Nachauswertung des Films werden als Dokumentation jeweils Standfotos von Auffälligkeiten in der Bohrlochwandung gemacht.

In der Befahrung der Bohrungen B38 und B39 wurden keine stark ausgeprägten Materialkontraste an den Betonierabschnittsgrenzen erkannt, die zu einer eindeutigen Identifikation der Betonierabschnittsgrenzen selbst bzw. von Fehlstellen herangezogen werden konnten. Der Spritzbeton erscheint durchgehend diffus grau (mit dunkleren Einsprenglingen). Auffällig sind lediglich signifikante weiße Ausblühungen, die offenbar nur im Bereich von mutmaßlich zuvor lösungserfüllten „Porenbereichen“ aufgetreten sind. In beiden Bohrungen, wie beispielhaft in Abbildung 16 für die Bohrung B39 dargestellt, liegen diese Bereiche zwischen 4,20 m und 4,80 m Teufe sowie nahe zum Bohrloch-Tiefsten bei ca. 5,40 m.

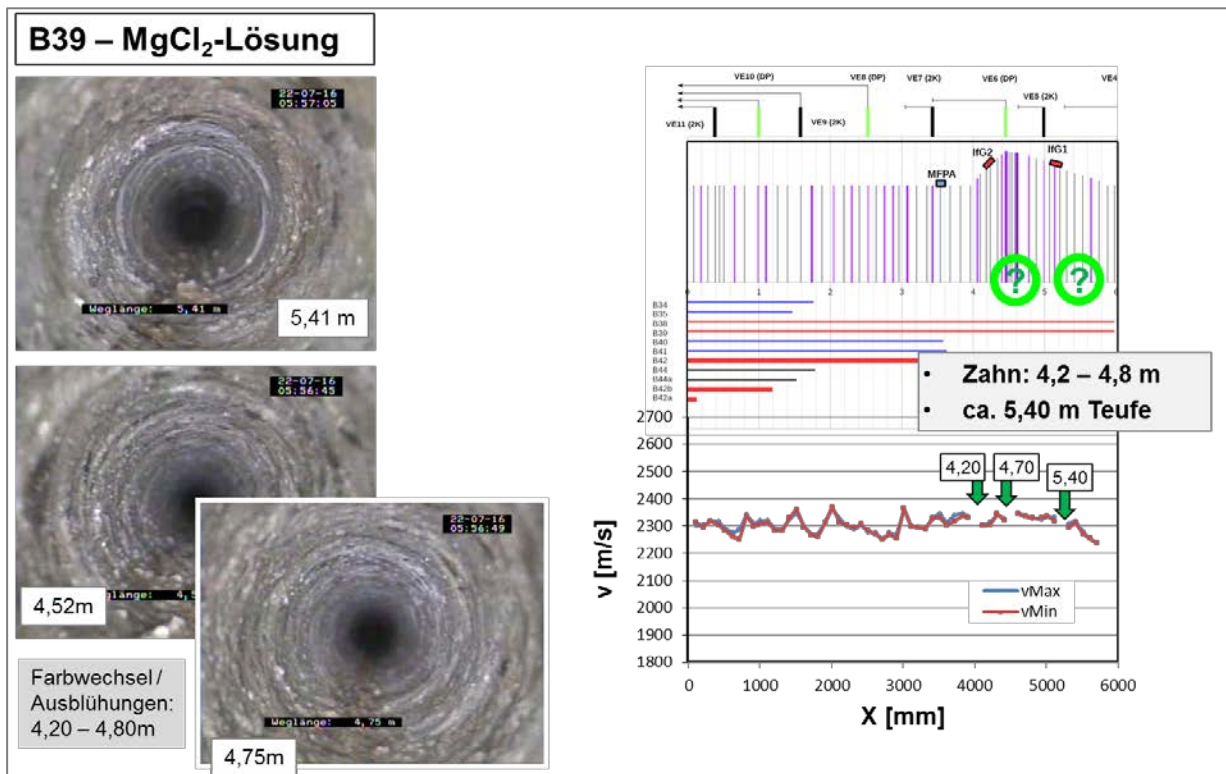


Abbildung 16: Synthese aus Beobachtungen der (li.) Video-Kamera-Befahrung und (re.) Ultraschall-Vermessung: Geschwindigkeitsverlauf entlang der Bohrung B39.

3.2.2 Ultraschall-Downhole-Messung

Ultraschall-Echo- bzw. Durchschallungs-Verfahren besitzen ein großes Potenzial zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauwerken bzw. zur minimal-invasiven Untersuchung mit Hilfe von Bohrungen. Zur Lokalisierung der möglichen Fehlstellen in den Bohrungen B38 und B39 wurde eine gemeinsam von der GMuG (Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik mbH, Bad Nauheim) und dem IfG entwickelte Bohrlochsonde eingesetzt. Sie ist speziell für bergbauliche Anwendungen im Salzgebirge, u.a. zur Untersuchung der ALZ oder der Pfeiler-Homogenität, zum Einsatz in 42 mm-Bohrungen konzipiert worden [AU10].

Mit ihr wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen entlang der Bohrlochoberfläche gemessen (Abbildung 17). Dazu werden ein Ultraschallsender und zwei Ultraschallempfänger (Empfänger 1 befindet sich 125 mm und Empfänger 2 250 mm vom Sender entfernt) mechanisch an die Bohrlochwand gedrückt. Das vom Sender erzeugte Signal breitet sich entlang des Bohrlochs aus und wird von den beiden Empfängern aufgezeichnet. Aus der Differenz der Ankunftszeiten beim jeweiligen Empfänger und dem Abstand der Empfänger untereinander wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Bohrlochwelle bestimmt. Ihre Geschwindigkeit hängt u.a. von der Gesteins- bzw. Materialart, der Porosität und der Festigkeit des Gesteins bzw. des Baustoffs ab. Bei einheitlicher Materialbeschaffenheit und Porosität kann aus einer im Vergleich zur Umgebung verringerten Geschwindigkeit auf eine lokale Entfestigung des Materials (z.B. bautechnische Fehlstellen bzw. eine Auflockerung infolge Schädigung) geschlossen werden.

Bei der Messung wird die Sonde in definierten Schritten (hier 10 cm) verschoben und für jeden Messpunkt wird die Ultraschalllaufzeit mit zwei Anregungsfrequenzen (100 kHz bzw. 200 kHz) gemessen. Ausgehend von den Seismogrammen für beide Frequenzbereiche und den Laufwegen 125 mm bzw. 250 mm werden die Laufzeitdifferenzen (z.B. Empfänger 1 zu Empfänger 2) ausgewertet und die Geschwindigkeit für jeden Messpunkt berechnet. Beispielhaft sind in Abbildung 18 die ortsbezogenen Seismogramme der 200 kHz-Messung dargestellt.

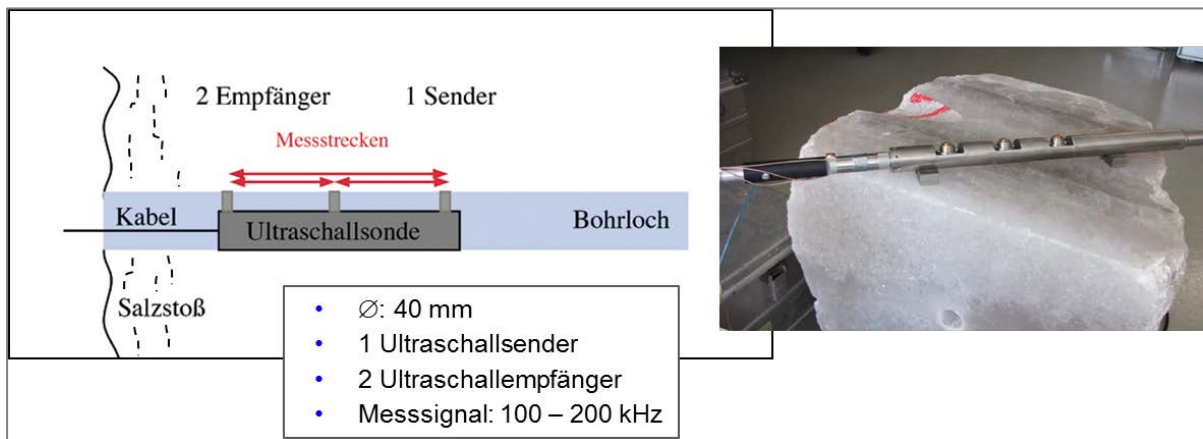


Abbildung 17: Messprinzip der neu-entwickelten Ultraschallsonde mit ihren Kenndaten (links) sowie die für den Bohrlocheinsatz vorbereitete Sonde mit den drei Messköpfen (rechts).

Die daraus berechnete Geschwindigkeit schwankt in beiden Bohrungen in einem Bereich von etwa 2.250 m/s und knapp 2.400 m/s (vgl. Abbildung 16 für die **Bohrung B39**). Diese Schwankungen sind höher als zum Beispiel bei homogenem Steinsalz, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass der Spritzbeton nicht so gleichmäßig zusammengesetzt ist wie Steinsalz. Des Weiteren können einzelne Betonierabschnittsgrenzen für die größere Schwankungsbreite verantwortlich sein. Auch zeigt der Verlauf der Geschwindigkeit mit der Bohrlochtiefe keine Korrelation zwischen den beiden benachbarten Bohrlochern, was einerseits auf eine gewisse laterale Variation der Betoneigenschaften schließen lässt andererseits eventuell

auch typisch für den aufgetragenen Spritzbeton sein kann. Da Ultraschallmessungen bei einem MgO-Spritzbeton erstmals durchgeführt wurden, kann dazu noch keine endgültige Aussage getroffen werden.

Für die Bohrung B39 ist auffällig, dass an den Messpunkten, die zu den Senderpositionen in 4,20 m, 4,70 m und 5,40 m Bohrlochtiefe gehören, die Messsignale deutlich beeinflusst sind, d.h. die Signaleinsätze sind erheblich verzögert, was auf Inhomogenitäten (bzw. „Fehlstellen“) im Bereich des Zahnes hindeutet (Detailausschnitt rechts in Abbildung 18). Der untere Ausschnitt in Abbildung 18 zeigt die Geschwindigkeitsvariation entlang der Bohrung mit den vermuteten Inhomogenitäten bzw. „Fehlstellen“.

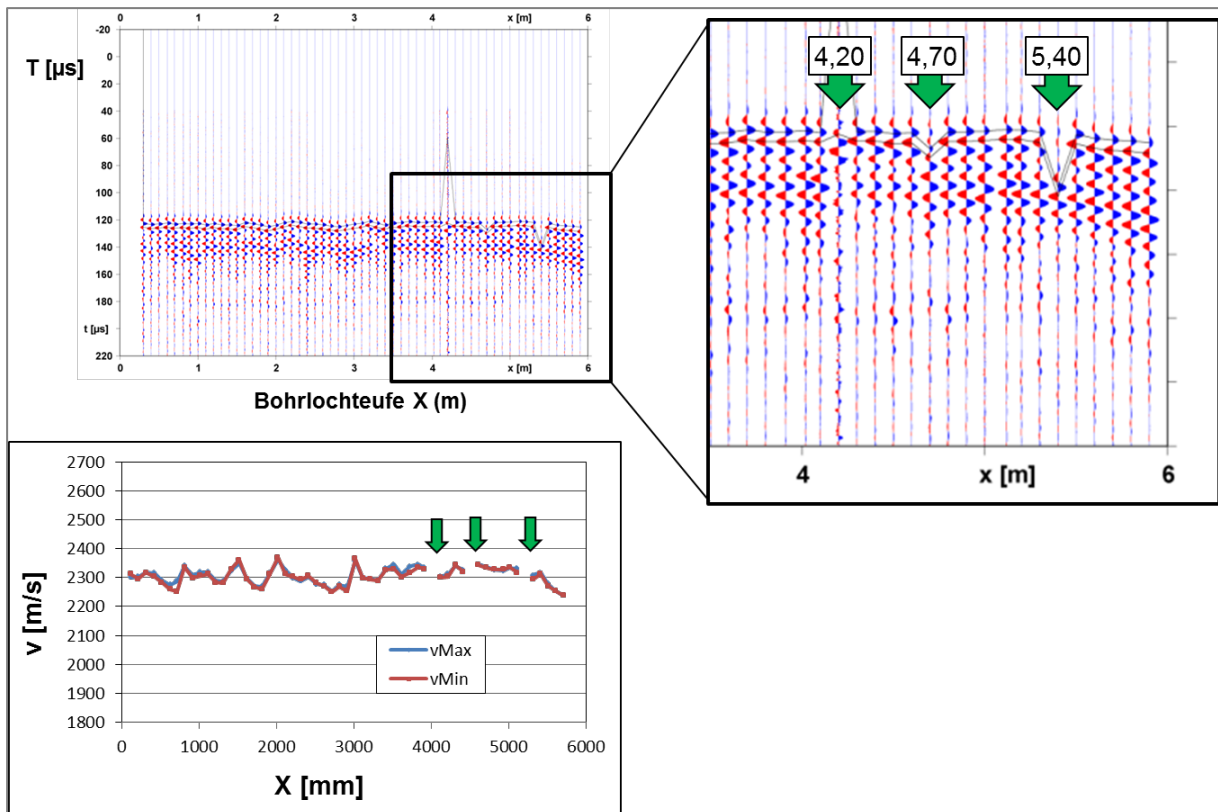


Abbildung 18: Auswertung Ultraschallmessungen in B39

Zur besseren Interpretation sind in Abbildung 16 die Auffälligkeiten aus der Video-Kamera-Befahrung und die Ergebnisse der Ultraschall-Messung in der Bohrung B39 bohrlochtiefenabhängig dargestellt. Die in der Videobefahrung festgestellten Auffälligkeiten stimmen tiefenmäßig mit den „Anomalien“ in den Seismogrammen gut überein. Es ist nicht eindeutig nachweisbar, ob die Ultraschallsignale entweder wegen schlechter Ankopplung (möglich wegen der Bohrlochausblühungen) oder aufgrund von tatsächlichen, vertikal stehenden „Fehlstellen“ in ihrer Amplitude signifikant vermindert sind. Unabhängig davon sind diese Befunde die einzigen „Anomalien“ entlang des Bohrlochverlaufs. Sie liegen im Bereich des Zahns, wobei allerdings auch der nahezu vollständige Lösungsverlust bei der Erstbefüllung (vgl. Abschnitt 4.2) auf tiefer im Bohrloch (also im Bereich des Zahns) liegende „Fehlstellen“ hindeutet.

Die nach der Ultraschallmessung durchgeführten Lösungsdruckbeaufschlagungen in B38 und B39 weisen darauf hin, dass sich die Fehlstellen bei Lösungskontakt abdichten. Deshalb waren die Fehlstellen nicht mehr so klar feststellbar, da die Bohrung B38 vor der Ultraschallmessung bereits mit Lösung beaufschlagt worden ist. Dies erschwert den Nachweis lokaler Fehlstellen.

Eine abschließende Klärung der Lage und Relevanz der Fehlstellen im Bereich des Zahns wäre allenfalls durch einen Rückbau möglich.

Insgesamt werden diese orientierenden Erstmessungen mittels der neuen Ultraschallsonde, die mögliche Fehlstellen im Bereich des Bauwerkzahns dokumentieren, als positiv hinsichtlich der Detektion von „Schwachstellen“ eingeschätzt. Ultraschallmessungen sind offensichtlich zur Qualitätsbewertung innerhalb von Spritzbetonbauwerken geeignet. Allerdings sind hier Bohrungen notwendig, die nach den Ultraschallmessungen wieder verfüllt werden müssen. Deshalb sollte dieses „minimal“ invasive Verfahren bevorzugt zur Qualitätskontrolle bzw. Verfahrensoptimierung der Spritzbeton-Technologie bei prototypischen Versuchsbauwerken eingesetzt werden. Für die zerstörungsfreie Qualitätskontrolle realer Dämme sollten vollständig zerstörungsfreie Verfahren entwickelt werden.

3.3 Baustoffrezeptur und Phasenbestand

Rezeptur GV2 und Phasenbestand

Das Dammbauwerk (GV2) wurde in Spritzbetonbauweise aus den Komponenten MgO (Fa. Styromag), R-Lösung (Grube Teutschenthal) und Sand/Kies-Zuschlag (Fa. Quickmix) errichtet. Die Rezepturanteile sind in Tabelle 9 aufgeführt. Entsprechend einer Reinheit von mindestens 75 % für das von der Fa. Styromag eingesetzte MgO und einem leicht schwankenden $MgCl_2$ -Gehalt der R-Lösung (zwischen 4,6 und 5,2 molal) errechnet sich aus den eingesetzten Rezepturkomponenten ein stöchiometrisches Verhältnis (Stoffmengen- bzw. Molverhältnis) von 7-8 mol MgO : 1 mol $MgCl_2$: ~ 11 mol H_2O . Daraus lässt sich auf die Bildung der 5-1-8-Phase ($5 Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8 H_2O$) neben verbleibendem Ausgangs-MgO schließen. Zur Bildung der 3-1-8-Phase ($3 Mg(OH)_2 \cdot 1 MgCl_2 \cdot 8 H_2O$) sollte es nicht kommen, da deren Bildung kinetisch gehemmt ist und die Menge der Anmischlösung für die Primärphasenbildung der 5-1-8-Phase aufgebraucht wird [AU1]. Folglich ist auch von einem praktisch trockenen Bauwerk, nahezu frei von Porenlösung im Baustoffgefüge, auszugehen (s. Abschnitt 3.8).

Da nur ca. 10 cm dicke Spritzbetonschichten hergestellt wurden, ist die Temperatur beim Abbinden gering (max. 42°C). Deshalb bildet sich auch nicht die Hochtemperaturphase 9-1-4, welche sich beim Abbinden von Massenbauwerken bei Temperaturen größer 80°C bilden kann.

Die geringe Temperatur bewirkt jedoch auch eine langsamere Bindemittelphasenbildung im Vergleich zu höheren Temperaturen. Möglicherweise könnte durch die langsamere Abbindekinetik in vereinzelt Bereichen, in denen Anmischlösung daher relativ lange im abbindenden Bauwerksgefüge noch enthalten war (für > 24 h), dennoch auch geringfügige Anteile an 3-1-8-Phase entstanden sein.

Tabelle 9: Rezepturkomponenten, aus denen im Jahr 2008 der MgO-Damm GV2 errichtet wurde.

Rezepturkomponenten GV2	Anteile
MgO (G75, Fa. Styromag)	15,6 Masse-%
R-Lösung	11,4 Masse-%
Sand/Kies-Zuschlag, Gesteinskörnung 0-8 mm	73,0 Masse-%
Stöchiometrisches Verhältnis [mol] MgO : $MgCl_2$: H_2O	7-8 : 1 : ~ 11
Phasenbestand entsprechend stöchiometrischem Verhältnis	5-1-8-Phase + MgO

Überzug über das Bauwerk nach 7 Jahren Standzeit und Phasenbestand

Nach 7-jähriger Standzeit zeigte sich an der Ortsbrust eine allseitig vom Bauwerk ausgehende, das angrenzende Salzgebirge überziehende Verkrustung, welche sich sehr leicht vom Salz abbrechen ließ. Die Untersuchung eines solchen Bruchstücks und auch der Oberfläche des Bauwerks (anhand von Bohrkernen) (Abbildung 19) zeigten folgendes Ergebnis:

Bei der **Verkrustung auf dem Salzgebirge** handelt es sich um eine **Verwachsung von Carnallit und Chlorartinit**, $\text{Mg(OH)Cl} \cdot \text{MgCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Diffraktogramm in Abbildung 20 sowie REM-Aufnahmen in Abbildung 21). Chlorartinit bildet sich durch Kontakt von MgO oder Mg(OH)_2 in einem MgCl_2 -haltigem Milieu oder aus Sorelphasen in Kontakt mit CO_2 in Gegenwart von Lösung oder Luftfeuchte. Aufgrund der permanent mit einem Flüssigkeitsfilm (inkongruente Zersetzung des Carnallits unter Abscheidung von MgCl_2 -Lösung) belegten Carnallitoberfläche, welche mit einer Sorelphase in Kontakt steht, ist die Chlorartinitbildung (diffusionsbedingt und durch CO_2 -haltige Grubenwetter) auf der Oberfläche des an den GV2 angrenzenden Salzgebirges zu erklären.



Abbildung 19: GV2-Ortsbrust und angrenzendes Salzgebirge mit krustenartigen Überwachsungen, welche phasenanalytisch an Bohrkernen und Bruchstücken untersucht wurden.

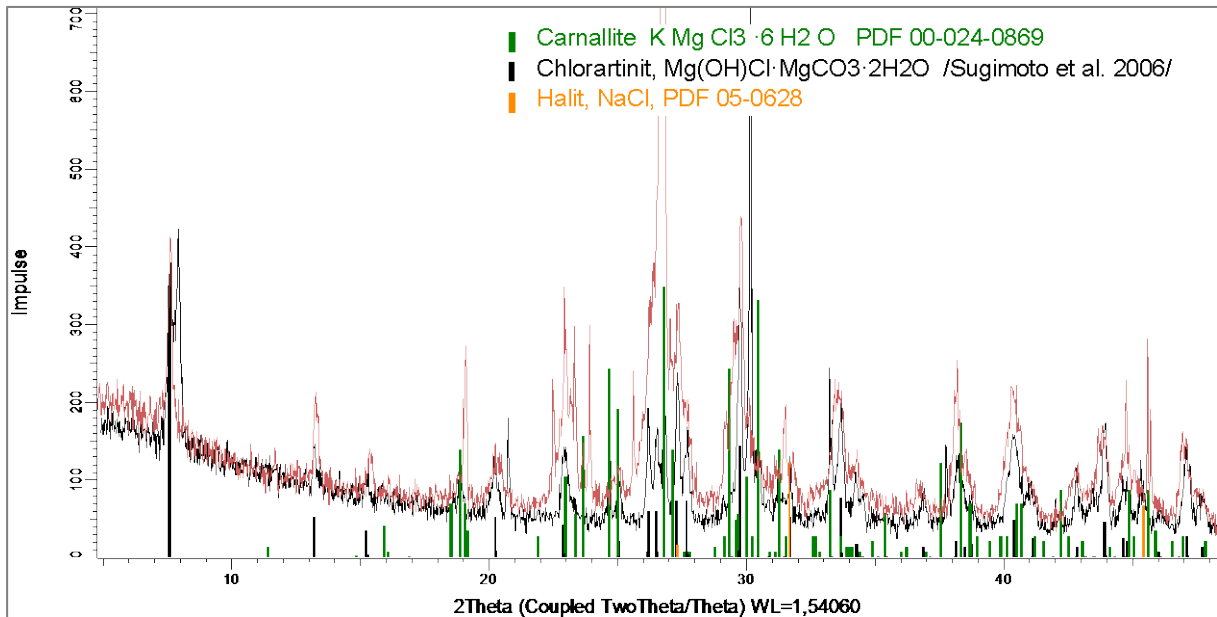


Abbildung 20: Diffraktogrammausschnitte nach Messungen am Bruchstück der Verkrustung auf dem Salzgebirge in Kontakt mit dem GV2 (Probstück rechts unten in Abbildung 19).

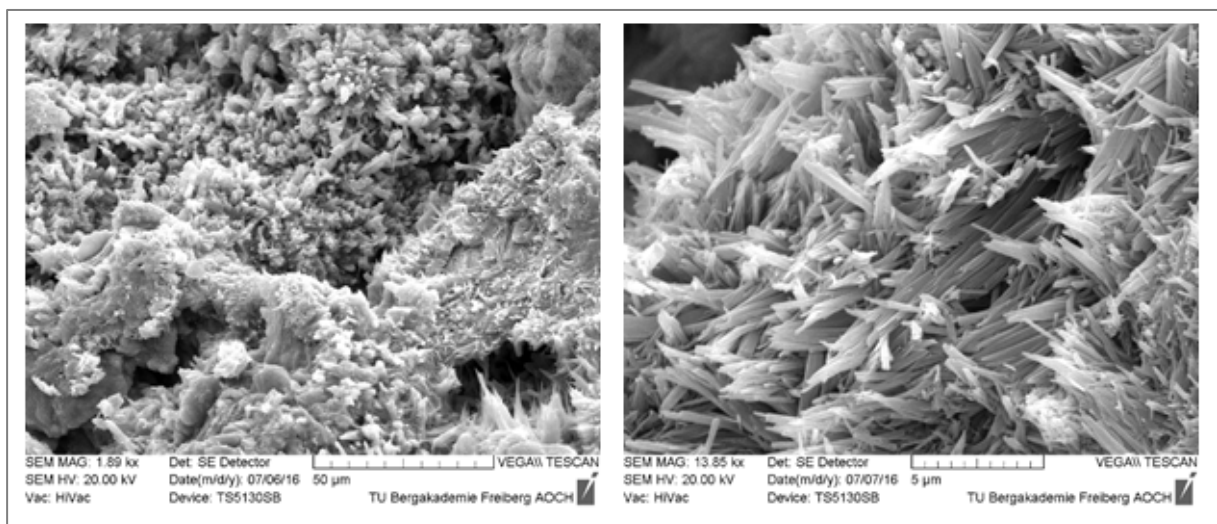


Abbildung 21: REM-Aufnahmen am Bruchstück der Verkrustung auf dem Salzgebirge in Kontakt mit dem GV2 (Probstück rechts unten in Abbildung 19): Verwachsung von Chlorartinit und Carnallit.

Die Phasenanalyse der **GV2-Bauwerksoberfläche** (Vermessung von Bohrkernoberflächen, z.B. B42) zeigte dagegen eine **Überwachsung mit der 3-1-8-Sorelphase** (Diffraktogrammausschnitte in Abbildung 22). Die ca. 10 - 20 μm langen Nadeln, welche gleichmäßig auf der Luftseite der Bauwerksoberfläche aufgewachsen sind, verursachen den optisch sichtbaren weißen Belag (Abbildung 23). Die Bildung von Chlorartinit wurde auf der Bauwerksoberfläche nicht nachgewiesen (wobei im Fall dieser orts aufgelösten Vermessung der rauen und sehr unebenen Oberfläche eine Identifizierung geringanteiliger Phasen mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist). Möglicherweise sind die Feuchtebedingungen für die Bildung von Chlorartinit auf der trockenen Bauwerksoberfläche nicht so gegeben wie auf der angrenzenden feuchten Carnallitoberfläche. Zu Bildungs- und Existenzbedingungen von Chlorartinit gibt es bisher keine umfassenden oder systematischen Daten in der Literatur.

Aufgrund der mit dem Bauwerk luftseitig in Kontakt stehenden Feuchte der Grubenwetter konnte dort oberflächlich die 5-1-8-Phase in die 3-1-8-Phase umkristallisieren.

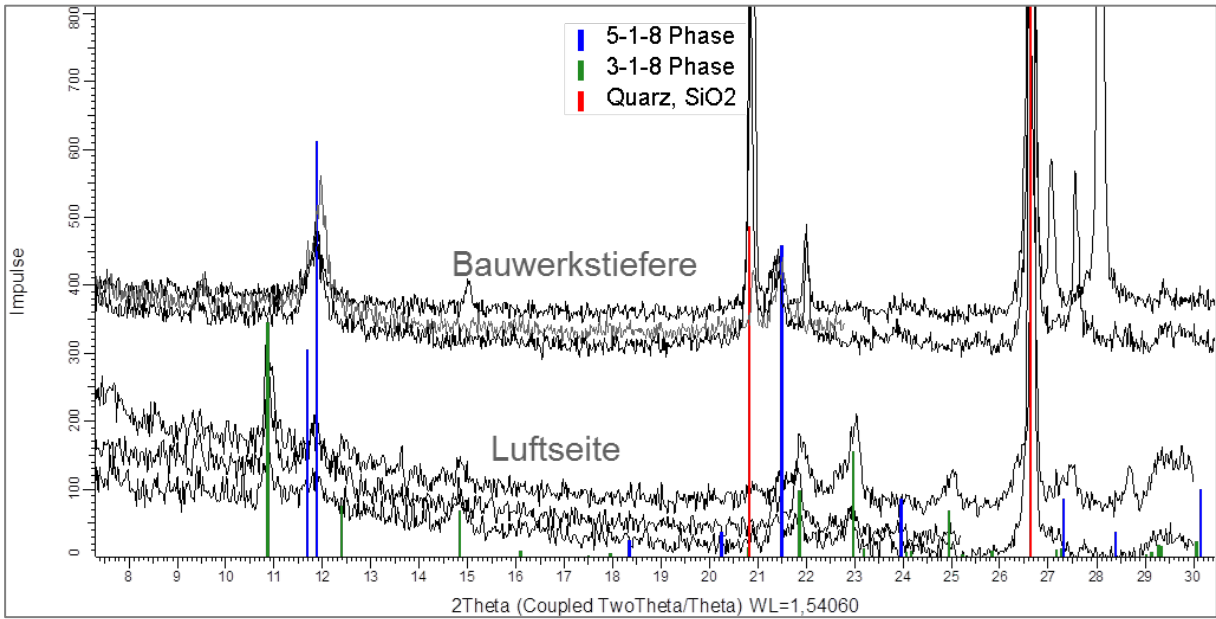


Abbildung 22: Diffraktogrammausschnitte der luftseitigen Probenanalyse des GV2 im Vergleich mit Messungen ins Bauwerkstiefera hinein.

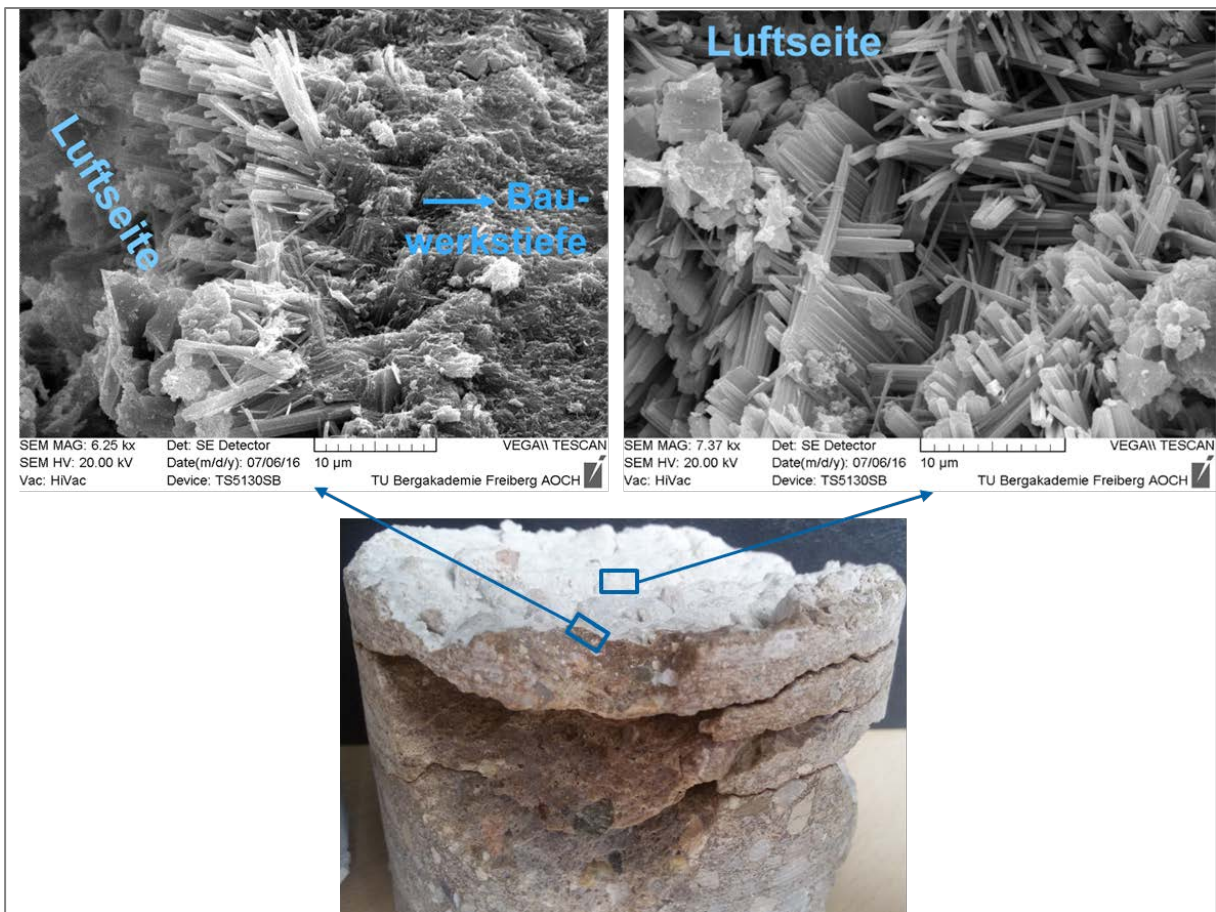


Abbildung 23: Bohrkern mit luftseitiger Oberfläche aus GV2 mit Messlokalitäten der REM-Aufnahmen (der Bohrkern wurde für XRD und REM-Messungen zerschlagen).

Weitere Analysen an Bohrkernmaterial (B41, B42, B44) zeigten, dass das Baustoffgefüge entsprechend den obigen Betrachtungen zur Baustoffrezeptur aus der 5-1-8-Bindemittelphase mit vereinzelt, geringfügigen Anteilen aus der 3-1-8-Phase sowie nicht umgesetztem MgO besteht. Das eingesetzte MgO der Fa. Styromag weist einen gewissen Anteil an Talk (Mg-Silikat) auf, welcher neben den Phasenkomponenten des Zuschlagstoffes (im wesentlichen Quarz) enthalten ist (Abbildung 24).

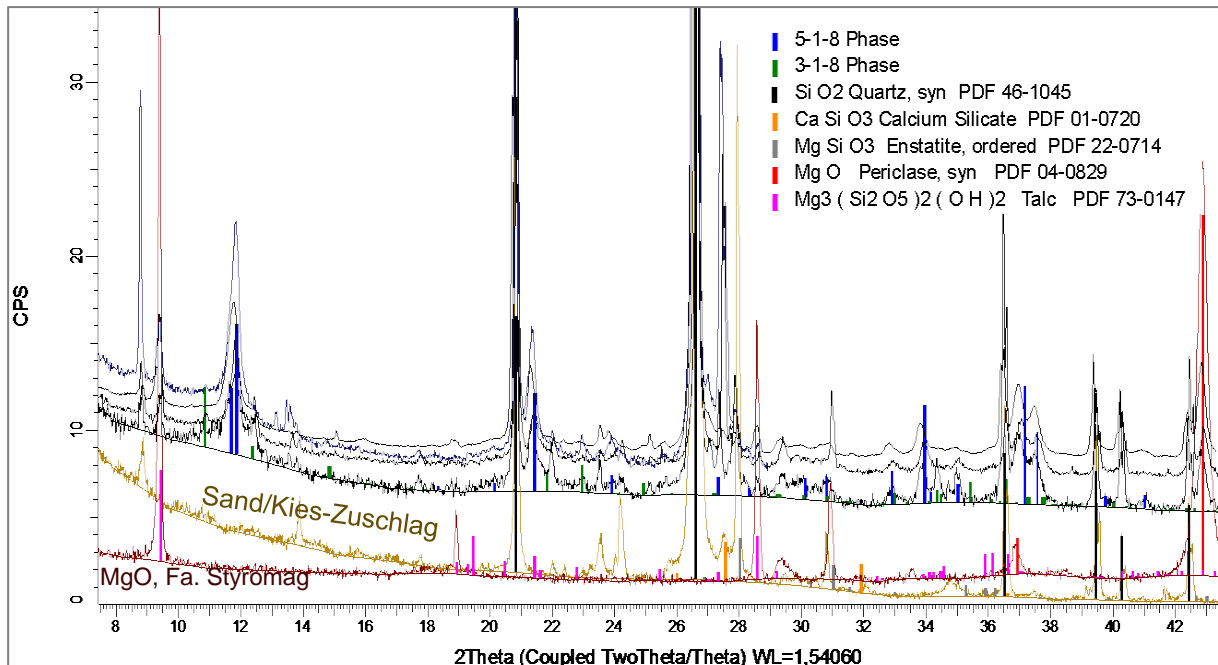


Abbildung 24: Diffraktogrammausschnitt zur Identifizierung des Phasenbestandes GV2 anhand von pulverisiertem Bohrkernmaterial aus B41 und B42 im Vergleich mit dem eingesetzten MgO der Fa. Styromag sowie dem Sand/Kies-Zuschlag.

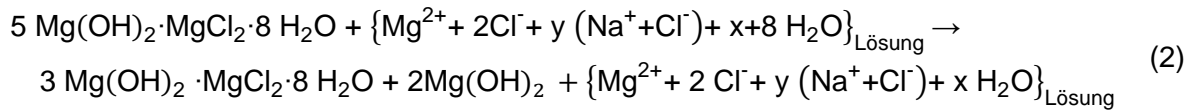
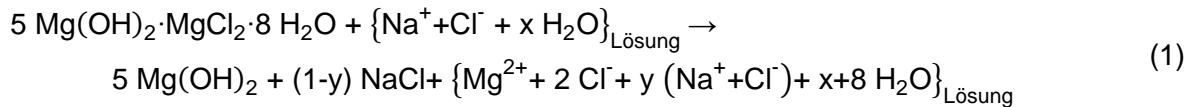
3.4 Reaktionen/Verhalten des MgO-Betons bei Lösungskontakt

Entsprechend dem Bindemittelphasenbestand des MgO-Spritzbetondammbauwerkes GV2 besteht Reaktionspotenzial des MgO-Betons bei einem Kontakt mit Lösung in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der zutretenden Lösung.

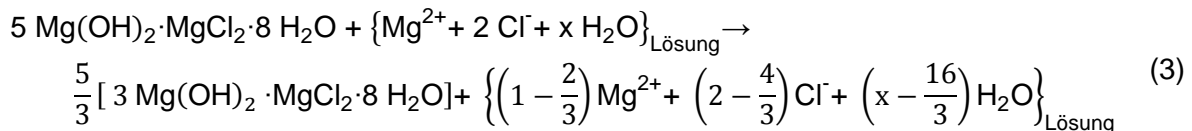
Für die Untersuchungen des MgO-Spritzbetons kamen drei verschiedene Lösungen zum Einsatz:

- Lösung 1: reine, gesättigte NaCl-Lösung
- Lösung 2: NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung (2 molal MgCl₂)
- Lösung 3: MgCl₂/CaCl₂-Lösung (2,3 - 2,6 molal MgCl₂ / 5,2 - 5,6 molal CaCl₂)

Tritt eine **gesättigte NaCl-Lösung (Lösung 1)** in Kontakt mit dem MgO-Beton des GV2-Bauwerkes, kommt es zur Reaktion der 5-1-8-Bindemittelphase. Diese löst sich unter Mg(OH)₂-Abscheidung solange auf, bis die im Kontakt stehende Lösung mit Mg²⁺ soweit angereichert ist (unter gleichzeitiger NaCl-Ausfällung), dass Konzentrationsverhältnisse entsprechend dem Gleichgewicht mit der 3-1-8-Bindemittelphase erreicht sind (= 0,5 molale MgCl₂-Lösungskonzentration bei gleichzeitiger Sättigung an NaCl [AU1]). Ab diesem Zeitpunkt wandelt sich die 5-1-8-Phase anteilig in Mg(OH)₂ und 3-1-8-Phase um. Die folgenden Reaktionsgleichungen (1) und (2) beschreiben diese Stoffumsetzungen.



Tritt dagegen **eine NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung mit einer MgCl₂-Konzentration größer 0,5 molal (Lösung 2)** mit dem Bauwerk in Kontakt, wandelt sich die 5-1-8-Phase ausschließlich in die 3-1-8-Phase um (Gleichung (3)):



Insgesamt laufen die Reaktionen sehr langsam ab und führen daher zu einer Überwachsung der 5-1-8-Phase mit der 3-1-8-Phase. Dadurch dringt die Lösung nicht mehr so weit in das Baustoffgefüge ein und dieses wird nicht mehr so stark angelöst. Die Kristallisation der 3-1-8-Phase findet entsprechend Reaktionsgleichung (3) unter einem Festphasenvolumenzuwachs statt [AU1] und es kommt so zu einem Verschluss des Gefügaporenraums im Kontaktbereich mit der Lösung bzw. im Bereich in Richtung vordringender Lösung. Es ist davon auszugehen, dass sich nach endlicher Zeit bei relativ geringen Stoffumsätzen ein stationärer Zustand einstellt (d.h. Lösung dringt nicht mehr in das Bauwerk ein), da sich lokal ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Lösung und 3-1-8-Phase eingestellt hat und der an die 3-1-8-Phase anbindende 5-1-8-Phasenbereich lösungsunzugänglich geworden ist.

Zur Bestimmung der Lösungspemeabilität des MgO-Baustoffes des GV2-Dammbauwerkes wurden sowohl reine, gesättigte NaCl-Lösung (Lösung 1) als auch NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung (Lösung 2) eingesetzt. Letztere enthält eine ca. 2 molale MgCl₂-Konzentration.

Im Fall von Zutrittslösung, die neben Mg²⁺ auch Ca²⁺ enthält (**Lösung 3**: Tachyhydrit-stabile Lösung aufgrund der Mineralogie des Teutschenthaler Carnallitits), setzt eine zu Ca²⁺-freien Lösungen analoge Reaktion (3) ein. Das Ca²⁺ bleibt in Lösung, da basische Calciumchlorid-Hydrate eine deutlich höhere Löslichkeit aufweisen als die des Magnesiums.

Für die drei Lösungen wurde die dynamische Viskosität bestimmt (siehe Tabelle 10). Diese wird für die Berechnung der Permeabilität (siehe Abschnitt 4) benötigt. Die angegebenen Mittelwerte und die Standardabweichungen sind bei der Temperatur von 20°C und von 35°C aus 3 Einzelwerten und bei der Temperatur von 28°C aus 4 Einzelwerten berechnet.

Die Viskosität der Lösung 2 ist etwa um den Faktor 1,5 höher als die Viskosität der Lösung 1. Die Viskosität der Lösung 3 ist etwa um den Faktor 12 bis 15 (temperaturabhängig) höher als die Viskosität der Lösung 1.

Tabelle 10: Dynamische Viskosität der verwendeten Lösungen

Lösung	Temperatur [°C]	Mittelwert der dynamischen Viskosität [mPas]	Standardabweichung der dyn. Viskosität [mPas]
gesättigte NaCl-Lösung (Lösung 1)	20	1,946	0,013
	28	1,610	0,019
	35	1,363	0,010
NaCl-ges., MgCl₂-halt. Lös. (Lösung 2)	20	2,870	0,010
	28	2,335	0,007
	35	2,000	0,012
MgCl₂/CaCl₂-Lösung (Lösung 3)	18	28,790	-
	26	19,840	-
	34	15,270	-

3.5 Optische Mikroskopie (OM) an Kernmaterial

Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben, wurden zwei Kernbereiche ausgewählt, um an ihnen großformatige Dünnschliffe bzw. Anschliffe herzustellen. In den Abschnitten 3.5.1 und 3.5.2 werden die Ergebnisse der OM-Untersuchungen zusammenfassend dargestellt.

3.5.1 Injizierter Riss in Bohrung B41

Im Bereich des mit Denepox gefüllten Risses in Bohrung B41 wurde ein großformatiger Dünnschliff (120 mm x 35 mm) hergestellt. Die Präparation des Dünnschliffs bereitete keine Schwierigkeiten. Der Rissbereich zeigte einen festen Verbund, so dass von einer primär vollständigen Injektion des Risses mit Denepox 40 ausgegangen werden kann. Allerdings brach das Material bei der achsenparallelen Halbierung des Kernes einseitig entlang einer Betonierabschnittsgrenze (Abbildung 25).

Die Abbildung 26 zeigt einen Detailbereich des Risses mit stichprobenhaften Rissweitenmessungen während der Auflichtmikroskopie.

Die Abbildung 27 stellt eine Zusammenstellung von Einzelbildern über den im Dünnschliff aufgeschlossenen Gesamtrissbereich während der Durchlichtmikroskopie mit einem Polarisationsmikroskop dar. Im oberen Bereich ist dieser mit parallelen Polarisatoren und im unteren Teil mit gekreuzten Polarisatoren zu sehen.

Zur Präparation wurde blau eingefärbtes Epoxidharz zur optischen Unterscheidung vom Injektionsepoxydharz Denepox 40 verwendet.



Abbildung 25: Kernstück mit Riss nach achsenparalleler Halbierung (B41 Kernfoto)

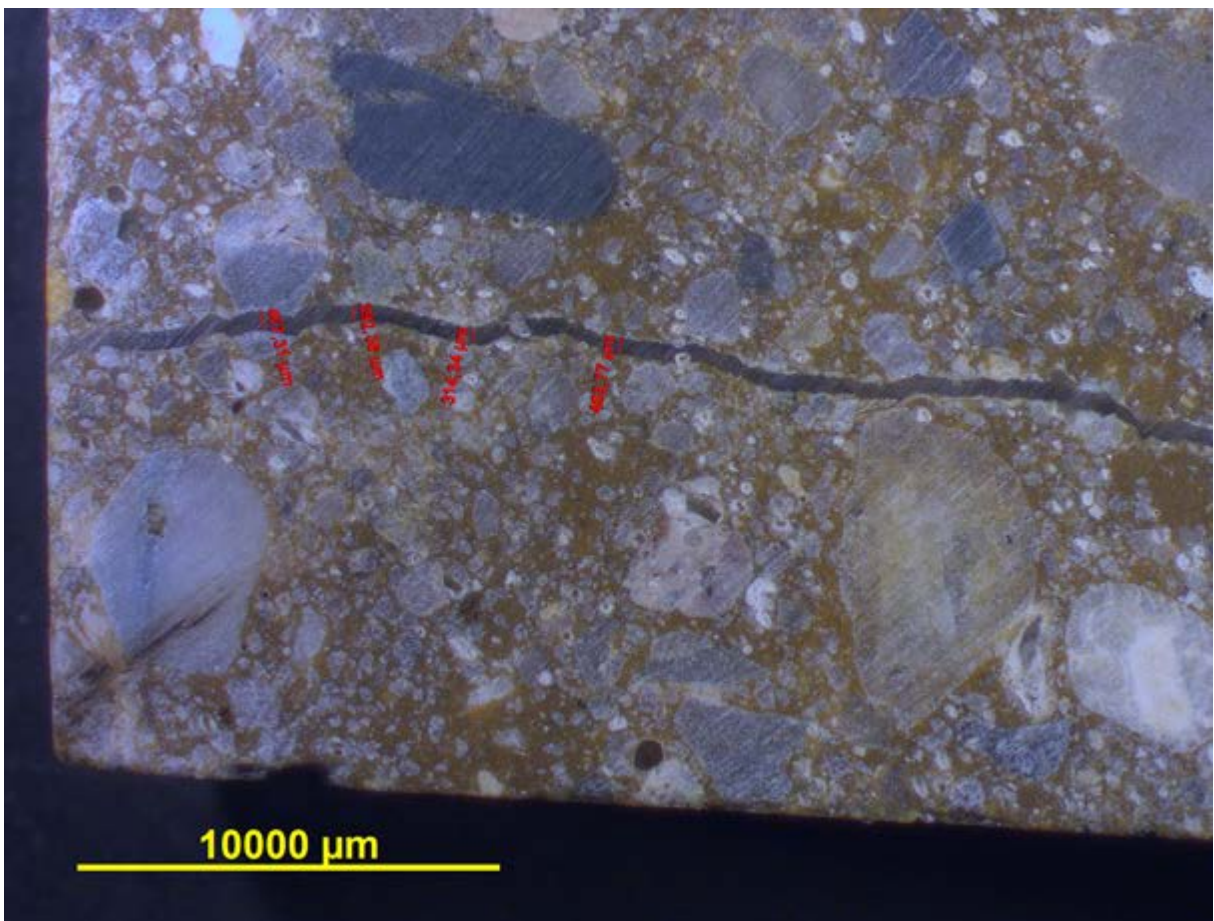


Abbildung 26: Injizierter Rissbereich (B41 Auflichtmikroskopie)

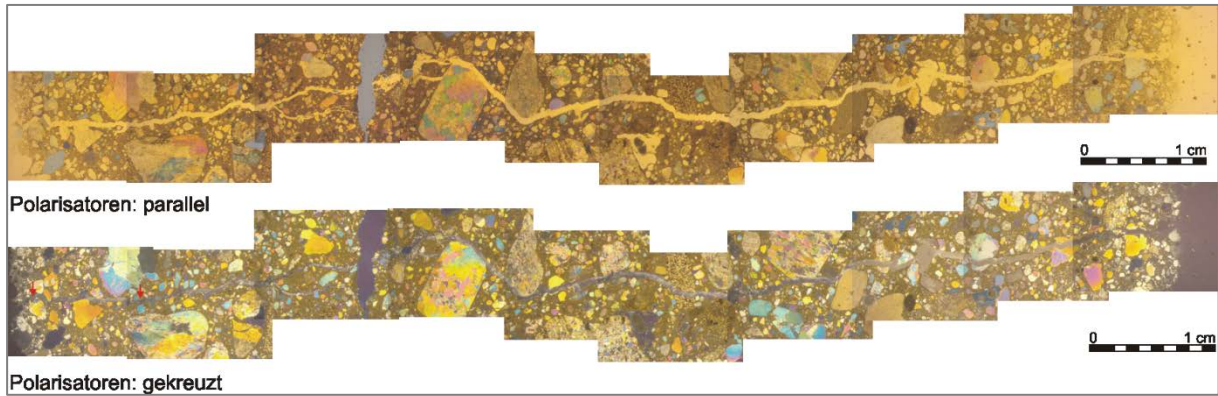


Abbildung 27: Injizierter Rissbereich (B41 Durchlichtmikroskopie)

Wie in der Abbildung 26 zu sehen ist, beträgt die Rissweite im Ausschnitt zwischen ca. 300 μm und ca. 470 μm . Bei genauerem Hinsehen fällt in Abbildung 26 auf, dass sich der Riss sowohl um die Zuschlagkörner herum als auch durch einzelne Zuschlagkörner hindurch zieht. Noch deutlicher wird dies in der Durchlichtmikroskopie (siehe Abbildung 27). Der Spritzbetonzuschlag ist silikatisch. Unter Berücksichtigung der realisierten, hohen Injektionsdrücke bis 7 MPa (größer als die Zugfestigkeit des MgO-Betons) mit Denepox bzw. 2-K-Bitumen ist ein „Hydrofrac“ des noch nicht vollständig abge bundenen Baustoffs wahrscheinlich.

Allein aufgrund des Erscheinungsbildes des Risses und aufgrund der Injektionsdrücke von 7 MPa in diesem Bauwerksabschnitt konnte keine abschließende, belastbare Aussage zur Rissgenese getroffen werden.

3.5.2 Injizierter Kontaktbereich in Bohrung B44

Die Bohrung B44 wurde schräg nach unten durch den MgO-Spritzbeton in das Carnallit-Gebirge gestoßen. Im Kontaktbereich der Bohrung B44 mit dem Gebirge wurde ein großformatiger Dünnschliff (76 mm x 52 mm) aus dem Bohrkernmaterial hergestellt. Die Präparation des Dünnschliffs stellte aufgrund der stofflichen Unterschiede (Bitumen, Metall, Gummi, Epoxidharz, MgO-Beton, Carnallit) eine größere Herausforderung dar. Um einen festeren Verbund bei der Präparation zu erreichen, wurde der Kern vor der Halbierung mit Epoxidharz vergossen. Dabei wurde das Präparationsharz wieder blau eingefärbt, um eine optische Unterscheidung zum Injektionsepoxydharz Denepox 40 zu ermöglichen.

Die Abbildung 28 gibt eine Gesamtübersicht über den Aufbau des injizierten Kontaktbereiches. Abbildung 29, Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen Detailaufnahmen sowohl des Kontaktbereiches als auch der Grenze, an der der Ringinjektionsschlauch für das 2K-Bitumen zwischen zwei Betonierabschnitten angebracht war (Abbildung 31).



Abbildung 28: Injizierter Kontaktbereich B44 (Auflichtmikroskopie)

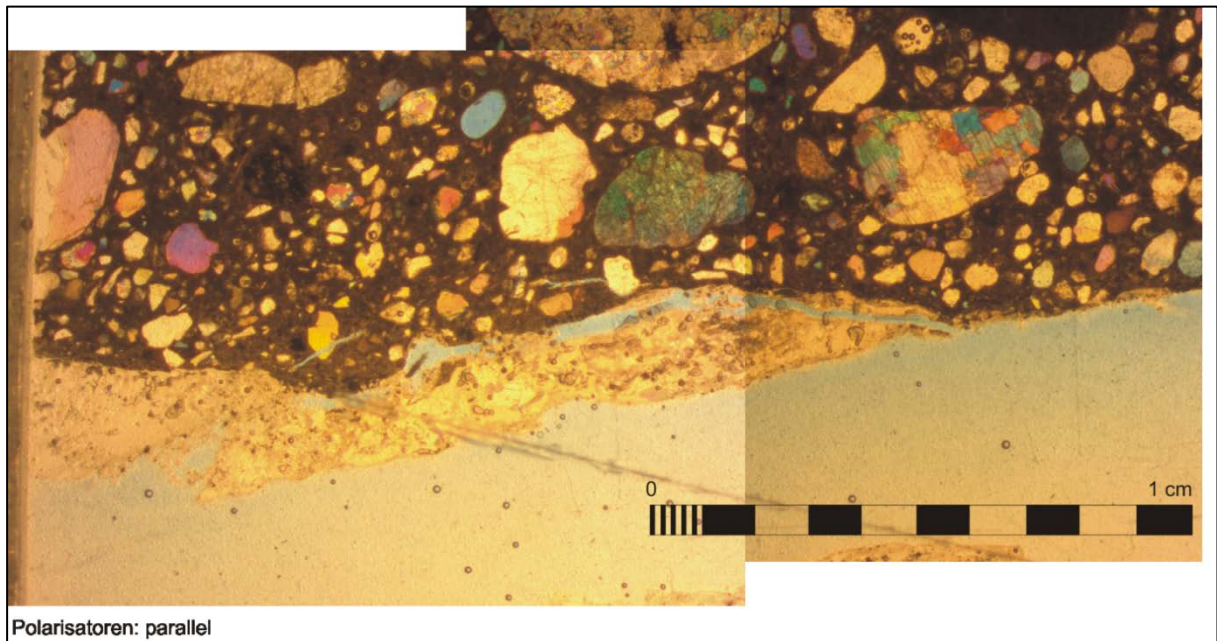


Abbildung 29: Grenzbereich zwischen Baustoff und Gebirge in der B44 (Durchlichtmikroskopie)

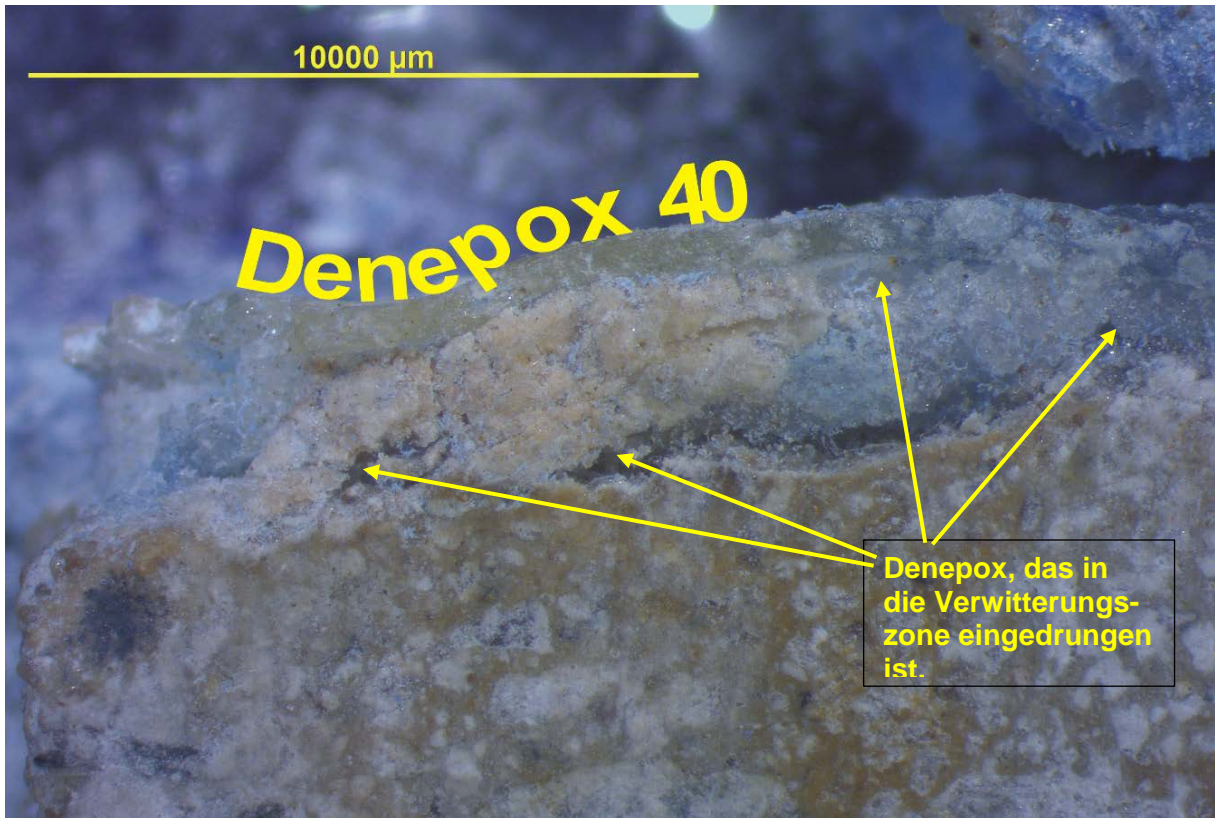


Abbildung 30: Injektionsharz Denepox 40 im Kontaktbereich B44 (Auflichtmikroskopie)

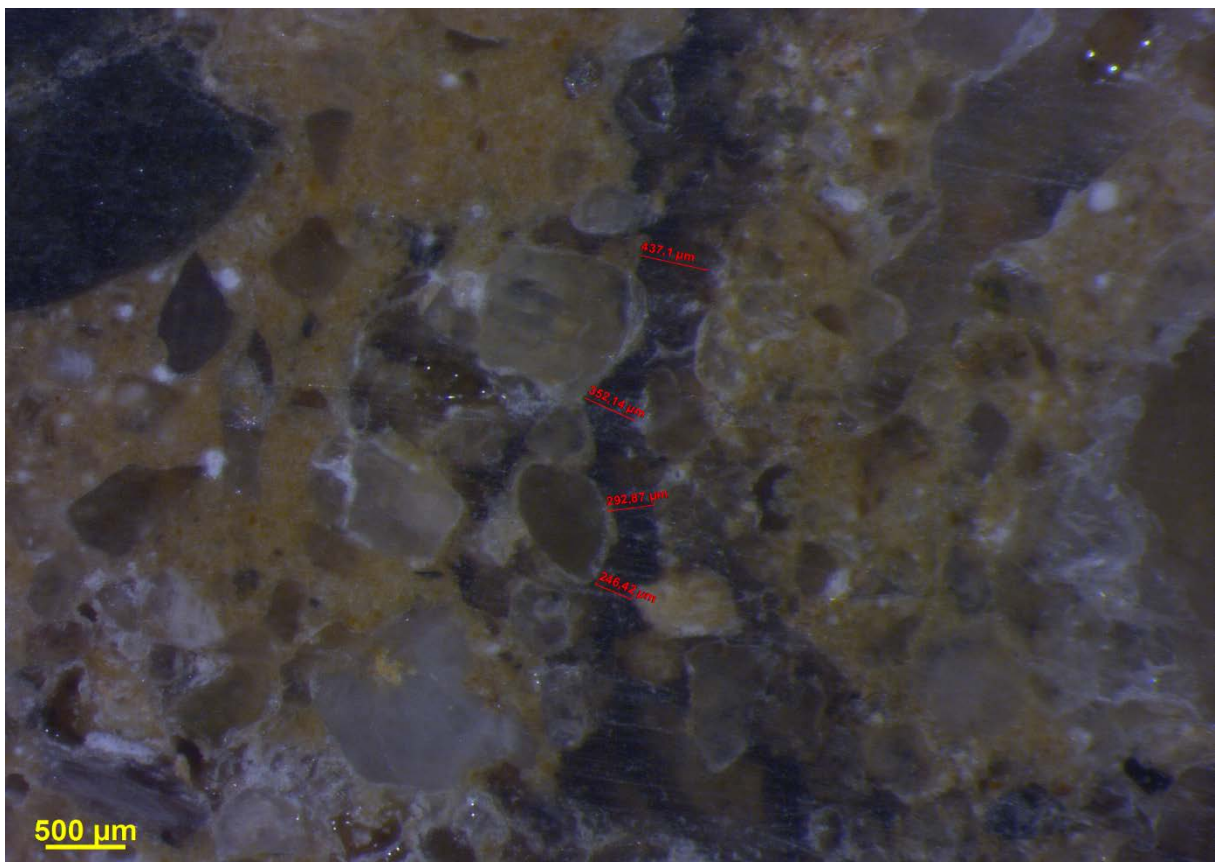


Abbildung 31: Betonierabschnittsgrenze im Schlibbereich B44 (Auflichtmikroskopie)

Wie schon in Abbildung 28 und Abbildung 30 zu erkennen ist, befindet sich das Injektionsepoxydharz sowohl zwischen MgO-Beton und Carnallitgebirge als auch im Carnallitgebirge selbst. Es ist nicht nur der direkte Kontaktbereich injiziert worden, sondern auch „Wegsamkeiten“ in der sich an den Kontaktbereich anschließenden Auflockerungszone. Da das Denepox 40 bei einem Druck von etwa 3 MPa in diesem Bauwerksabschnitt injiziert wurde und vorab 2K-Bitumen (Widerlager für die Denepox-Injektion) injiziert wurde, ist es wahrscheinlich, dass sich das Injektionsepoxydharz den Weg des mechanisch geringsten Widerstandes suchte und bei guter Anbindung des MgO-Betons an das Carnallitgebirge in den aufgelockerten Bereich des Carnallitgebirges ausgewichen ist.

Die ortsaufgelöste röntgenographische Vermessung an einem entsprechenden Probestück aus dem Übergangsbereich Bauwerk/Salzgebirge mit injiziertem Kontaktbereich (Bohrung B44) unterlegt diesen Sachverhalt. Die Messergebnisse zeigt Abbildung 32. Das Injektionsmaterial (Denepox) wurde anhand eines amorphen Polymerreflexes identifiziert. Es befindet sich nicht direkt im Kontaktbereich zwischen Salz und Baustoff, sondern, im Fall des vermessenen Probestückes, oberhalb einer ca. 3-5 mm dicken Salzschicht, die direkt am Baustoff angebunden ist.

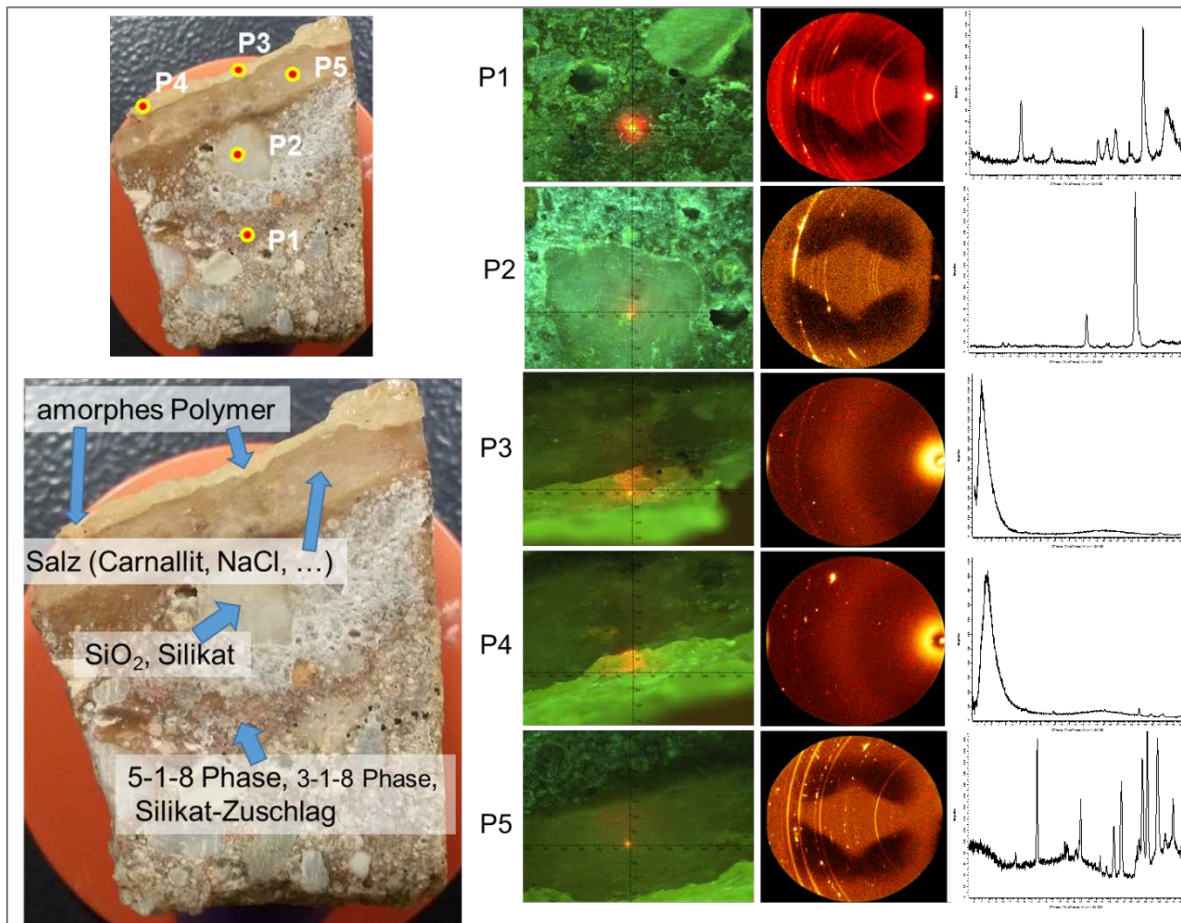


Abbildung 32: Ortsaufgelöste Phasenanalyse an einem Probestück aus dem Übergangsbereich Bauwerk/Salzgebirge mit injiziertem Kontaktbereich (Bohrung B44).

Eine Injektion des Kontaktbereiches durch 2K-Bitumen konnte im Schliffausschnitt lediglich in unmittelbarer Nähe zum Injektionsschlauch beobachtet werden (Abbildung 28). Dabei wurde wahrscheinlich der Injektionsschlauch an dieser Stelle zusammengedrückt. Bemerkenswert ist, dass in die Betonierabschnittsgrenze, die sich nach oben an den Injektionsschlauch in den MgO-Beton anschließt, 2K-Bitumen injiziert wurde (Abbildung 31). Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um eine sekundäre Öffnung der Betonierabschnittsgrenze infolge

von Injektionsdrücken von bis zu 7 MPa bei der 2K-Bitumeninjektion über den Ringinjektionsschlauch handelt. Stichprobenhaft wurden Rissweiten zwischen ca. 250 µm bis 440 µm gemessen.

3.6 Betonierabschnittsgrenzen

Der GV2 wurde im Spritzbetonverfahren hergestellt. Je Arbeitsschicht bzw. je Tag wurde dabei im Jahr 2008 eine Spritzbetonschicht mit einer Mächtigkeit von etwa 10 cm aufgetragen. Zwischen den einzelnen Schichten entstehen so möglicherweise „Grenzen“, die im Vergleich zum Beton innerhalb der Schicht andere Eigenschaften aufweisen können. Von besonderem Interesse war die Frage, ob Bereiche mit Betonierabschnittsgrenzen eine höhere Permeabilität und / oder eine geringere Festigkeit aufweisen. Weiterhin wurde geprüft, ob die Länge der Pausen zwischen zwei aufgespritzten Schichten einen Einfluss auf die Ausbildung der Grenzfläche hat.

Aus den Aufzeichnungen während des Baus [AU4] wurde die gespritzte Dicke jeder Schicht und die Länge der „Pausen“ (= Zeitraum zwischen dem Spritzen zweier Spritzbetonschichten) ermittelt. In Abbildung 33 und Abbildung 34 sind die Betonierabschnittsgrenzen (BAG) bis in 7 m Entfernung zur luftseitigen Ortsbrust dargestellt. Die Linien kennzeichnen jeweils die Position der Betonierabschnittsgrenzen. In Abbildung 33 sind diese örtlich im Bauwerk dargestellt und entsprechend der jeweiligen Pausenlänge farblich markiert. In Abbildung 34 ist die Länge der Pausen an den Betonierabschnittsgrenzen über die Bauwerkslänge an der jeweiligen Lage der Betonierabschnittsgrenze aufgetragen. Am Widerlagerzahn sind die Betonierabschnitte deutlich dünner sind als beim übrigen betrachteten Bauwerk. Die mittlere Schichtdicke am Widerlagerzahn beträgt etwa 8 cm, während im sonstigen Bauwerk Schichtdicken von über 10 cm erreicht wurden [AU4]. Bei knapp zwei Drittel der Betonierabschnittsgrenzen betrug die Länge der Pause zwischen den Betonierabschnitten einen Tag. Bei knapp einem Drittel der Betonierabschnittsgrenzen betrug die Pause zwischen den Betonagen zwei bis vier Tage. Außergewöhnlich lange Pausen von 8, 13 bzw. 35 Tagen traten jeweils nur einmal auf.

Es wurde untersucht, ob sich die Bereiche mit Betonierabschnittsgrenzen hinsichtlich der strömungstechnischen und geomechanischen Eigenschaften (z.B. Permeabilität und Festigkeit) von den Eigenschaften des MgO-Betons im Inneren einer Spritzbetonschicht unterscheiden.

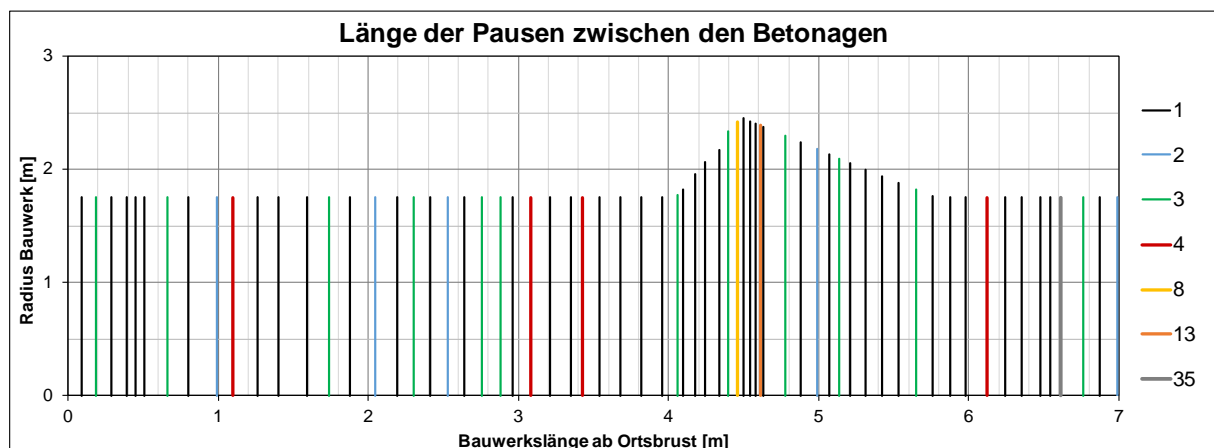


Abbildung 33: Lage der Betonierabschnittsgrenzen mit Pausen zwischen zwei Betonagen (in Tagen)

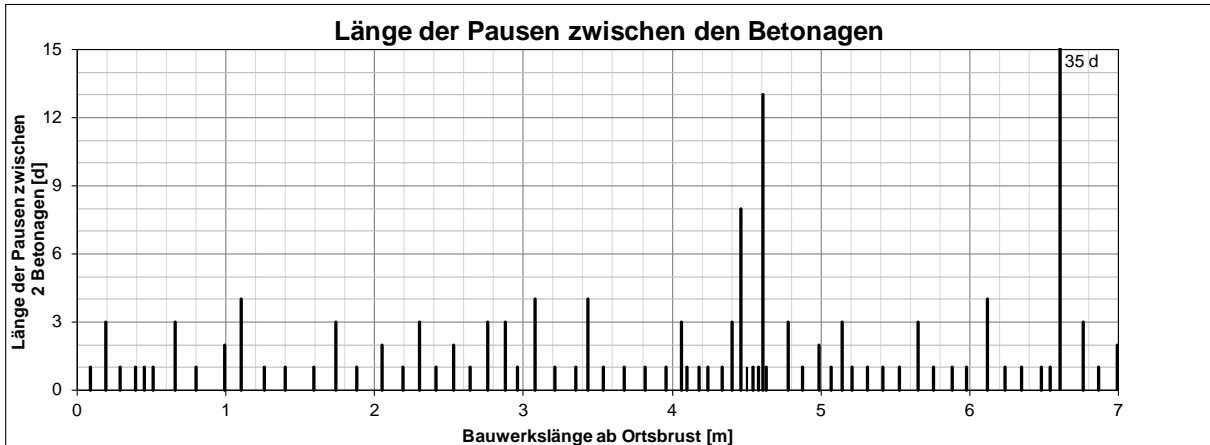


Abbildung 34: Länge der Pause zwischen zwei Betonagen

Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.1 bereits beschriebenen Kernbohrungen B40, B41 und B44 wurde für die 100 mm-Kernbohrung B42 die Ausbildung der Betonierabschnittsgrenzen sowie das angetroffene Rissmuster systematisch dokumentiert (Abbildung 35). Dabei zeigte sich, dass rund 3/4 der identifizierbaren Betonierabschnittsgrenzen beim Bohren intakt geblieben waren, während zusätzlich zu eindeutigen Abrissen an Betonierabschnittsgrenzen auch Spaltbrüche (offenbar aufgrund der Bohrbeanspruchung) im intakten Material, z.T. unmittelbar benachbart zu Betonierabschnittsgrenzen, auftraten. Dies dokumentiert, dass die Festigkeit an den Betonierabschnittsgrenzen variieren kann, wobei die Kontakteigenschaften von technologischen Effekten (z.B. Fehlstellen beim Spritzen infolge Anhaftungen/Luftblasen oder der möglichen Standzeit) beeinflusst sein können.

Teilweise war der MgO-Beton durch den Bohrprozess bzw. die Entnahme aus dem Kernrohr „aufgelockert“, weshalb auf die Untersuchung der rot markierten Segmente verzichtet wurde.

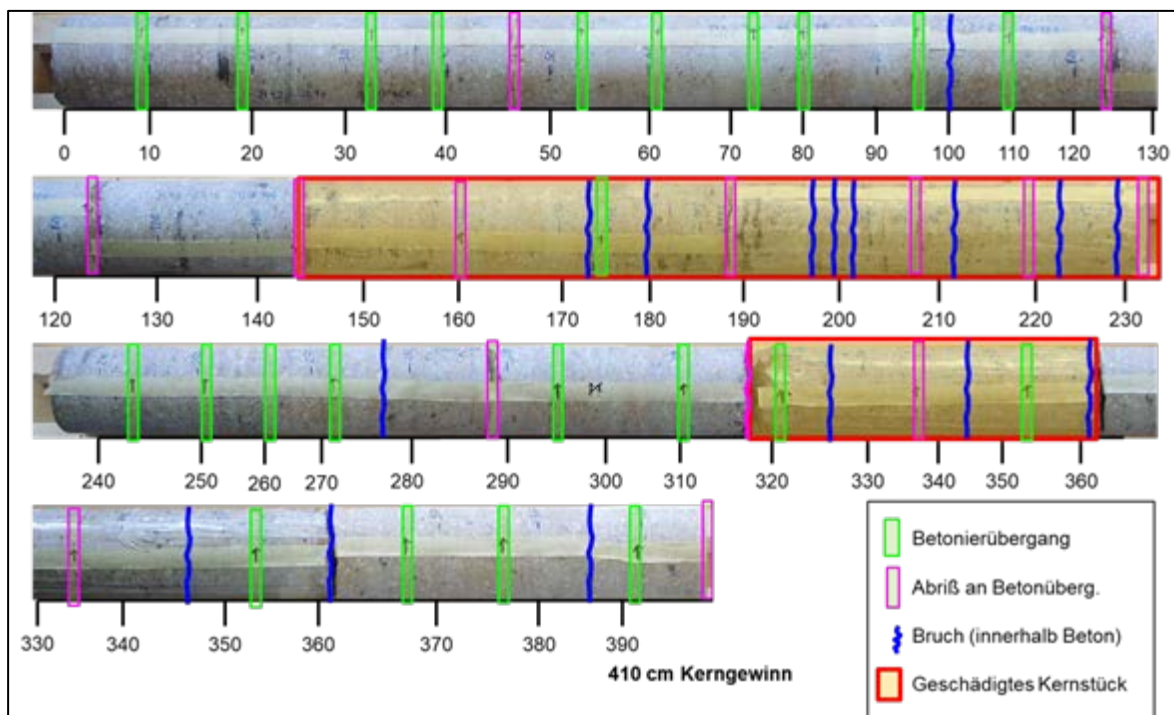


Abbildung 35: Betonierabschnittsgrenzen bzw. Trennbrüche in der Bohrung B42 (mit Klassifizierung). Die rot markierten Bereiche zwischen ca. 143 cm und 235 cm bzw. zwischen 317 cm und 362 cm wurden beim Bohren des Kerns geschädigt.

Die Abbildung 36 enthält Fotos vom Kernmaterial der Bohrung B42 und von Betonierabschnittsgrenzen. Diese sind an Farbunterschieden oder an Poren erkennbar.



Abbildung 36: Makroskopisches Erscheinungsbild von Betonierabschnittsgrenzen an Kernmaterial der B42 (Detailaufnahmen)

Die Betonierabschnittsgrenzen wurden lokal aufgelöst röntgendiffraktometrisch vermessen (Abbildung 37). Die Detailanalyse der Beugungsbilder im Bereich des SiO_2 -Hauptreflexes führt zu der Schlussfolgerung, dass im Bereich der hell/dunkel-Bänderung der Betonierabschnittsgrenze verhältnismäßig wenig Quarzkornanteil (Kieskörner) und ein höherer Feinanteil silikatischer Phasen aus dem Zuschlag vorhanden ist.

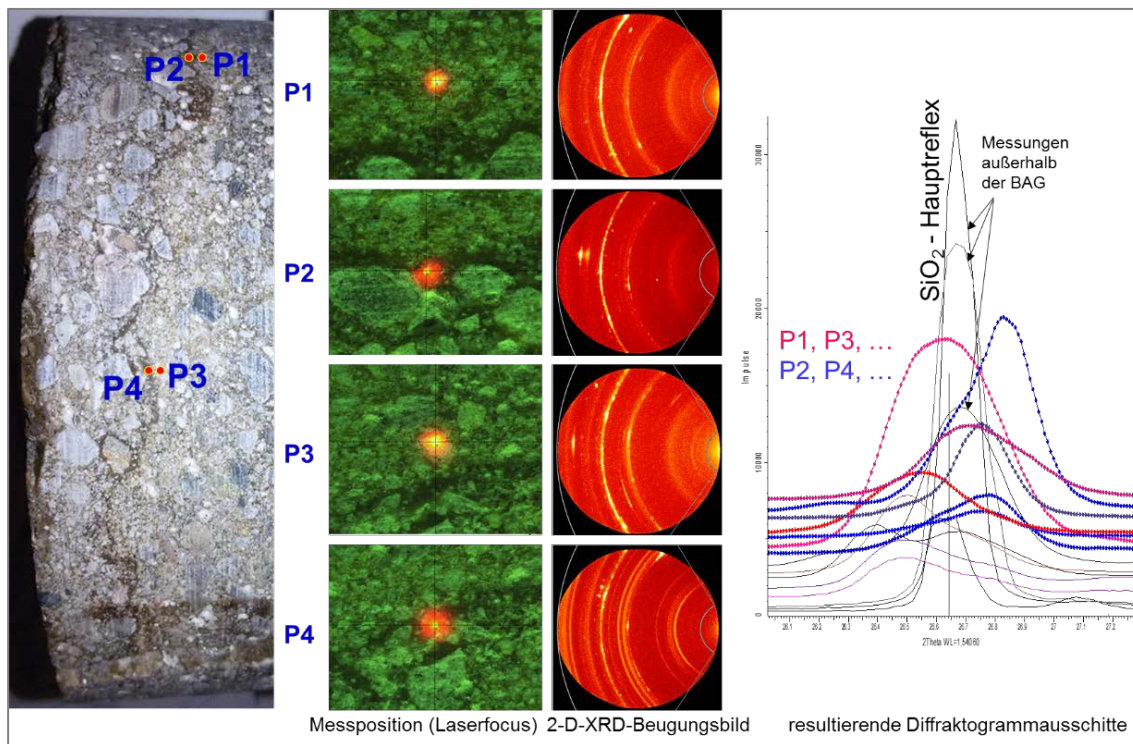


Abbildung 37: Ortsaufgelöste, röntgenographische Untersuchungen der optisch sichtbaren Betonierabschnittsgrenzen (BAGs) am Beispiel eines Bohrkerns aus der B44.

3.7 Lagerungsversuche

Das Verhalten des MgO-Betons bei unterschiedlicher Luftfeuchte sowie bei Lösungskontakt wurde in zwei verschiedenen Arten von Lagerungsversuchen untersucht. Einerseits wurden Proben bei konstanter Temperatur und unterschiedlicher Luftfeuchte (Abschnitt 3.7.1) und andererseits in den drei Versuchslösungen (Abschnitt 3.4) gelagert. Ziel beider Versuchsreihen war es, die Wechselwirkungen zwischen Baustoff und Umgebungsmedium festzustellen.

3.7.1 Lagerung bei unterschiedlicher Luftfeuchte

3.7.1.1 Methodik

Für die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Wasserdampf und dem MgO-Spritzbeton wurden mehrere Proben aus den Bohrkernen der Bohrung B41 entnommen. Drei Proben wurden als massive Probekörper (**Blockproben**) eingesetzt und drei Probekörper wurden zerkleinert (**Bruchproben**). Die Proben (jeweils ca. 200 g) wurden bei einer Temperatur von 30°C und einer relativen Luftfeuchte zwischen 30 % und 75 % in einem Klimaschrank gelagert. Dies entspricht etwa den Umgebungsbedingungen untertage am Versuchsstandort, an dem eine Temperatur von ca. 27°C und relative Luftfeuchte zwischen 25 % und 47 % vorherrscht. Die Luftfeuchtespannweite wurde gegenüber der Spannweite unter Tage nach oben erweitert.

Während die Temperatur über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant gehalten wurde, wurde die Luftfeuchte stufenweise gesteigert, beginnend bei $F_R = 30\%$ über $F_R = 45\%$ und $F_R = 60\%$ bis zum Maximum bei $F_R = 75\%$. Anschließend wurde die Luftfeuchte wieder stufenweise bis auf $F_R = 30\%$ reduziert. Dabei wurde die Massenänderung jeder Probe durch

regelmäßiges Wiegen festgestellt. Nachdem die Masse der Probe bei jeder Luftfeuchtigkeitsstufe konstant war bzw. die Proben einer ausreichend langen Zeitspanne einer relativen Luftfeuchte F_R ausgesetzt waren, wurde die nächste Stufe der Luftfeuchte eingestellt.

3.7.1.2 Ergebnisse

Lagerung bei unterschiedlicher Luftfeuchte

In Abbildung 38 ist die mittlere Massenänderung der Block- und Bruchproben über die Zeit aufgetragen. In Tabelle 11 sind die Massenänderungen zusammengefasst.

Mit einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit nimmt die Masse der Proben deutlich zu, wobei diese Zunahme an den Bruchproben aufgrund der größeren Kontaktfläche wesentlich höher ist als bei den Blockproben. Zum Ende der Stufe mit 75 % relativer Luftfeuchte beträgt die mittlere Massenzunahme an den Blockproben 3,4 % und an den Bruchproben im Mittel etwa 5 %. Nach Abschluss der Stufe mit 75 % relativer Luftfeuchte wurden je eine Block- und eine Bruchprobe entnommen und phasenanalytisch untersucht.

Für die verbliebenen Proben wurde anschließend die Luftfeuchte wieder stufenweise reduziert. Die Massenabnahme war im Vergleich zur Massenaufnahme wesentlich geringer. Sie betrug an den Blockproben ca. 0,7 % und an den Bruchproben 1,0 %, jeweils bezogen auf die am Ende der Stufe mit 75 % Luftfeuchte erreichte Masse. D.h. 80 % der im Betrachtungszeitraum aufgenommenen Feuchte ist durch Reaktion mit dem MgO-Beton von den Proben verbraucht worden bzw. in den Proben verblieben.

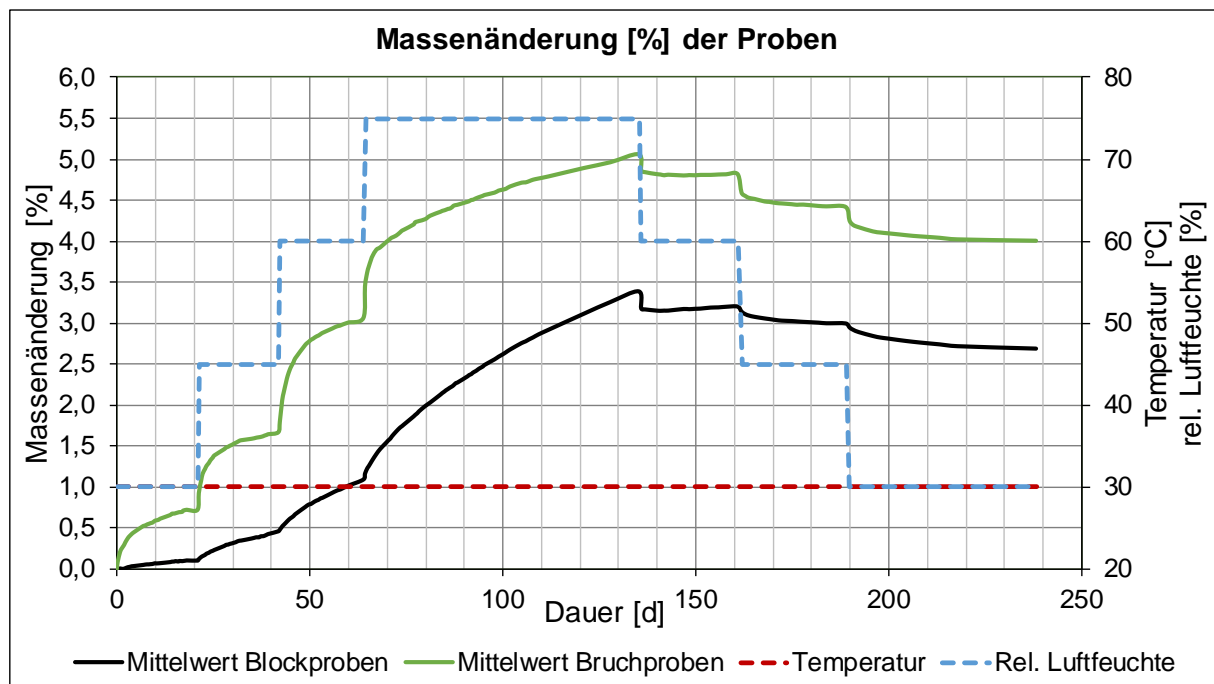


Abbildung 38: Mittlere Massenänderung der Proben bei unterschiedlicher Luftfeuchte (Werte in Tabelle 11).

Tabelle 11: Mittlere Massenänderung der Proben bei unterschiedlicher Luftfeuchte

F _R	mittlere Massenänderung [%]			
	Blockproben		Bruchproben	
30 %	+ 0,10	+ 3,39	+ 0,73	+ 5,07
45 %	+ 0,36		+ 0,95	
60 %	+ 0,63		+ 1,40	
75 %	+ 2,30		+ 2,00	
60 %	- 0,19	- 0,70	- 0,24	-1,06
45 %	- 0,21		- 0,40	
30 %	- 0,31		- 0,41	

Die gemessene Massezunahme und die Masseabnahme sind abhängig von der Zeitdauer einer Stufe, über die die Luftfeuchtigkeit konstant gehalten wird. Die Prozentzahlen sind deshalb nicht als „Endwerte“ bei einer bestimmten Luftfeuchte anzusehen.

Die gemessene irreversible Massezunahme ist nach der phasenanalytischen Untersuchung am zerkleinerten Probematerial durch die Bildung von Chlorartinit $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl} \cdot \text{MgCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bedingt (Diffraktogramm in Abbildung 39). Chlorartinit bildet sich in Gegenwart von Feuchte und CO_2 aus Sorelphasen oder MgO bzw. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in chloridischer Umgebung.

Chlorartinit hat sich dagegen auf der untertägigen, luftseitigen GV2-Bauwerksoberfläche nicht gebildet (sondern nur auf angrenzendem Carnallit). Stattdessen wurde die 3-1-8-Phase als Bestandteil des MgO-Betons an der Oberfläche identifiziert (Abschnitt 3.3). Die Ursache liegt möglicherweise in den Feuchtebedingungen für die Chlorartinitbildung. So war die relative Luftfeuchtigkeit bei den Laboruntersuchungen scheinbar ausreichend hoch, in der Grubenluft jedoch offensichtlich zu niedrig. Die am GV2 angrenzende Carnallit-Kontur, auf welcher Chlorartinit entstanden ist, besitzt dagegen immer einen verwitterungsbedingten Feuchtigkeitsfilm.

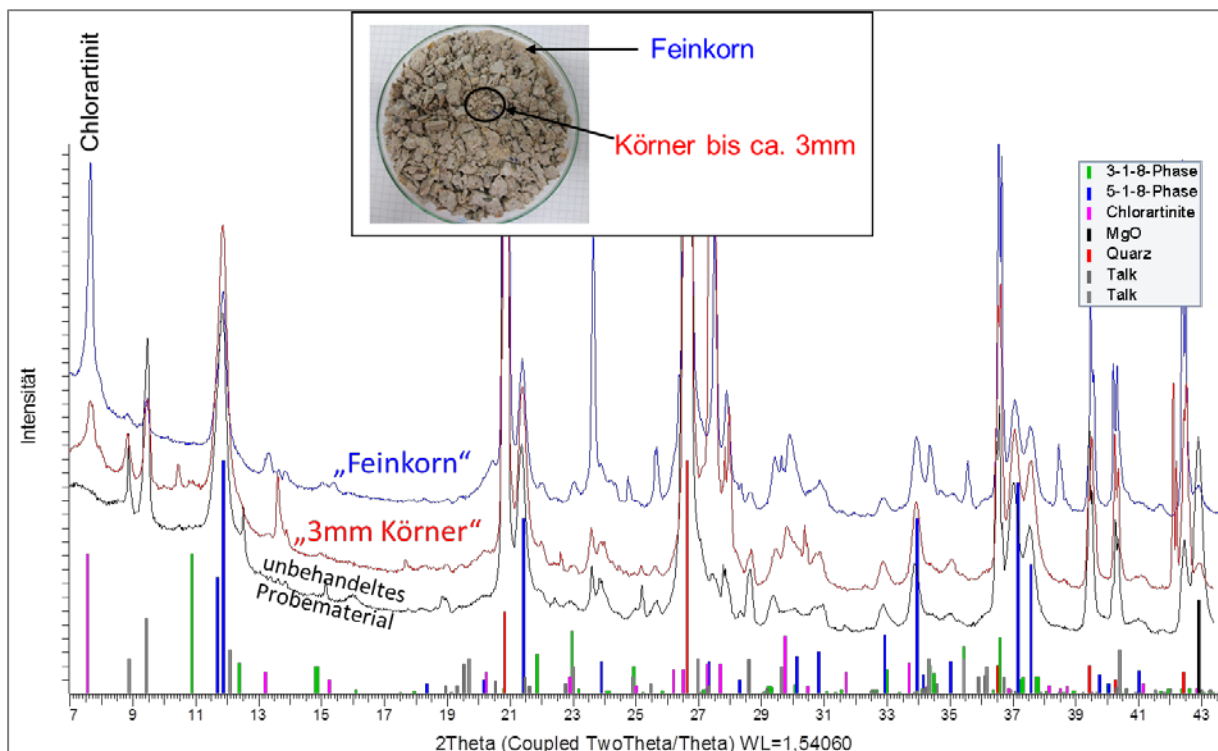


Abbildung 39: Pulverdiffraktogramme der bei unterschiedlicher Luftfeuchte gelagerten Bruchproben nach Versuchsende im Vergleich zu unbehandeltem GV2-Ausgangsmaterial

Lagerung bei konstant hoher relativer Luftfeuchte

In einem weiteren Laborversuch wurden Bruchproben des MgO-Betons bei konstant hoher relativer Luftfeuchte im Klimaschrank gelagert. Jede Probe wurde dabei nur einer konstanten relativen Luftfeuchte ausgesetzt. Die relative Luftfeuchte betrug 45 %, 55 % und 65 %, während die Temperatur bei allen Versuchen bei 30°C lag.

Die Masseänderung der Bruchproben ist in Abbildung 40 dargestellt. Bei allen Proben nimmt die Masse zu, welche umso größer ist, je höher die relative Luftfeuchte ist. Die größte Massenzunahme ist innerhalb der ersten Tage zu beobachten.

Nach 4-5 Wochen wurden die Proben phasenanalytisch untersucht. Die Röntgenpulverdiffraktogramme (Abbildung 41) der Proben zeigen, dass sich unabhängig von der relativen Luftfeuchte ($F_R > 45\%$) Chlorartinit aus dem vorhandenen Rest-MgO bzw. aus/und der 5-1-8-Phase bildet.

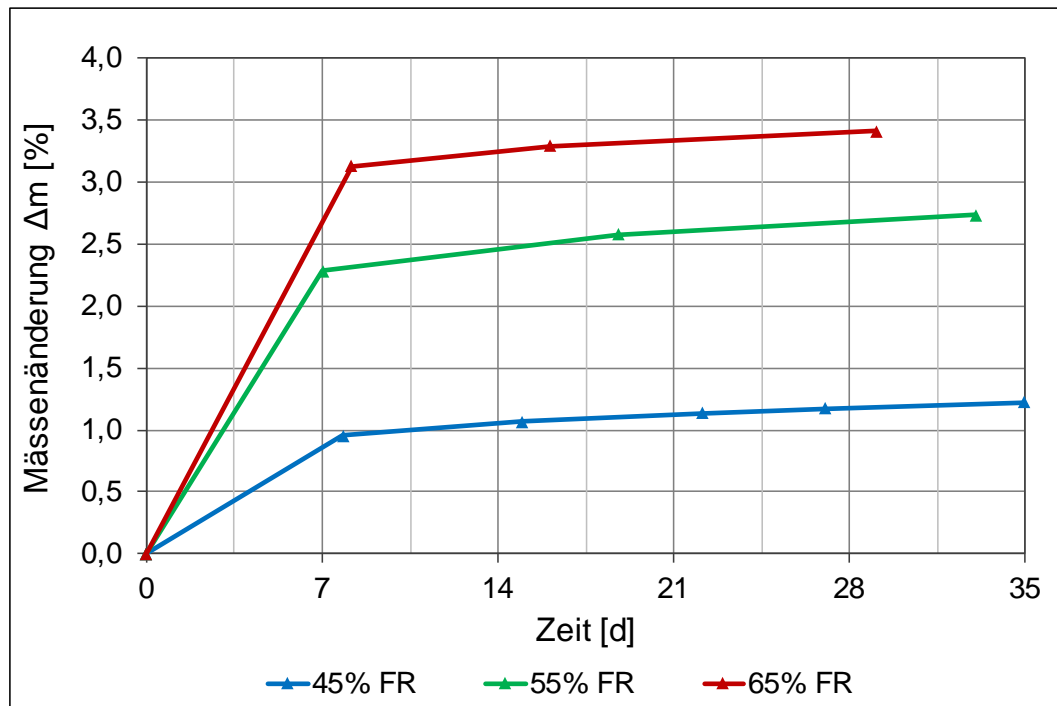


Abbildung 40: Massenänderung der Bruchproben bei Lagerung in Gegenwart konstanter relativer Luftfeuchte F_R

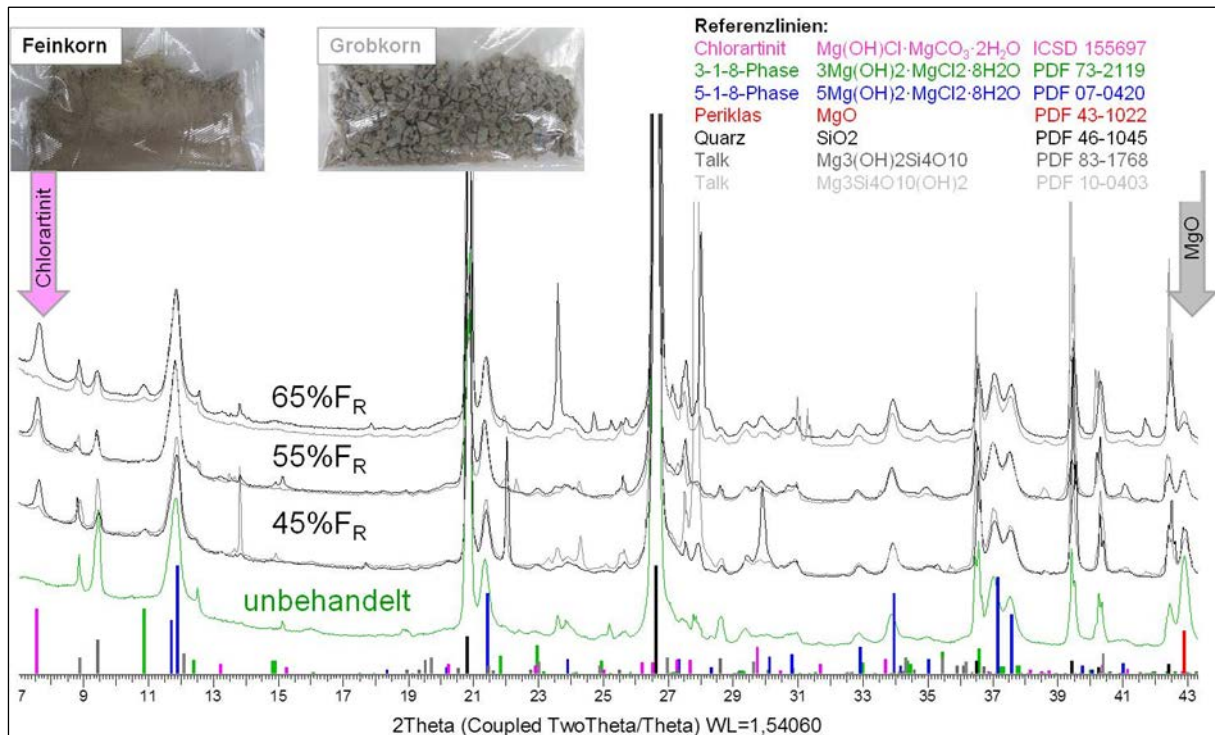


Abbildung 41: Pulverdiffraktogramme der bei konstanter relativer Luftfeuchte gelagerten Bruchproben im Vergleich zu unbehandeltem Probematerial

3.7.2 Lagerung in Lösung

3.7.2.1 Methodik

Um das Material bei Kontakt mit den Versuchslösungen zu beurteilen, wurden zylindrische Probenkörper mit einem Durchmesser von ca. 62 mm und einer Länge von ca. 40 mm bis 45 mm ohne Volumeneinspannung bei Raumtemperatur in verschlossenen Kunststoffbehältern gelagert.

Für die Untersuchungen kamen die in Kapitel 3.4 beschriebenen Salzlösungen zum Einsatz:

- Lösung 1: reine, gesättigte NaCl-Lösung
- Lösung 2: NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung
- Lösung 3: MgCl₂/CaCl₂-Lösung

In den drei verwendeten Lösungen wurden je zwei Probenkörper über einen Zeitraum von bis zu 2500 h gelagert. Die eingesetzten Proben mit einer Ausgangsmasse von ca. 270 g bis 290 g wurden aus den Kernen der Bohrungen B40, B41 und B44 entnommen.

Zur Beurteilung der Veränderungen der eingelagerten Proben wurden in bestimmten zeitlichen Abständen die relative Massenänderung Δm_{rel} (Gleichung (4)) und die relative Volumenänderung ΔV_{rel} (nach Gleichung (5)) der Proben bestimmt. Dafür wurden die Proben aus der Lösung entnommen und vorsichtig mit Papiertüchern abgetupft. Die Proben wurden mit einer KERN-Waage PLS mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,001$ g gewogen. Das Volumen wurde über mindestens 10 Durchmesser- und Längenmessungen mit einem Messschieber mit einer Messunsicherheit von 0,1 mm ermittelt. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurden diese Untersuchungen, soweit möglich, immer von demselben Mitarbeiter durchgeführt.

$$\Delta m_{rel} = \frac{m(t) - m_0}{m_0} \quad (4)$$

Δm_{rel}	relative Massenänderung	[-]
$m(t)$	Masse zum Zeitpunkt t	[g]
m_0	Masse zum Zeitpunkt t=0	[g]

$$\Delta V_{rel} = \frac{V(t) - V_0}{V_0} \quad (5)$$

ΔV_{rel}	relative Volumenänderung	[-]
$V(t)$	Volumen zum Zeitpunkt t	[cm ³]
V_0	Volumen zum Zeitpunkt t=0	[cm ³]

3.7.2.2 Ergebnisse

Die relativen Massen- und Volumenänderungen der untersuchten Proben sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 in Abhängigkeit von der Lagerungszeit dargestellt. Eine vergleichende visuelle Beurteilung der Proben vor und nach der Lagerung ist aus Tabelle 12 (Lösung 1), Tabelle 13 (Lösung 2) und Tabelle 14 (Lösung 3) möglich.

Für alle Proben wurde zeitabhängig eine nahezu gleichmäßige Massenzunahme beobachtet, die auf einen Aufsättigungsprozess schließen lässt (Abbildung 42).

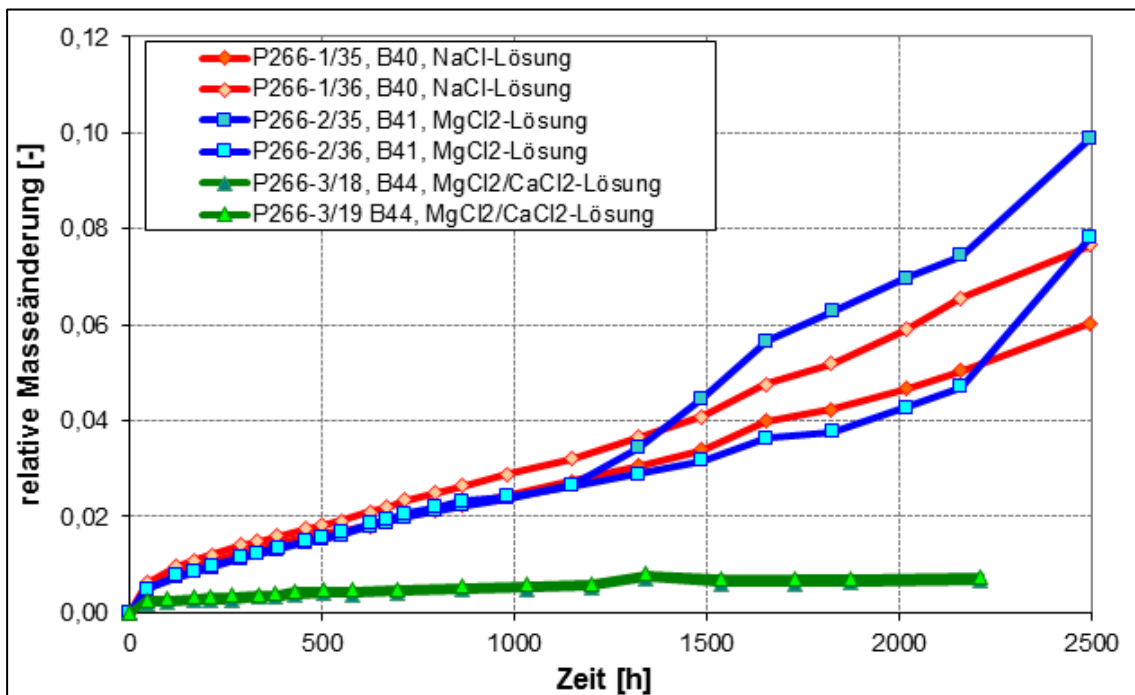


Abbildung 42: Relative Massenänderung der Proben bei Lagerung in den 3 Versuchslösungen

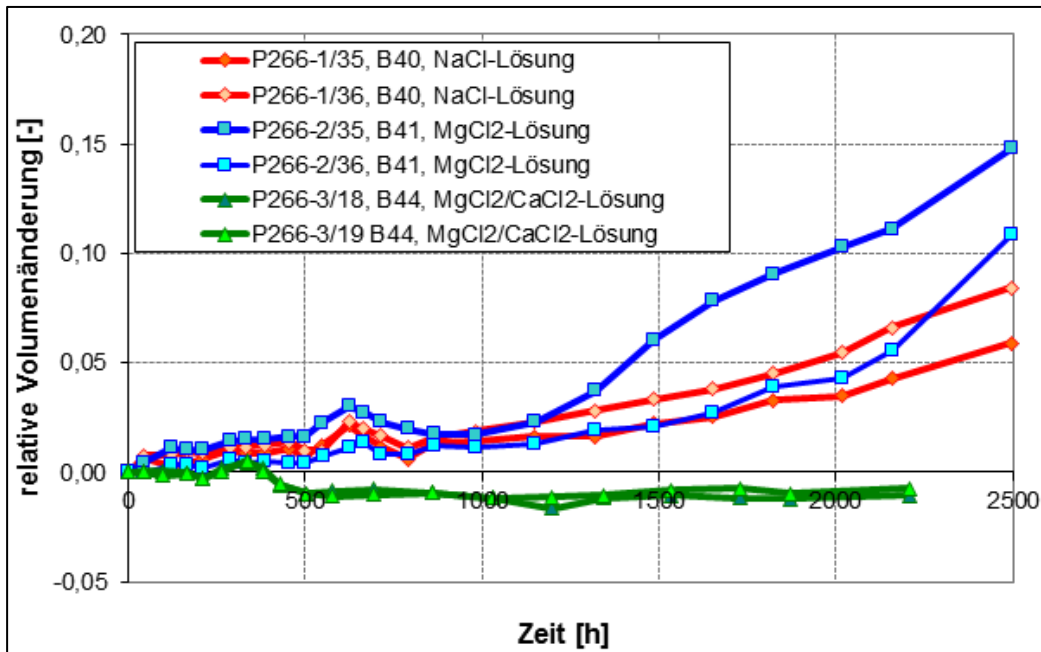


Abbildung 43: Relative Volumenänderung der Proben bei Lagerung in den 3 Versuchslösungen

Lösung 1

Fotos der Bohrkern vor und nach der Lagerung in Lösung 1 sind in Tabelle 12 dargestellt. Es sind deutlich Risse zu erkennen. Sowohl die Masse der Proben (siehe Abbildung 42) als auch das Volumen der Proben (siehe Abbildung 43) nimmt im Versuch um etwa 6 % bis 8 % nach 2500 h zu.

Tabelle 12: Fotos der Proben vor und am Ende der Lagerungsversuche mit Lösung 1

Lösung	Probe	vor Lagerungsversuch	Ende Lagerungsversuch
Lösung 1 (gesättigte NaCl-Lösung)	P266-1/35		
	P266-1/36		

Lösung 2





Die größte Massenzunahme wurde für die Proben in der NaCl-gesättigten, $MgCl_2$ -haltigen Lösung (Lösung 2) mit etwa 9 % nach 2500 h ermittelt. Das Volumen der Proben, die in Lösung 2 gelagert waren, nahm im Mittel um etwa 13 % zu (Abbildung 43, blaue Messkurven). Die Probekörper zeigten zudem erhebliche Risse im Laufe der Lagerungszeit (siehe Fotos in Tabelle 13).

Für die in der Lösung 2 gelagerten zwei Proben steigt mit fortschreitender Lagerungszeit die Massen- und Volumenzunahme an. Dies wird im Wesentlichen auf die Ausbildung der Risse – vgl. Tabelle 13 (Spalte „Ende Lagerungsversuch“) – und die dadurch variierende Aufnahme von Lösung und die dadurch bedingten Reaktionen (s. Abschnitt 3.4) zurückgeführt.

Mit Zunahme der Verformungen ist auch davon auszugehen, dass bei der Volumenbestimmung die Messunsicherheit größer wird. Diese resultiert auch aus der Speicherung von Lösung in den Rissen, in die die Lösung aufgrund der Kapillarkräfte vordringt, und der Unregelmäßigkeit der geometrischen Abmessungen der Proben.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Versuche ausschließlich der prinzipiellen Beurteilung des Materialverhaltens im Kontakt mit Lösung in Vorbereitung der Lösungspermeabilitätsuntersuchungen dienten.

Tabelle 13: Fotos der Proben vor und am Ende der Lagerungsversuche mit Lösung 2

Lösung	Probe	vor Lagerungsversuch	Ende Lagerungsversuch
Lösung 2 (NaCl-gesättigte, $MgCl_2$ -haltige Lösung)	P266-2/35		
	P266-2/36		





Lösung 3

An den beiden Proben, die in Lösung 3 über 2200 h eingelagert waren, sind keine Risse aufgetreten (siehe Tabelle 14).

Die geringste Massenänderung (< 1 %) wurde für die Proben in der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung (Lösung 3) bestimmt (siehe Abbildung 42). Dies lässt im Vergleich zu den anderen Lösungen und Proben auf eine nur sehr geringere Lösungsaufnahme schließen. Es ist davon auszugehen, dass die um ca. Faktor 12 bis 15 höhere Viskosität der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung (ca. 18 mPas, siehe Abschnitt 3.4) eine wesentliche Ursache für die geringere Flüssigkeitsaufnahme ist.

Die Volumenganglinie in Abbildung 43 zeigt nach ca. 400 h Versuchsdauer eine geringfügige Abnahme des Volumens. Aufgrund der geringen Volumenänderung wird dies als Messfehler angesehen. Es wird daher angenommen, dass sich das Volumen der Probenkörper in der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung (Lösung 3) über den Versuchszeitraum von 2200 h nicht änderte.

Tabelle 14: Fotos der Proben vor und am Ende der Lagerungsversuche mit Lösung 3 (keine Rissbildung nach 2200 Stunden)

Lösung	Probe	vor Lagerungsversuch	Ende Lagerungsversuch
Lösung 3 ($MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung)	P266-3/18		
	P266-3/19		

Bei allen sechs Proben wird angenommen, dass am Versuchsende der Aufsättigungsprozess noch nicht abgeschlossen war.

Auf den Bildern in Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 sind für die in gesättigter NaCl-Lösung (Lösung 1), in NaCl-gesättigter, $MgCl_2$ -haltiger Lösung (Lösung 2) und in $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung (Lösung 3) eingelagerten Proben die reaktionsbedingten Verformungen bis hin zur Rissbildung zu erkennen. Da die Proben nicht eingespannt waren, sind diese Verformungen und Risse aufgetreten (nicht in Lösung 3).

Neben der Verformung und Rissbildung hat sich auf den Proben, die in Lösung 2 eingelagert waren, eine Schicht ausgebildet, die die Probe vollständig umhüllt. Dabei kann es sich um Aufwachsungen von 3-1-8 Phase handeln, oder auch um Chlorartinitbildung. Die Chemische Zusammensetzung der Schicht wurde nicht weiter bestimmt.

3.8 Feuchtegehalt

3.8.1 Methodik

Der Feuchtegehalt von Baustoffen ist für die Berechnung der Trockenmasse und Trocken-dichte sowie für die Beurteilung der Porenraumsättigung wesentlich. Die der Feuchtegehaltsbestimmung zugrundeliegende Trocknung des Materials ist ein Teil der Probenaufbereitung für die Ermittlung weiterer Materialparameter (z.B. Reindichte und Porosität).

Bei MgO-Baustoffen mit basischen Magnesiumchlorid-Hydraten als Bindemittelphase (Abschnitt 3.4) stellt die übliche Trocknung bei ca. 105°C jedoch keine sinnvolle Trocknungsmethode zur Bestimmung des Feuchtegehaltes 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 aufnimmt - 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.

Zur Veranschaulichung des Sachverhaltes, dass die Trocknung bei 105°C zur thermischen Zersetzung der Bindemittelphasen führt, wurde eine pulverisierte Probe (nur aus 5-1-8-Phase bestehend) nach 15 h bei 105°C Trocknung phasenanalytisch untersucht. Das erhaltene Röntgenpulverdiffraktogramm (Abbildung 44) zeigt im Vergleich zur Ausgangs-Bindemittelphase 5-1-8, dass deren Reflexe bereits nach 2,5 Stunden bei 105°C nicht mehr vorhanden sind, und sich stattdessen ein thermisches Abbauprodukt (niederes Hydrat) gebildet hat.

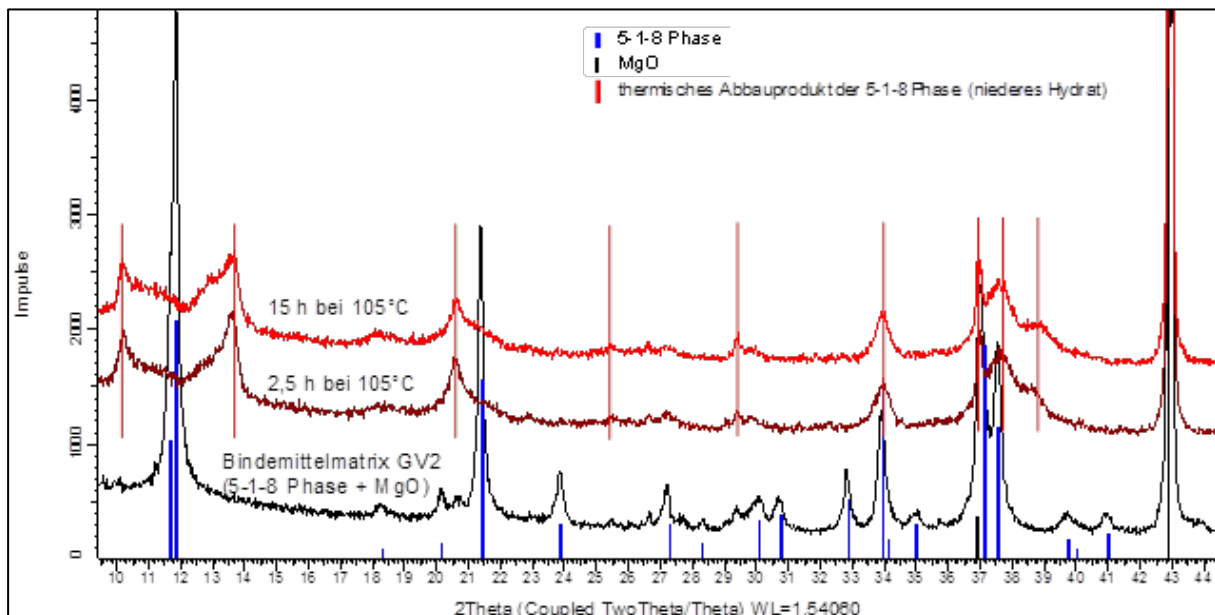


Abbildung 44: Diffraktogrammausschnitte zur Identifizierung des Bindemittelphasenbestandes des MgO-Betons (GV2, 5-1-8 Rezeptur) vor und nach Behandlung bei 105°C für 2,5 h sowie 15 h (mit Zersetzung der 5-1-8 Phase bei 105°C wurde parallel ein Masseverlust von 9,8 % für die Bindemittelmatrix bestimmt).

Aufgrund dieses temperaturabhängigen Verhaltens ist es erforderlich, die Trocknungsbedingungen entsprechend der Zielstellung der Untersuchungen und der weiteren Verwendung der ermittelten Parameter auf das Materialverhalten abzustimmen. Vor diesem Hintergrund wurde das Kernmaterial aus den Bohrungen B40, B41 und B44 wie folgt behandelt:

1. Zum Vergleich mit früheren Versuchen (Erfahrungswerte [AU14] für diesen und/oder andere MgO-basierte Baustoffe), bei denen die Proben bei 105°C getrocknet wurden, wurde die Vorgehensweise wiederholt (Ofentrocknung bei 105°C bis zur Massekonstanz). Die Ergebnisse, die bei dieser Vorgehensweise ermittelt werden, sind jedoch nicht belastbar.
2. Die Proben wurden bei ca. 25°C und bei ca. 32,5 % relativer Luftfeuchte F_R bis zur Massekonstanz in einem Exsikkator über einer Schüttung aus Bischofit getrocknet. Die Gleichgewichtsfeuchte von Bischofit stellt sich bei ca. 25°C mit ca. $F_R = 32,5$ % ein.

Für eine überschlägliche Berechnung der Kapillarspannung bei einer relativen Luftfeuchte von 32,5 % wurde die KELVIN-Gleichung für das Phasensystem Wasser/Luft angewendet. Mit der KELVIN-Gleichung berechnet sich eine Saugspannung von ca. 145 MPa. Bei Vernachlässigung des Unterschiedes in den Benetzungseigenschaften von Wasser und hoch mineralisierter Salzlösung kann daraus eine Größenordnung des effektiv wirksamen Porendurchmessers von ca. 2 nm bei einer Kapillarspannung von ca. 145 MPa abgeschätzt werden. Diese grobe Näherung dient ausschließlich dem Prozessverständnis und für eine Vorstellung zu den Auswirkungen des Trocknungsprozesses im Porengefüge des Materials. Da der Porendurchmesser von 2 nm sehr klein ist, ist davon auszugehen, dass im Verlauf der Trocknung der wesentliche Porenanteil des Materials durch den Trocknungsprozess erfasst wird (Abschnitt 3.10.2.2).

Aufgrund der geringen Permeabilität des Baustoffes dauert die Trocknung des Materials bei 25°C und bei 32,5 % relativer Luftfeuchte bis zur Massekonstanz bis zu mehreren hundert Stunden.

Die entsprechend getrockneten Proben (Bruchstücke) wurden nach Erreichen der Massekonstanz in gasdicht verschlossene Wägegläschen überführt. Anschließend wurde die Reindichte im Gaspyknometer (Abschnitt 3.10.1.1) und Porosität durch Quecksilberporosimetrie (Abschnitt 3.10.1.2) bestimmt.

Die Proben wurden im Verlauf der Trocknung mit einer Kern-Waage PLS mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,001$ g gewogen.

Als Ergebnis der Trocknung wurde ein Feuchtegehalt unter der Annahme berechnet, dass es sich bei der Porenlösung um eine $MgCl_2$ -gesättigte Porenlösung mit einer Dichte von $1,33 \text{ g/cm}^3$ handelt [AU15].

3.8.2 Ergebnisse

Die für die zwei Trocknungsmethoden ermittelten Feuchtegehalte sind in Tabelle 21, Spalte 7 (Abschnitt 3.12) zusammengestellt. In Abbildung 45 sind diese Feuchtegehalte in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe dargestellt.

Bei einer Reihe von Proben wurden bei einer Trocknung mit einer Temperatur von ca. 25°C und einer relativen Luftfeuchte von ca. 32,5 % rechnerisch negative Feuchtegehalte berechnet. Dies würde auf eine Massenerhöhung der Proben über den Trocknungsverlauf schließen lassen. Bei den sehr geringen Masseänderungen kann dies sowohl ein versuchstechnisches Artefakt, aber auch ein Hinweis auf ein materialspezifisches Verhalten sein. Da rechnerisch negative Feuchtegehalte bei mehreren Proben aufgetreten sind und bei den Trocknungsarbeiten gewissenhaft gearbeitet wurde, wurden die Ergebnisse als negative Feuchtegehalte in die

Ergebnisdokumentation aufgenommen. Wie die Ergebnisse der Probenlagerung in Gegenwart höherer Luftfeuchte zeigen (Abschnitt 3.7), nehmen die Proben Feuchte aufgrund von Phasenneubildung auf. Um die versuchstechnisch bedingten Einflüsse soweit wie möglich auszuschließen, wurden die Proben nur in großen zeitlichen Abständen und sehr schnell, ohne lange Offenstandszeiten oder Lagerungszeiten unter der Laboratmosphäre, gewogen.

Der Feuchtegehalt aus Proben der Bohrung B40, festgestellt bei 105°C Trocknung, beträgt im Mittel von 27 Proben 6,6% (siehe Tabelle 15). Der Feuchtegehalt bei einer Trocknung von 25°C und 32,5 % relativer Luftfeuchte liegt im Mittel aus 26 Proben bei 0,3 %. Der Feuchtegehalt schwankt über die Bohrlochteufe nicht (siehe Abbildung 45).

Die ermittelten Feuchtegehalte für die Trocknung bei 105°C sind deutlich größer als bei einer Trocknung und 25°C bei 32,5 % relativer Luftfeuchte, was auf der Erfassung des hydratgebundenen Wassers der Bindemittelphase bei 105°C Trocknung beruht. Im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Porosität (Abschnitt 3.10.2.2) wird darauf eingegangen.

Tabelle 15: Ergebnisse der Feuchtegehalte

Trocknung	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Minimum [%]	Maximum [%]	Anzahl Einzelwerte
105°C	6,6	0,4	6,0	7,3	27
25°C, F_R = 32,5 %	0,3	0,3	-0,7	0,2	26

Die bei Umgebungstemperatur (25°C) und ca. F_R = 32,5 % erhaltenen Werte zeigen, dass es sich bei dem MgO-Beton des GV2-Bauwerkes um einen trockenen MgO-Baustoff handelt. Das GV2-Spritzbetonbauwerk ist quasi frei von Porenlösung.

Die Auswertung der ortsbrustnahen Lösungsgehalte weist auf geringfügig höhere Gehalte nahe der Ortsbrust hin. Es wird empfohlen, im Zusammenhang mit dem geplanten Rückbau feiner ortsaufgelöste Untersuchungen zum Lösungsgehalt und zur mineralogischen Zusammensetzung durchzuführen.

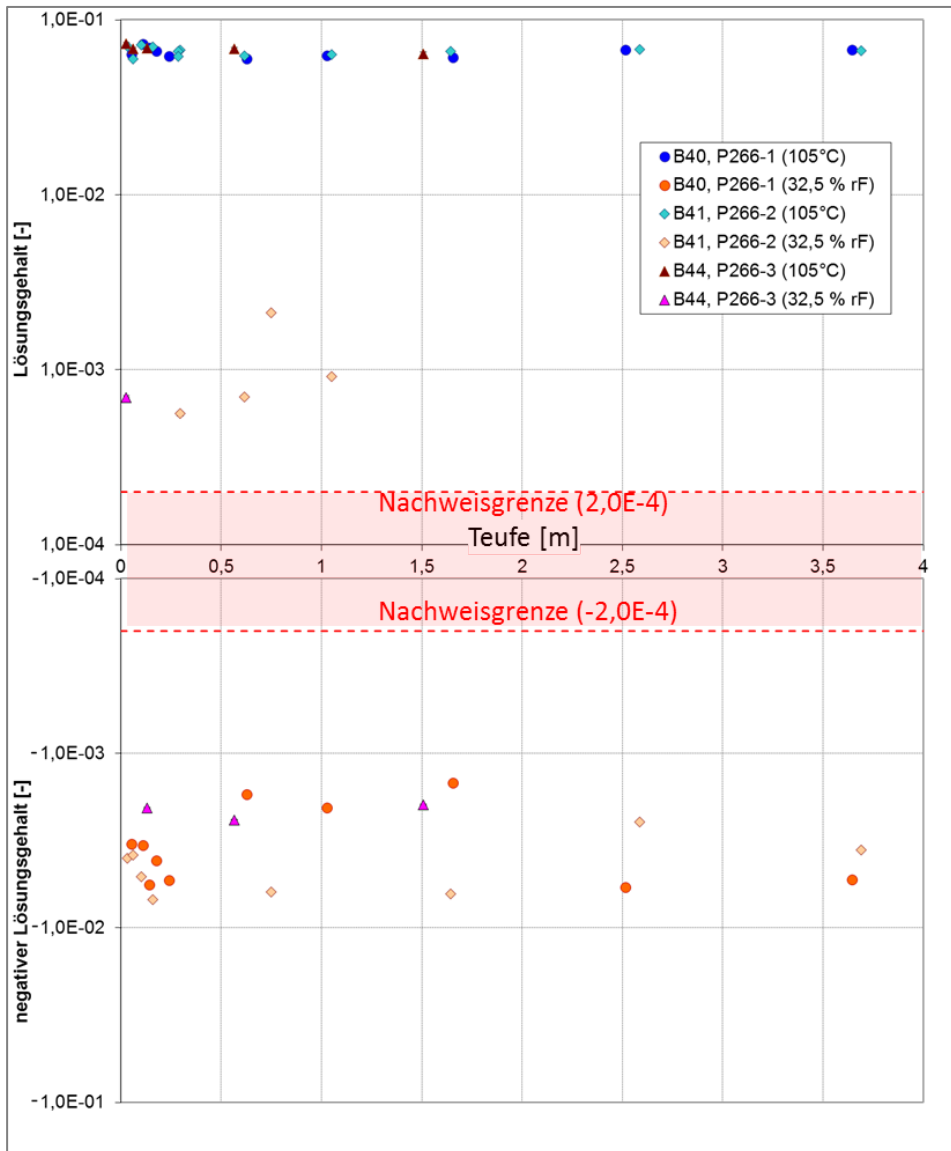


Abbildung 45: Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe und dem Trocknungsverfahren bei den Bohrungen B40, B41 und B44

3.9 Dichte

3.9.1 Methodik

An dem Probenmaterial wurde die Feuchtdichte, die Trockenrohddichte und die Reindichte bei Trocknung der Probekörper bei 105°C und 0 % relativer Luftfeuchte sowie bei 25°C und ca. 32,5 % relativer Luftfeuchte ermittelt.

Die Feuchtdichte wurde aus den Abmessungen der zylindrischen Probekörper, aus denen das Volumen berechnet wurde, und der Feuchtmasse der jeweiligen Probe berechnet. Der Durchmesser und die Höhe der Probenzylinder wurden aus mindestens 10 Einzelmessungen je Probekörper mit einem Messschieber mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,1$ mm ermittelt. Die Feuchtmasse der Probekörper wurde über Wägung mit einer KERN-Waage PLS mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,001$ g ermittelt.

Die Trockendichte wurde auf der Basis der Feuchtdichte und der ermittelten Feuchtegehalte berechnet. Der für die Trockendichte angegebene Fehler wurde auf der Basis der Gaußschen

Fehlerfortpflanzung [AU16] bei zufälligen Fehlern für die eingehenden Parameter nach Gleichung (6) ermittelt.

$$\varepsilon_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \varepsilon_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \cdot \varepsilon_k\right)^2} \quad (6)$$

y f(x₁ ... x_k)
 ε Fehler der x-Werte

Die Proben für die Reindichteermittlung wurden nach der Trocknung bis zur Dichteermittlung in luftdicht verschließenden Wägegläschen gelagert. 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.

3.9.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der **Trockendichte**ermittlung sind in Tabelle 21, Spalte 6 (Abschnitt 3.12), zusammengestellt. Abbildung 46 stellt die Ergebnisse der Trockendichte in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe dar. In Tabelle 16 ist der Mittelwert für die beiden Trocknungsmethoden und die Anzahl der Einzelwerte angegeben.

Aus der Darstellung der Trockendichten in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe in Abbildung 46 wird deutlich, dass es über den jeweiligen Verlauf der Bohrungen B40, B41 und B44 keinen sichtbaren Trend gibt. Vor diesem Hintergrund wurden die Ergebnisse der Untersuchungen gemittelt. Die ermittelten Trockendichten sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Im Mittel wurde aus 22 Einzelproben bei 105°C Trocknung eine Trockendichte von 2,097 g/cm³ berechnet. Bei einer Trocknung bei 25°C und 32,5% relativer Luftfeuchte beträgt der Mittelwert aus 21 Proben 2,238 g/cm³.

Tabelle 16: Ergebnisse der Trockendichtebestimmung

Trocknung	Mittelwert [g/cm ³]	Standardabweichung [g/cm ³]	Minimum [g/cm ³]	Maximum [g/cm ³]	Anzahl Einzelwerte
105°C	2,097	0,023	2,055	2,134	22
25°C, 32,5 %	2,238	0,027	2,166	2,275	21

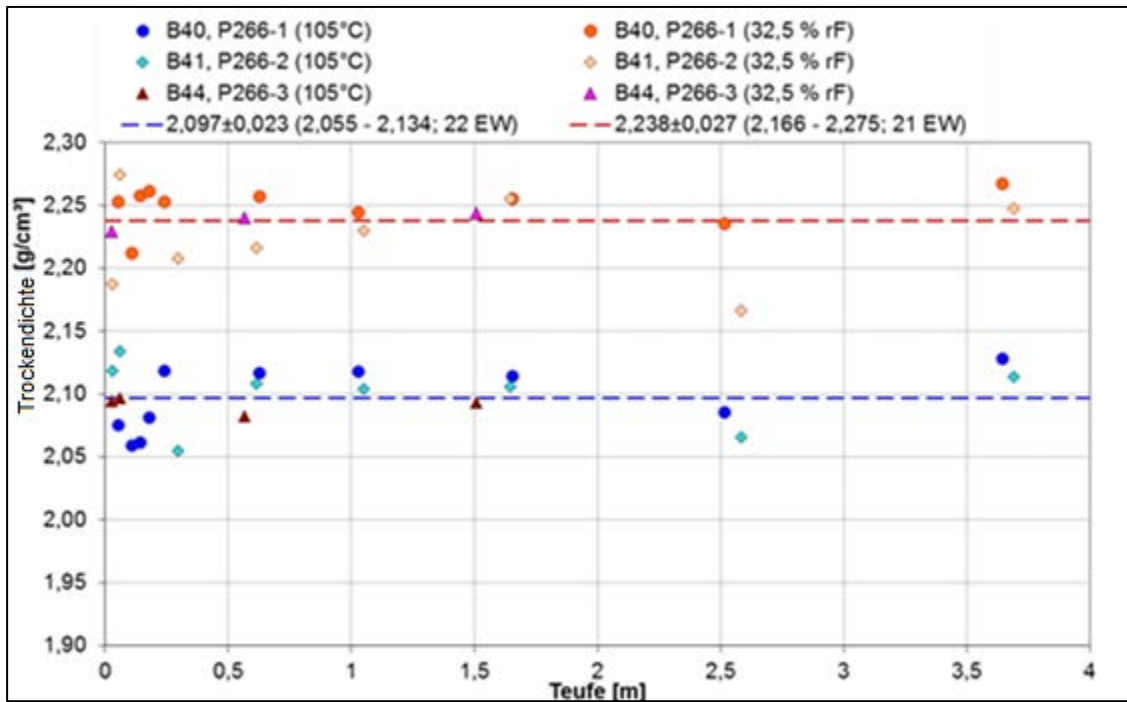


Abbildung 46: Trockendichte in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe mit unterschiedlichen Trocknungsmethoden bestimmt

Aus der Darstellung der **Reindichte** in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe in Abbildung 47 wird deutlich, dass es über den jeweiligen Verlauf der Bohrungen B40, B41 und B44 keinen sichtbaren Trend gibt. Vor diesem Hintergrund wurden die Ergebnisse der Untersuchungen gemittelt. Die gemittelten Reindichten sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Im Mittel wurde aus 4 Einzelproben bei 105°C Trocknung eine Reindichte von 2,482 g/cm³ berechnet. Bei einer Trocknung bei 25°C und 32,5 % relativer Luftfeuchte beträgt der Mittelwert aus 12 Proben 2,338 g/cm³.

Tabelle 17: Ergebnisse der Reindichtebestimmung

Trocknung	Mittelwert [g/cm ³]	Standardabweichung [g/cm ³]	Minimum [g/cm ³]	Maximum [g/cm ³]	Anzahl Einzelwerte
105°C	2,482	0,020	2,466	2,512	4
25°C, 32,5 %	2,338	0,025	2,282	2,381	12

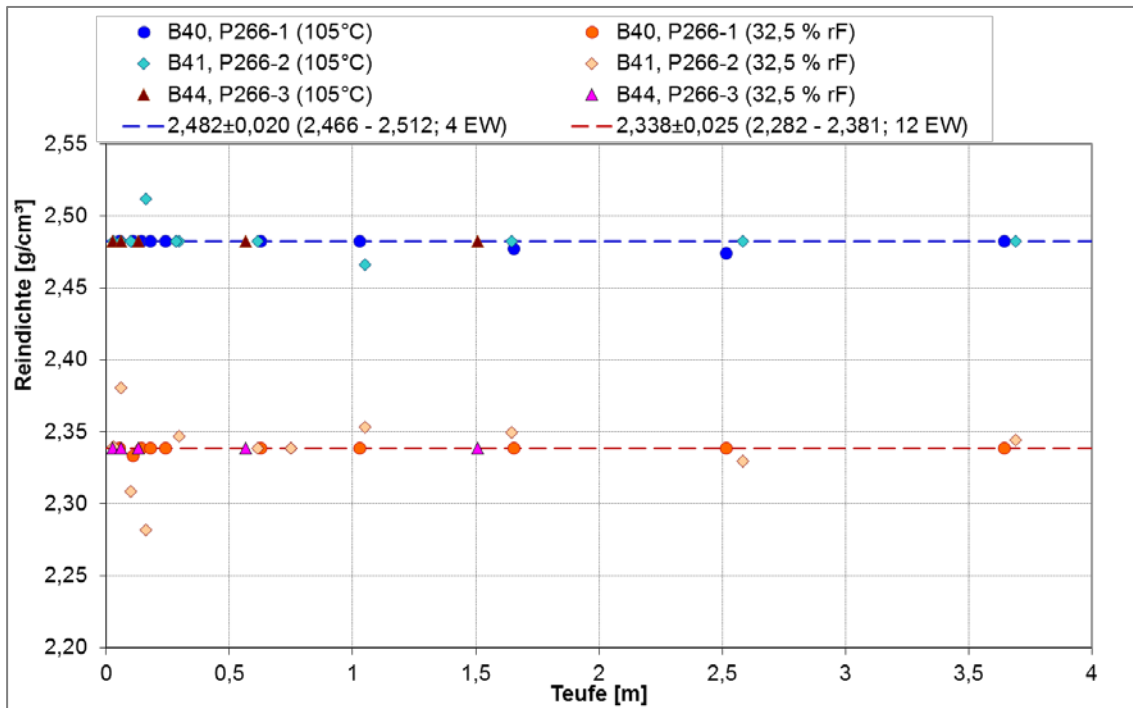


Abbildung 47: Reindichte in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe mit unterschiedlichen Trocknungsmethoden bestimmt

Die Dichte bei einer Trocknung bei 105°C stellt keinen realistischen Wert dar, da es hier zu einer Zersetzung der Bindemittelphase gekommen ist. Die bei 105°C bestimmte Trockendichte und Reindichte dient lediglich zu Vergleichszwecken mit früheren Daten bzw. anderen Daten für MgO-Baustoffe, welche in der Vergangenheit fälschlicherweise so bestimmt wurden.

3.10 Porosität

3.10.1 Methodik

3.10.1.1 Porosität aus Dichten

Die Porosität des verwendeten Magnesiabetons kann aus den ermittelten Dichten (s. Abschnitt 3.9) und aus den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie (s. Abschnitt 3.10.2.2) berechnet werden.

Auf der Grundlage der Rein- und Trockenrohddichte laut Tabelle 1, Spalte 5 und 6, kann die **totale Porosität** nach der Gleichung (7) berechnet werden.

$$n_t = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (7)$$

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 [AU16] unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der eingehenden Parameter der Fehler ermittelt (siehe Tabelle 21).

3.10.1.2 Quecksilberporosimetrie

Beim Quecksilberinjektionsversuch nach DIN 66133 [AU17] 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 (8) aus den Versuchsdaten eine Vorstellung über die Porengrößenverteilung abgeleitet werden.

$$p_{cap} = \frac{2 \cdot \sigma_{Hg-Luft} \cdot \cos \delta_{Hg-Luft}}{r} \quad (8)$$

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

Die Quecksilberporosimetrie ermöglicht, in Abhängigkeit von der Größe des eingesetzten Dilatometers, die quecksilberinjizierbare Porosität und die Porengrößenverteilung von Probekörpern 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:

1. 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.
2. 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.
3. 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 [AU18]. Die Auswertung geht meistens von zylindrischen Poren aus.

Die Spritzbetonproben der Rezeptur MB10 wurden mittels Quecksilberporosimetrie mit drei unterschiedlichen Porosimetern untersucht:

1. Porosimeter PASCAL 240 der Firma *Porotec GmbH*, Druck von ca. 200 MPa, messbarer Porendurchmesser von ca. 7,4 nm bis ca. 100 μm , TU Bergakademie Freiberg am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau.
2. Porosimeter AutoPore V9600 der Firma *Micromeritics*, Druck von ca. 420 MPa, messbarer Porendurchmesser von ca. 2 nm bis ca. 300 μm , TU Bergakademie Freiberg am Institut für Silikattechnik.

3. Porosimeter AutoPore V9600 1.03 der Firma *Micromeritics*, Druck von ca. 420 MPa, messbarer Porendurchmesser von ca. 2 nm bis ca. 700 µm, Micromeritics GmbH.

Ausgehend von den variablen Versuchsoptionen und den Materialeigenschaften wurde wie folgt untersucht: in den Untersuchungen sind folgende Effekte berücksichtigt und es wurde versucht, die Auswirkungen auf die quecksilberinjizierbare Porosität und die Porenhalsgrößenverteilung zu ermitteln:

1. Es wurde ein „Dilatometer mit kleinem Volumen“³ für Probengrößen bis ca. 7 mm Kantenlänge und ein Dilatometer mit der Bezeichnung CD6 für Probengrößen bis ca. 22 mm Kantenlänge verwendet.
2. Vergleichend wurde die Porosimeter PASCAL 240 und AutoPore V9600 verwendet, um den Porenanteil im Porengrößenbereich von ca. 100 µm bis ca. 700 µm zu erfassen.
3. Die Proben wurden mit zwei Methoden getrocknet (bei 105°C und bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$).
4. Es wurden Probenkörper gezielt aus dem Bereich der Betonierabschnittsgrenzen und aus dem Inneren einer Spritzbetonlage (= „massiver“ Baustoff) präpariert.
5. Die Änderung der Materialeigenschaften wurde über den Bohrungsverlauf bzw. den Abstand zur Ortsbrust beurteilt.

Der Schwerpunkt lag auf der Identifikation des Unterschiedes im Porenraum zwischen Proben aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen und Proben aus dem inneren einer Spritzbetonschicht. Aufgrund der bei der Quecksilberporosimetrie vorhandenen druckabhängigen Strömung des Quecksilbers im Porenraum wurde die Versuchsmethodik trotz der Spezifik der Versuchsbedingungen und trotz der nur kleinen Proben als aussagekräftig für die Bestimmung der Porengrößenverteilung angesehen.

Um die Porenstruktur im Bereich der Betonierabschnittsgrenzen zu beurteilen, wurde gezielt versucht, repräsentatives Probenmaterial für die unterschiedlich getrockneten Proben zu präparieren. Die Proben aus dem Bereich der Betonierabschnittsgrenzen wurden dafür als kleine Würfel mit der erforderlichen Kantenlänge aus dem Kernmaterial herausgeschnitten, wobei ein Dremel mit Miniaturtrennscheibe verwendet wurde. Die Proben des massiven Materials wurden aus dem Bruchmaterial von größeren Materialstücken gewonnen, wobei diese mit einem Hammer und leichten Schlägen zerkleinert wurden.

Für alle Proben wurde die Reindichte ermittelt (Abschnitt 3.9.2).

Die im kleinen Dilatometer untersuchten Proben hatten eine durchschnittliche Einwaage von 1,9 g. Im großen Dilatometer wurden Probenmengen von durchschnittlich 5,1 g untersucht.

Die Porosität bzw. die Porengrößenverteilung von porösen Materialien weist einen material-spezifischen Verlauf auf. Anhand dieses Verlaufes können Makro-, Meso- und Mikroporen differenziert werden. Wie die Beispiele in Tabelle 18 zeigen, werden die Porengrößenbereiche für Baustoffe in Abhängigkeit von der bearbeiteten Themenstellung unterschiedlich definiert. Vor diesem Hintergrund wird die Klassifizierung der Porengrößen probenbezogen in Auswertung der Anstiege der Regressionsgeraden an Teilabschnitten der Porengrößenverteilung entsprechend der beispielhaften Darstellung in Abbildung 48 angewendet [AU13]. Die Grenzen zwischen den Porenklassen werden durch die Schnittpunkte der Regressionsgeraden definiert (Abbildung 48).

³ Bezeichnung des Herstellers

Tabelle 18: Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe

1	2	3	4
Mikroporen	Mesoporen	Makroporen	Quelle
Gelporen	Kapillarporen		
[nm]		[nm]	[AU19]
< 30		> 30	
< 10		> 10	
mittlerer Durchmesser 1,8	-		
0,01 bis 100	100 bis 10^5	ab 10^5	[AU20]
0,5 bis 30	30 bis 10^5	10^5 bis 10^6	[AU21]
0,5 bis 50	50 bis 500		[AU22]
1 bis 10	10 bis 10^5	10^3 bis 10^6	
< 5	5 bis $5 \cdot 10^3$		[AU23]
1 bis 10	10 bis 10^5		

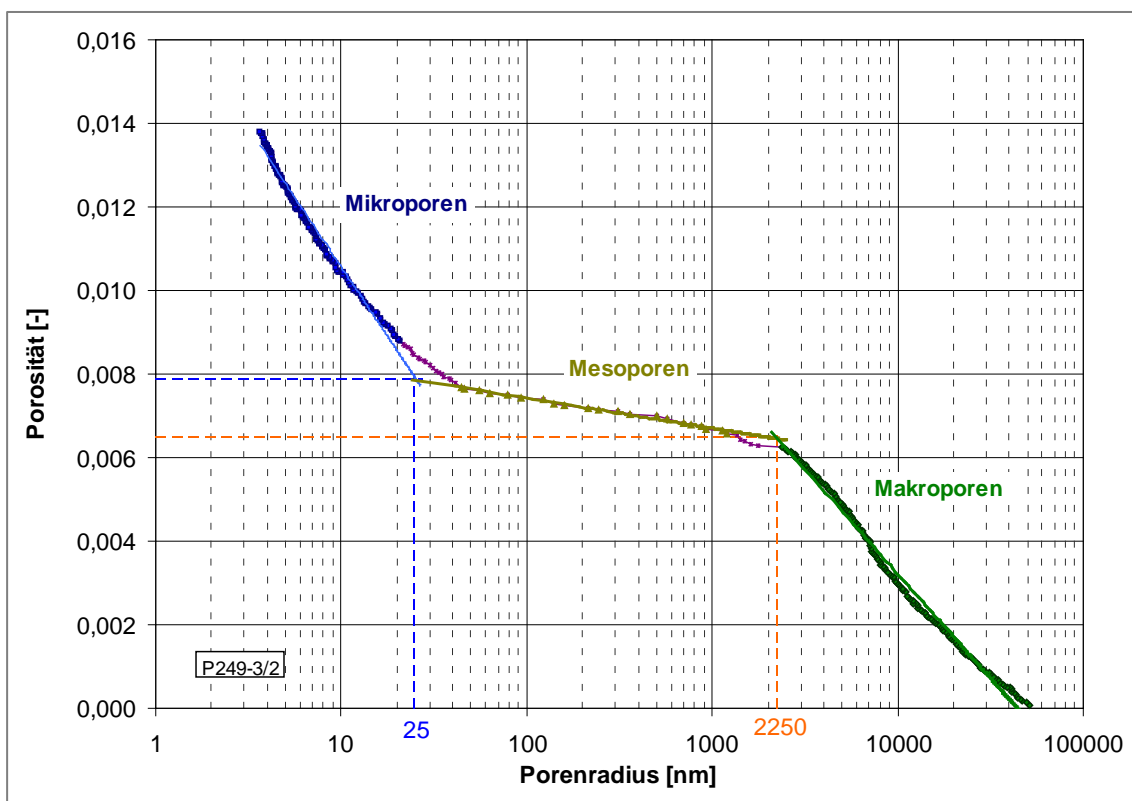


Abbildung 48: Vorgehensweise für die Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen laut [AU13]

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 Feuchtegehalt und dem Porengefüge wird daher prinzipiell die ermittelte Porosität und die Porengrößenverteilung durch die Trocknung beeinflusst.

Nachfolgend wird der Schwerpunkt auf die Ergebnisse der bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$ getrockneten Proben gelegt. Der Trocknungszustand wird als repräsentativ für den Trocknungszustand eines Bauwerkes unter in-situ-Bedingungen angenommen. Die ermittelte Gesamtporosität musste deshalb nicht um den Anteil der ausgefällten Komponenten korrigiert werden, da die Proben bereits vor der Trocknung weitgehend trocken waren.

3.10.2 Ergebnisse

3.10.2.1 Porosität aus Dichten

Es wurde nicht bei allen Proben die Reindichte bestimmt. In Tabelle 21, Spalte 5 ist die gemessene Reindichte angegeben. Bei den Proben, die mit einem Stern gekennzeichnet sind, wurde die Reindichte nicht gemessen, sondern der Mittelwert der Proben übernommen (siehe Zeile „Zusammenfassung“ in Tabelle 21 und Abschnitt 3.9.2 für die jeweilige Trocknungsmethodik).

Die an den Proben bei unterschiedlichen Trocknungsmethoden ermittelte Porosität, die aus der gemessenen Dichte berechnet wurde, ist in Tabelle 21, Spalte 8, enthalten. In Abbildung 49 ist die Porosität in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe aufgetragen. Des Weiteren ist Standardabweichung des Versuchsfehlers entsprechend der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung durch einen vertikalen Strich angegeben.

Wie auch die gemessene Dichte (siehe Abschnitt 3.9.2) so ist auch die ermittelte totale Porosität von der Trocknungsmethode abhängig. Auch die totale Porosität ist über die Bohrlochteufe nahezu konstant (siehe Abbildung 49). Die Messwerte der totalen Porosität wurden deshalb jeweils für die unterschiedlichen Trocknungsmethoden gemittelt. Die Mittelwerte und die Standardabweichung der totalen Porosität sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Der Mittelwert der Porosität, berechnet aus der Dichte, beträgt für die 22 Proben, die bei 105°C getrocknet wurden, 15,5 % und für die 21 Proben, die bei 25°C und 32,5 % relativer Luftfeuchte getrocknet wurden, 4,4 %.

Tabelle 19: Ergebnisse der Porositätsberechnung aus der Dichtemessung

Trocknung	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Minimum [%]	Maximum [%]	Anzahl Einzelwerte
105°C	15,5	1,0	14,0	17,2	22
25°C, 32,5 %	4,4	1,1	3,0	7,0	21

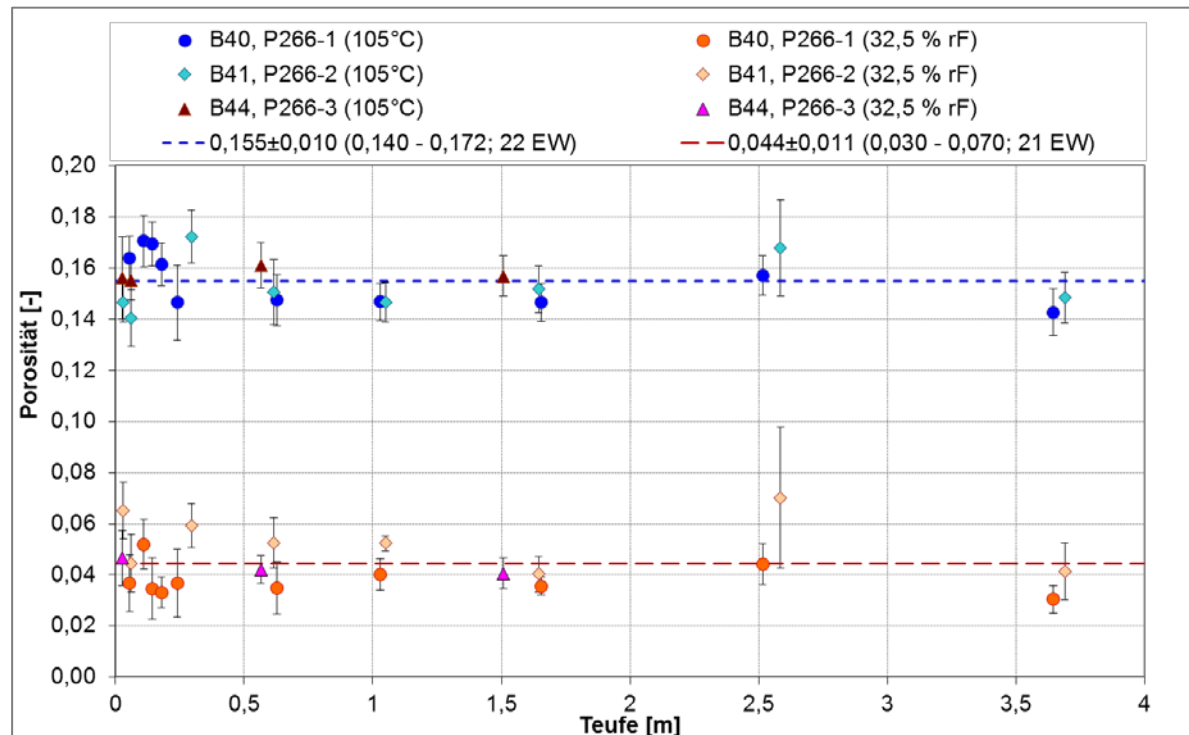


Abbildung 49: Berechnete totale Porosität in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe (für 105°C Trocknung und Trocknung bei 25°C bei 32,5% rel. Luftfeuchte)

3.10.2.2 Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie

Die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie sind in Tabelle 20 und in Tabelle 21, Spalte 9 zusammengefasst. Die ermittelte Porosität in Abhängigkeit des Porendurchmessers ist in Abbildung 50 dargestellt. Die Proben wurden

- a) bei 105°C und
- b) bei 25°C und 32,5 % relativer Luftfeuchtigkeit

getrocknet.

Die Proben wurden

- a) mit großem Dilatometer (gD) und
- b) mit kleinem Dilatometer (kD)

untersucht.

Bei den Proben wurden Proben aus

- a) dem Inneren einer Spritzschicht („massiv“) und
- b) aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen (BAG)

untersucht.

Tabelle 20: Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie

Probe- körperbe- zeichnung	Mate- rialbe- reich	Trock- nungs- methodik [°C/ %]	Dila- tome- ter	Porenradius [nm]		Porosität [%]			Hg-inji- zierbare Porosität
				min.	max.	Mikro- poren	Meso- poren	Makro- poren	
P266-1/10	massiv	25/ 32,5	kD	3,7	52700	2,7	0,6	0,8	4,1
P266-2/9	massiv		kD	3,7	52250	3,2	0,7	0,6	4,6
P266-2/12	massiv		gD	3,7	42050	2,3	0,8	0,7	3,7
P266-2/15	BAG		gD	4,0	35150	3,9	1,0	0,8	5,7
P266-2/18	massiv		kD	3,7	50150	2,5	1,0	1,0	4,4
P266-2/24	massiv		kD	3,7	52750	2,3	0,7	0,4	3,4
P266-2/33	massiv		gD	3,7	46200	2,5	0,1	0,9	3,6
P266-2/41	massiv		kD	3,7	56700	3,8	1,5	0,4	5,6
P266-2/52	BAG		gD	3,7	45200	1,7	2,5	1,3	5,6
P266-2/6	BAG		kD	3,7	45700	1,6	1,4	0,3	3,3
P266-2/27	BAG		kD	3,7	53150	3,6	0,9	0,5	5,1
P266-2/30	BAG		kD	3,7	52550	2,4	1,0	0,6	4,0
P266-2/25	massiv		105/ 0	kD	3,8	54000	2,9	2,2	0,4
P266-2/16	massiv	gD		3,8	55650	4,6	2,8	3,1	10,4
P266-2/28	massiv	gD		3,9	52050	2,1	2,1	5,1	9,4
P266-2/31	massiv	gD		3,9	54650	0,5	4,9	7,3	12,7
P266-2/6 (300µm)	BAG	25/ 32,5	kD	1,8	144950	4,1	1,0	1,5	6,6
P266-2/6 (900µm)	massiv		gD	1,5	399150	0,007	0,034	0,051	9,3
P266-2/24 (300µm)	massiv		kD	1,8	144950	3,5	1,0	1,3	5,9
P266-2/30 (300µm)	BAG		kD	1,8	144950	2,7	1,0	1,5	5,2
P266-2/30 (900µm)	massiv		gD	1,5	399150	0,017	0,039	0,002	5,9

kD = kleines Dilatometer

gD = großes Dilatometer

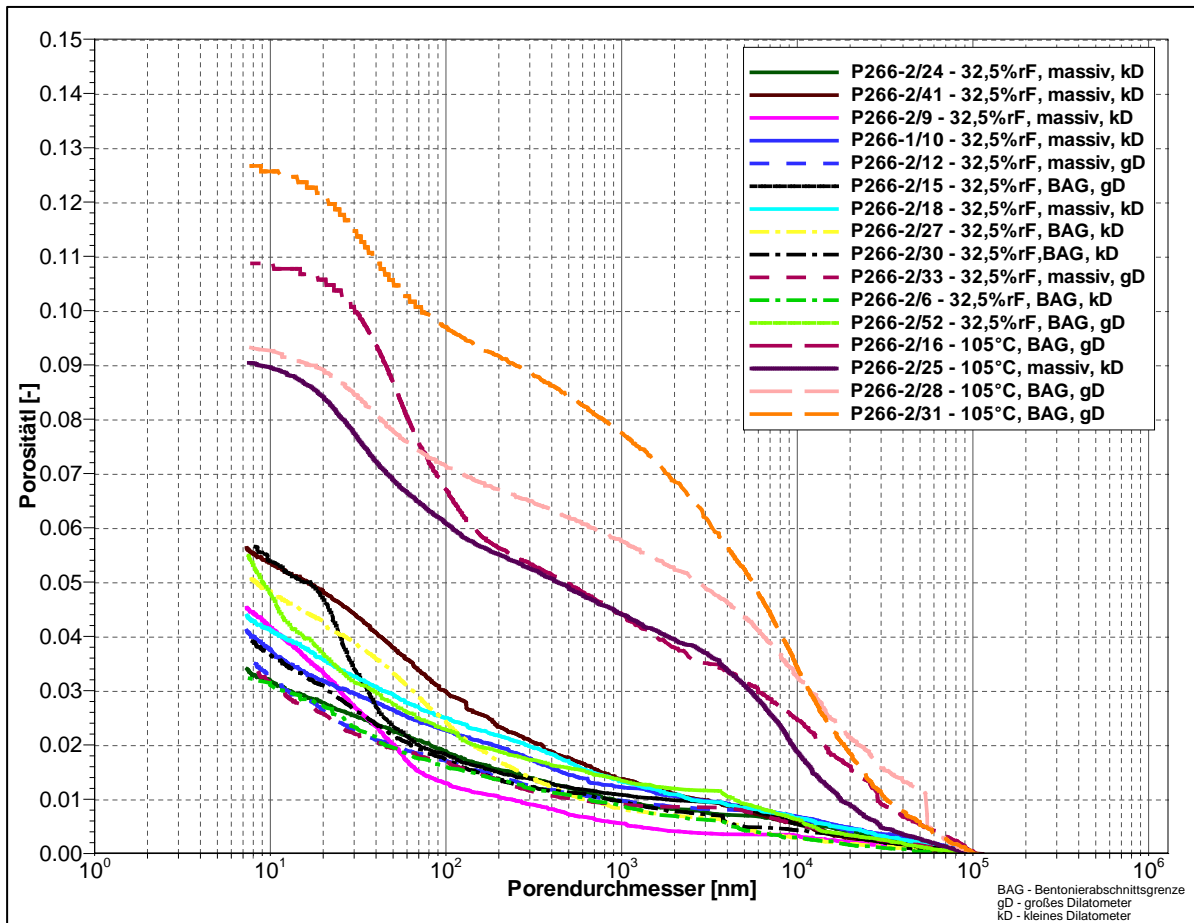


Abbildung 50: Totale Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für beide Trocknungsmethoden und Porendurchmesser bis 100 μm

In Abbildung 51 ist der Porenvolumenanteil in Abhängigkeit des Porendurchmessers dargestellt. Der Porenvolumenanteil berechnet sich aus der Porosität, bezogen auf den Endwert der Porosität von etwa 6 nm bis 8 nm, der der Abbildung 50 entnommen werden kann.

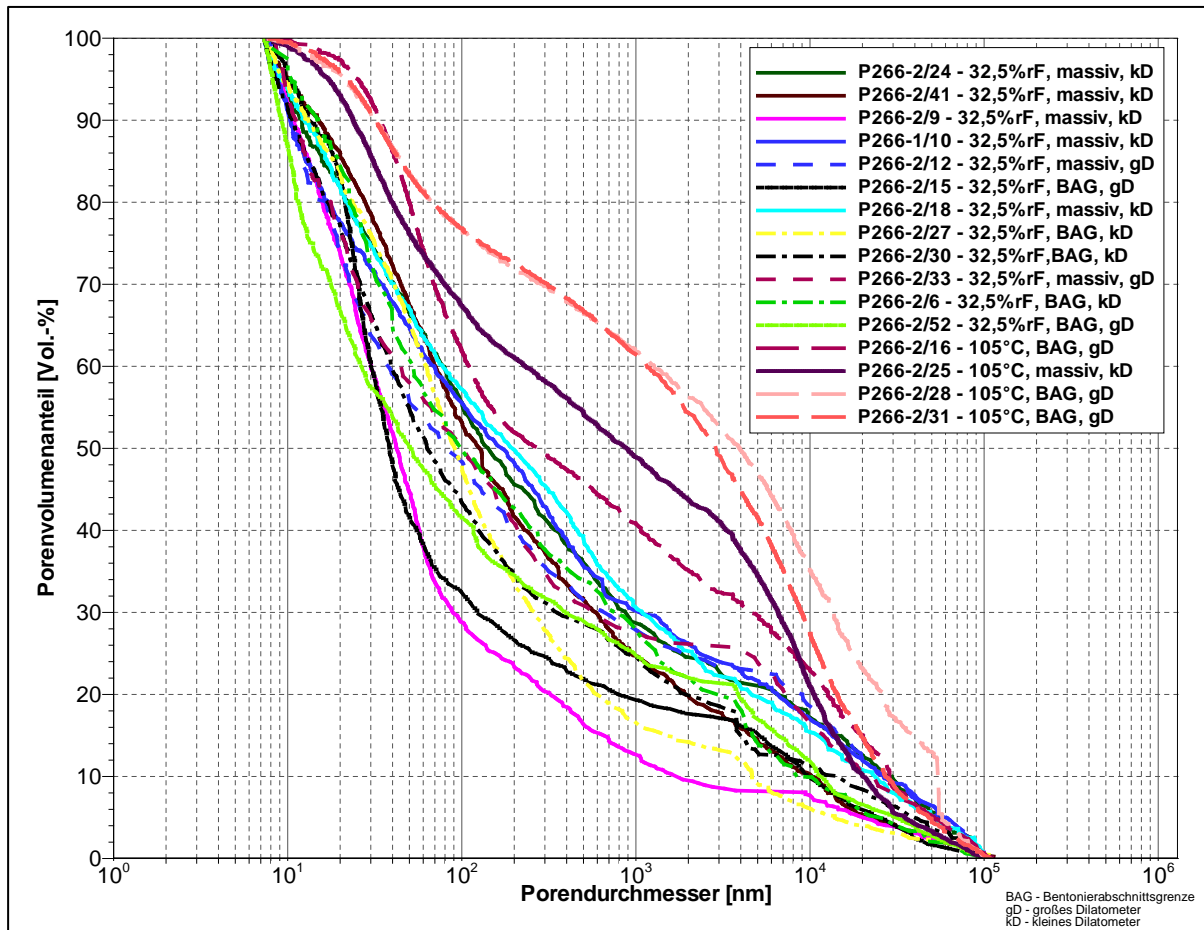


Abbildung 51: Porenvolumenanteil in Abhängigkeit des Porendurchmessers – Ergebnisse der Untersuchungen für beide Trocknungsmethoden und Porendurchmesser bis 100 μm

Einfluss Trocknungsmethodik

In Abbildung 52 ist die Porosität aller untersuchten Proben bis zu einem Porendurchmesser von ca. 100 μm (10^5 nm) für beide Trocknungsmethoden dargestellt.

Im Ergebnis der Trocknung bei 105°C wird die Bindemittelphase thermisch zersetzt, was zu Änderungen im Kristallgefüge mit einer deutlichen Veränderung der Porengrößenverteilung und einer Erhöhung der Gesamtporosität führt. Die Hg-injizierbare (totale) Porosität der bei 105°C getrockneten Proben ist mit $10,4 \pm 1,6$ % (9,1 % - 12,7 %) nahezu doppelt so groß wie die mittlere Porosität der bei ca. 25°C und ca. 32,5 % F_R getrockneten Proben mit $4,4 \pm 0,9$ % (3,3 % - 5,7 %) (siehe Tabelle 20). Mit einer Trocknung bei 105°C wird die Porosität daher nicht zutreffend ermittelt. Daher wurde für die weiteren Untersuchungen ausschließlich der bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5$ % getrocknete MgO-Beton verwendet.

Tendenziell ist die mit dem großen Dilatometer bestimmte Porosität etwas höher als die mit dem kleinen Dilatometer.

Einfluss Probenvolumen / Größe Dilatometer

In Abbildung 52 ist die Porosität in Abhängigkeit des Porendurchmessers von bei 25°C Umgebungstemperatur und ca. $F_R = 32,5\%$ getrockneten Proben dargestellt, die mit unterschiedlichem Probenvolumen in unterschiedlich großen Dilatometern untersucht wurden. Aufgrund der relativ großen Partikel im MgO-Beton mit Zuschlag bis 8 mm bestand die Gefahr, dass bei kleinen Dilatometern, in denen nur Probenwürfel mit 7 mm Kantenlänge verwendet werden können, das Ergebnis durch den groben Zuschlag bis 8 mm beeinflusst sein kann. Daher wurden Proben in Dilatometern für Proben mit einer maximalen Kantenlänge von ca. 7 mm und in Dilatometern für Proben mit einer maximalen Kantenlänge von ca. 22 mm untersucht. Die Darstellung der Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser in Abbildung 52 gibt keinen Hinweis auf einen Einfluss der Probengröße bzw. Dilatometergröße auf die Porengrößenverteilung. Die Kurven zeigen eine generelle Streuung der Porengrößenverteilung, die mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Materialheterogenität zurückzuführen ist.

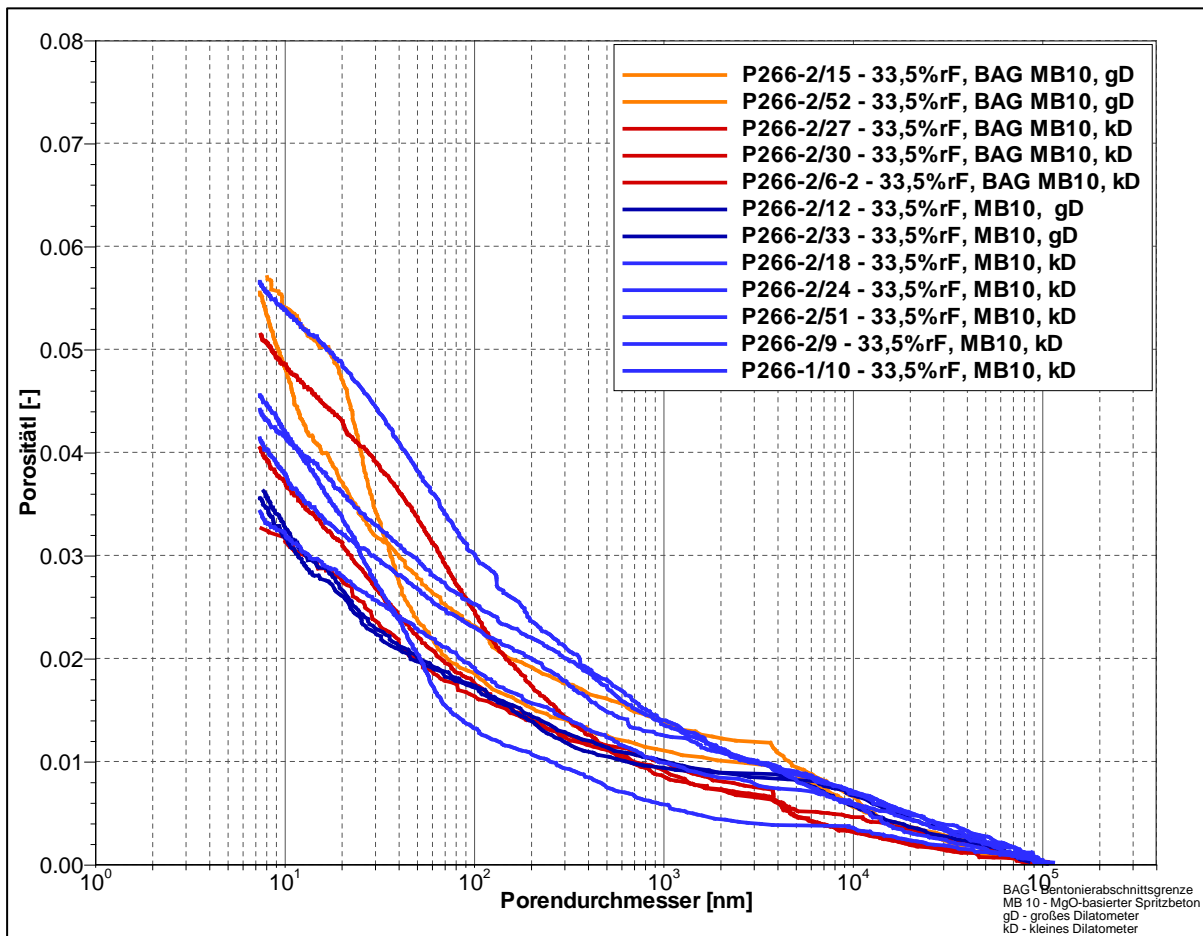


Abbildung 52: Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für die Trocknung bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$ für große (gD, blau) und kleine (kD, rot) Dilatometer

Unterscheidung Betonierabschnittsgrenzen / massiver Baustoff

Bedingt durch die Einbautechnologie besteht der Dammkörper aus vertikalen Spritzbetonlagen, deren Kontaktbereiche in Abhängigkeit von der Anbindung der aufeinander folgenden Lagen potentielle Strömungswegsamkeiten darstellen können. In der Kernaufnahme (Abschnitt 3.1 und 3.5) und den Kamerabefahrungen wurden in diesen Kontaktbereichen Hinweise auf eventuell vorhandene Wegsamkeiten entlang dieser Betonierabschnittsgrenzen erkannt. Das Wort „eventuell“ wird hier verwendet, da die Kernaufnahme subjektiv beeinflusst

sein kann und die Kamerabefahrung nur eine „indirekte“ Methode zur Untersuchung der Proben ist. Im Rahmen der Untersuchungen zur Porosität wurden deshalb, Probenkörper aus Bereichen mit Betonierabschnittsgrenzen (BAG) und Probenkörper aus dem Inneren einer Spritzschicht („massiver“ Baustoff) präpariert, und diese auf den Zusammenhang von Porosität und Porendurchmesser untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurden ausschließlich Proben aus der Trocknung bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$ verwendet. Die im Ergebnis ermittelte Porosität in Abhängigkeit von Porendurchmesser ist Abbildung 52 dargestellt. Alle Proben, bei den nicht „BAG“ vermerkt ist, stammen aus dem Inneren einer Spritzschicht. Die ermittelte Porosität für Poren zwischen etwa 7 nm und 100 µm schwankt zwischen 3,6 % und 5,6 %. Die Porosität ist damit sehr gering. **Zudem ist aus der Kurvenschar kein Einfluss der Betonierabschnittsgrenzen auf die Porengrößenverteilung zu erkennen.** Die Porosität an den Proben aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen liegt in der gleichen Größenordnung wie die Porosität von Proben aus dem Inneren einer Spritzbetonschicht. Dies gilt zumindest für die Untersuchungen mit dem kleinen Dilatometer. Zukünftige Proben sollten eher mit dem großen Dilatometer untersucht werden, da hier die Streuung der Ergebnisse etwas kleiner ist. Allerdings konnten nur jeweils 2 Proben aus dem Bereich mit einer Betonierabschnittsgrenze und aus dem Inneren einer Spritzschicht untersucht werden. Es wird vermutet, dass folgende Ursachen in Frage kommen, warum kein Unterschied in der Porosität an Proben aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen und an Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht festgestellt wurden:

1. Es gibt keinen Unterschied in der Porositätsverteilung zwischen Proben aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen und Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht. Die Heterogenität der Poren im Kontaktbereich zweier Spritzbetonlagen liegt in der Größenordnung der Heterogenität des Spritzbetons aus dem Inneren einer Spritzschicht. Ein Einfluss auf die Porengrößenverteilung ist daher nicht nachweisbar.
2. Trotz der gezielt präparierten Proben aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen ist der Porenraumanteil des unmittelbaren Kontaktes an der Gesamtporosität für eine nachweisbare Beeinflussung des Zusammenhangs von Porosität und Porendurchmesser zu gering.
3. Die in den Betonierabschnittsgrenzen vorhandenen Poren besitzen Porendurchmesser > 100 µm und werden daher in der angewendeten Versuchsmethodik nicht erfasst. Dies wird durch die Beobachtungen an dem Kernmaterial unterstützt. Lokal sind Kontaktbereiche Poren bis 1 mm erkennbar. Diese werden für das angewendete Porosimeter und die darin umgesetzte Versuchskonfiguration nicht erfasst.
4. In einem Kontaktbereich zwischen zwei angebondenen Betonierschichten könnte die Porosität im Ergebnis des Spritzvorgangs geringer als im Inneren einer Betonierschicht sein. Aufgrund des verstärkten Rückpralls am Beginn des Auftrags der nächsten Betonierschicht reichert sich MgO-Suspension beim Spritzvorgang an der Grenzfläche an. Dies könnte zu einer lokal geringeren, jedoch nicht messbaren Porosität führen.

Größe und Anteil Makroporen / Auswahl Porosimeter

Es ist davon auszugehen, dass eine Strömung im Baustoff in den größten vernetzten Poren verläuft. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, den Anteil an Makroporen festzustellen. Um diesen Anteil zu ermitteln, wurden entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 3.10.1.2 vergleichende Untersuchungen mit unterschiedlichen Porosimetern durchgeführt. In Abhängigkeit von der in den Geräten umgesetzten Versuchsmethodik variiert der erfassbare maximale Porendurchmesser mit den Porosimetern. Folgende Porosimeter wurden eingesetzt:

1. Porosimeter PASCAL 240 der Firma Porotec GmbH, maximaler Porendurchmesser: 100 µm – in Abbildung 53 bezeichnet als „PASCAL 240 – 100 µm“,
2. Porosimeter AutoPore V9600 der Firma Micromeritics, maximaler Porendurchmesser: ca. 300 µm – in Abbildung 53 bezeichnet als „V9600 – 300 µm“,
3. Porosimeter AutoPore V9600 1.03 der Firma Micromeritics, maximaler Porendurchmesser: ca. 900 µm – in Abbildung 53 bezeichnet als „V9600 – 900 µm“.

Die ermittelte Porosität in Abhängigkeit des Porendurchmessers ist in Abbildung 53 dargestellt. Aus Abbildung 53 können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die mit dem AutoPor V9600 – 300 μm ermittelten Porengrößenverteilungen ordnen sich im Wesentlichen gut in den generellen Verlauf der Porengrößenverteilungen mit dem Porosimeter PASCAL 240 ein.
- Die Untersuchungen weisen einen Porositätsanteil im Bereich von ca. 100 μm bis ca. 300 μm in der Größenordnung von 0,5 % nach.
- Mit dem Porosimeter V9600 – 900 μm wurde an zwei untersuchten Proben eine Porosität von 0,5 % und 4,5 % im Porenbereich von ca. 300 μm bis ca. 900 μm festgestellt. Das Porosimeter AutoPor V9600 - 900 μm arbeitet mit einem maximalen Quecksilberdruck von bis zu 420 MPa. Dadurch wird ein höherer Anteil an Mikroporen erfasst. In der Folge kommt es zu einer Erhöhung der quecksilberinjizierbaren Porosität für die in diesem Porosimeter untersuchten Proben. Dieser große Wertebereich kann aufgrund des höheren maximalen Quecksilberdruckes bei den anderen beiden Porosimetern und aufgrund der geringen Probenanzahl nicht als repräsentativ angesehen werden.

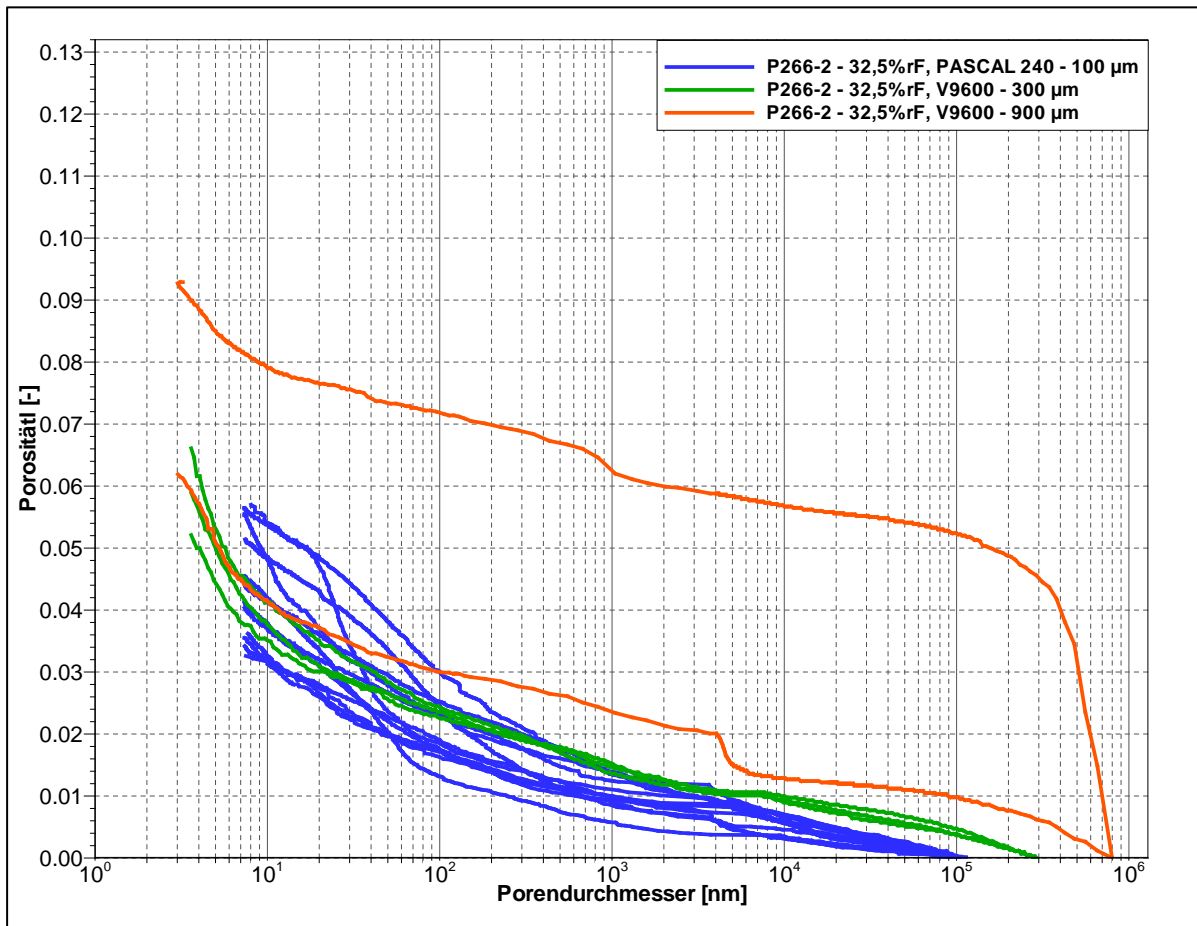


Abbildung 53: Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für Trocknung bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$ sowie maximale Porendurchmesser bis 100 μm , bis 300 μm und bis 900 μm .

Die Ergebnisse zeigen, dass in dem MgO-Spritzbeton Makroporen bis zu einem Porendurchmesser von 900 μm vorhanden sind. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Erläuterungen und den prozesstheoretischen Grundlagen der Strömungsprozesse in dem Material ist davon auszugehen, dass diese Makroporen einen bestimmenden Einfluss auf die

Strömungsprozesse haben. Ihr Anteil ist allerdings sehr gering. Die Untersuchungen zur Ermittlung der Porengrößenverteilung im Inneren von Spritzbetonschichten und im Bereich von Betonierabschnittsgrenzen und im Kontakt zum Gebirge sollten daher vertieft und erweitert werden.

Porosität in Abhängigkeit der Teufe

In Abbildung 54 sind alle Porositäten – ermittelt aus den Dichten und aus der Quecksilberporosimetrie – in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe, von der Trocknungsmethode und in Abhängigkeit vom verwendeten Porosimeter dargestellt. Alle Porositäten, bei denen nicht „aus Hg“ vermerkt ist, wurden aus der Dichtemessungen berechnet. In Abbildung 54 ist zudem durch einen vertikalen Strich die Standardabweichung des Versuchsfehlers, berechnet aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung angegeben.

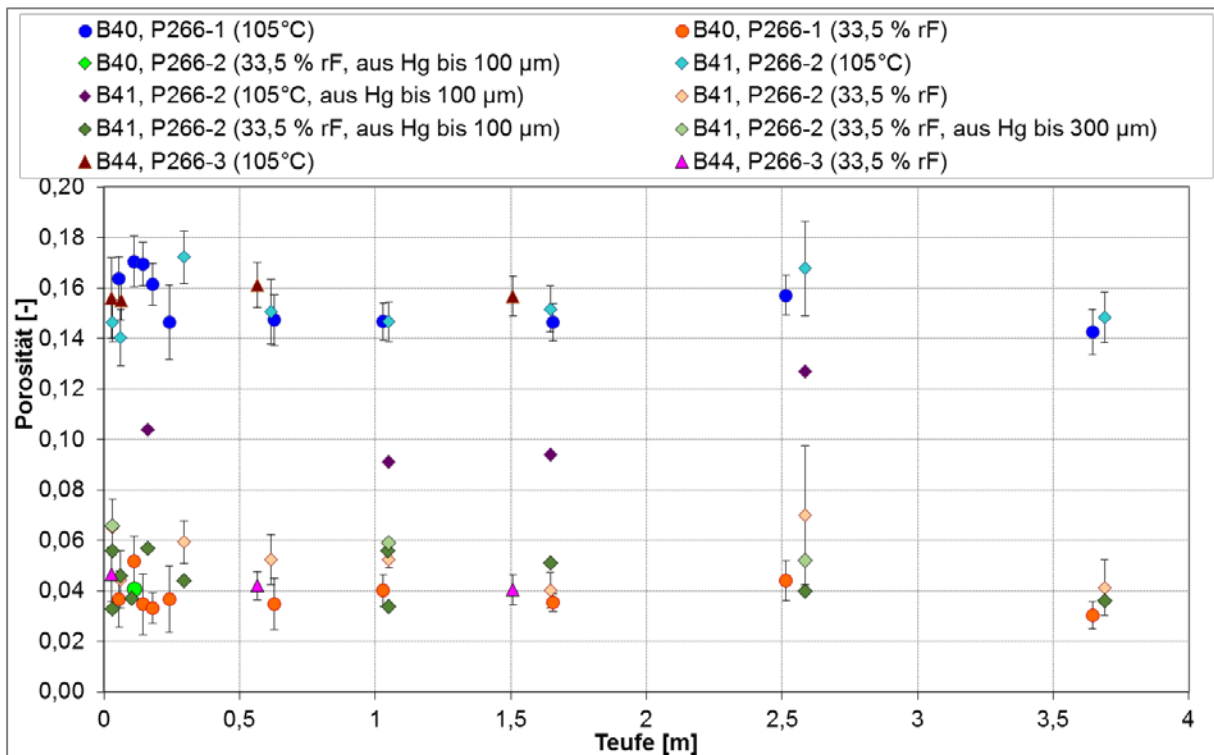


Abbildung 54: Porosität aus Dichten und Hg-Porosimetrie in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe bei unterschiedlichen Trocknungsmethoden

Die Porosität ändert sich über die Bohrlochteufe und damit über die Mächtigkeit von etwa 40 Spritzbetonlagen mit ca. 10 cm Dicke nicht. Dies gilt sowohl für die untersuchten Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht als auch für die Proben aus dem Bereichen von Betonierabschnittsgrenzen.

Aus Abbildung 54 wird deutlich, dass für die bei 105°C getrockneten Proben die totale Porosität aus der Dichteberechnung [B41,P266-2(105°C)] höher ist als die mit der Quecksilberporosimetrie ermittelte totale Porosität [P41,P266-2 (105°C, aus Hg bis 100 µm)]. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird bei der Quecksilberporosimetrie durch die Druckbegrenzung im Rahmen der Versuchsdurchführung ($p_{\max} \approx 200$ MPa) nicht der komplette Porenraum mit Quecksilber erschlossen, wohingegen bei der Bestimmung der totalen Porosität aus der Dichte theoretisch der gesamte Porenraum (auch der „Totporenraum“) erfasst wird.

Für die bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5$ % getrockneten Proben ist aus den vorliegenden Ergebnissen kein deutlicher Unterschied zwischen der totalen Porosität, ermittelt aus den

Dichten [B44,266-2(33,5 % rF)] und der Quecksilberporosimetrie [B41,P266-2(33,5 % rF, aus Hg bis 300 µm)] ersichtlich.

Der entscheidende Unterschied in der gemessenen Porosität liegt in der Trocknungsmethode (105°C oder 25°C und $F_R = 32,5\%$). Bei gleicher Trocknungsmethode konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der totalen Porosität, ermittelt aus der Dichtemessung oder ermittelt aus der Quecksilberporosimetrie bis 100 µm oder ermittelt bis 300 µm festgestellt werden. Damit ist zu vermuten, dass der Porenanteil mit Poren größer als 100 µm bzw. 300 µm sehr klein ist.

3.11 Porenraumsättigung

3.11.1 Methodik

Auf der Basis der aus der Dichte ermittelten Porosität (Abschnitt 3.10.2) und des Feuchtegehaltes (Abschnitt 3.8.2) wurde die Porenraumsättigung mit Flüssigkeit nach Gleichung (9) ermittelt:

$$S = \frac{w_L \cdot \rho_d}{\rho_L \cdot n_t} \quad (9)$$

S	-	Sättigung des Porenraumes	[-]
n_t	-	totale Porosität	[-]
ρ_d	-	Trockenrohddichte	[g/cm ³]
ρ_L	-	Dichte der Porenraumflüssigkeit	[g/cm ³]
w_L	-	Lösungsgehalt	[-]

Die Dichte ρ_L der Porenraumflüssigkeit wurde mit 1,33 g/cm³ berücksichtigt. Für die Sättigung wurde der Fehler auf der Basis der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung [AU16] berechnet.

3.11.2 Ergebnisse

Die ermittelte Sättigung ist in Abschnitt 3.12, Tabelle 21, Spalte 10, zusammengestellt. Die tiefenabhängige Auftragung der Sättigung für die drei Bohrungen ist in Abbildung 55 dargestellt.

Der Einfluss der unterschiedlichen Trocknungsmethoden und die Erfassung der hydratrelevanten Wasseranteile bei 105°C Trocknung für berechnete Sättigung wird aus Abbildung 55 besonders deutlich. Für Proben, die bei 105°C getrocknet wurden, wird eine mittlere Sättigung von 66,9 % ± 4,3 % (Spannweite 60,2 % - 76,4 % bei 22 Einzelwerten) errechnet.

Für die Trocknung bei ca. 25°C und ca. 32,5 % relativer Luftfeuchte ergibt sich eine mittlere Sättigung von 2,0 % ± 1,0 % (Spannweite 2,0 % - 3,0 % bei 4 Einzelwerten). Der Magnesia-beton (GV2, 5-1-8 Rezeptur) kann unter diesen Bedingungen als weitgehend trocken angesehen werden, wie schon aus den Versuchen zur Bestimmung des Feuchtegehaltes in Abschnitt 3.8 hervorgeht und bereits in Abschnitt 3.3 anhand der Rezeptur und Bindemittelphasenbildung beschrieben ist.

Es ist davon auszugehen, dass das gesamte Porenvolumen gaserfüllt ist („trockener“ Baustoff). Zusätzlich wird von einer Kapillarkondensation von Feuchtigkeit im Porenraum direkt an der Oberfläche (Ortsbrust) ausgegangen, soweit Feuchtigkeit durch die relative Luftfeuchtigkeit angeboten wird. Im Falle der Anströmung von Lösung ist, beginnend mit den kleinsten Poren, von einer Aufsättigung des Porenraumes auszugehen. Die sich dabei einstellende Restgassättigung in den Poren ist vermutlich stark von der Lösungspermeabilität des Magnesiabetons und der Verteilung der strömungswirksamen Poren im Magnesiabeton abhängig.

Unter Berücksichtigung der Überlegungen zu den Ergebnissen der Trocknung bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$ führen die Ergebnisse der Trocknung bei 105°C zu einer vollständig anderen Einschätzung (= falsche Einschätzung) der Sättigungssituation des Baustoffes und in der Folge der Strömungsprozesse im MgO-Beton. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Strömung von Gas und Flüssigkeit maßgeblich von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit bestimmt wird. Für den nahezu trockenen Baustoff mit einem gaserfüllten Porenraum ist von einer unbehinderten Gasströmung auszugehen. Die für diesen Zustand ermittelte Gaspermeabilität kann daher als absolute Permeabilität des Baustoffes angesehen werden. Mit zunehmender Flüssigkeitssättigung des Materials reduziert sich die Gaspermeabilität und die Flüssigkeitspermeabilität erhöht sich. Gleichzeitig sind für die Flüssigkeitsströmung die einsetzenden Sekundärreaktionen und Kristallisationsvorgänge zu berücksichtigen. Theoretisch erhöht sich mit zunehmender Flüssigkeitssättigung die effektive Flüssigkeitspermeabilität. Gleichzeitig reduziert sich in Folge der einsetzenden Sekundärreaktionen und Kristallisationsvorgänge die Permeabilität. Diese sich überlagernden Prozesse machen es erforderlich, das Material möglichst weitgehend aufzusättigen und den Einfluss der Reaktions- und Kristallisationsprozesse abzuwarten. Für Durchströmungsversuche und die Ermittlung der Flüssigkeitspermeabilität – sowohl im Labor als auch in-situ – führt dies zu langen Versuchszeiten. Das Versuchsregime muss angepasst werden, um die einflussnehmenden Prozesse zu identifizieren.

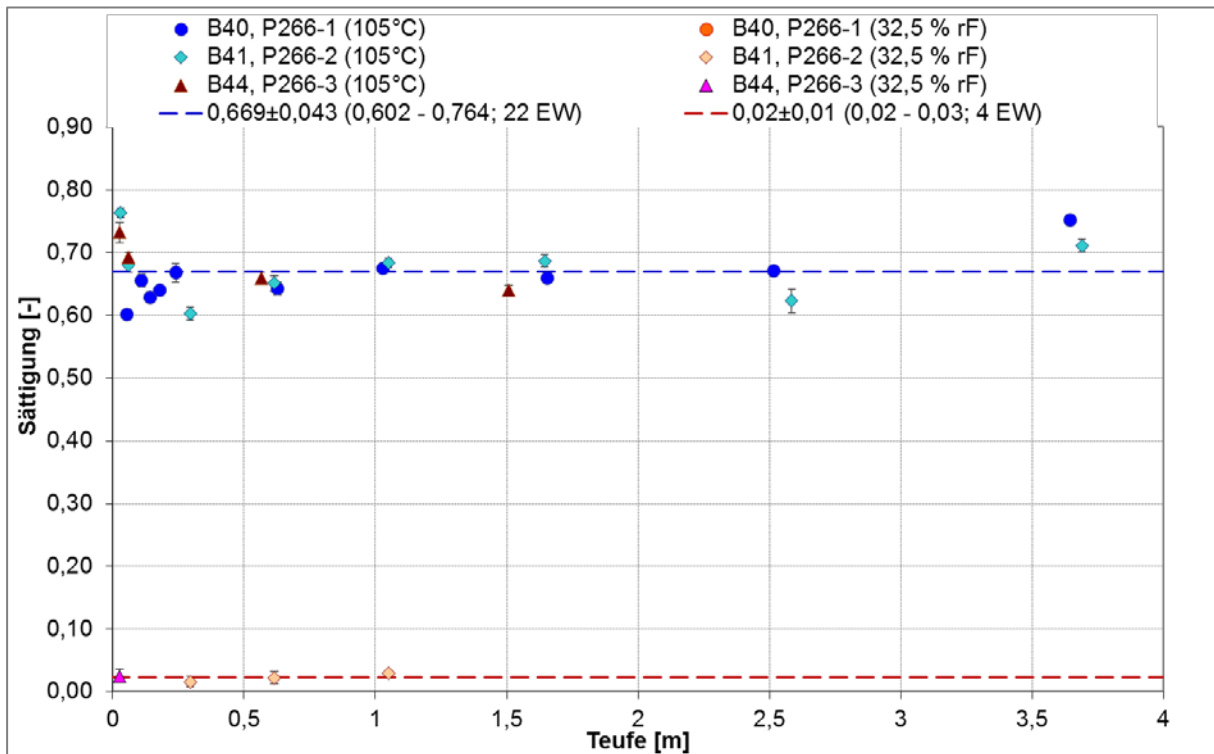


Abbildung 55: Berechnete Sättigung in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe (aus unterschiedlichen Trocknungsmethoden resultierend)

3.12 Ergebnisübersicht zu den Abschnitten 3.8 bis 3.11

Die Ergebnisse der in den Abschnitten 3.8 bis 3.11 beschriebenen Untersuchungen zur Bestimmung der strömungstechnischen Parameter an Bohrkernmaterial aus dem GV2 (Bohrungen B40, B41 und B44 (Kapitel 3.1)) sind in einer Gesamtübersicht in Tabelle 21 zusammengefasst.

Diese beinhaltet Daten zu:

- Trocknungsmethode
- Dichte (Trockendichte und Reindichte)
- Lösungsgehalt
- Porosität (ermittelt aus der Dichte und aus der Quecksilberporosimetrie)
- Porenraumsättigung

Der Lösungsgehalt und die Dichte wurden bestimmt, indem die Proben bei 105°C (0 % relative Luftfeuchte) und bei „Umgebungstemperatur“ und einer relativen Luftfeuchte von ca. 32,5 % getrocknet wurden. Als „Umgebungstemperatur“ wurden 25°C angenommen. Die Trocknung bei 25°C bei ca. 32,5 % rF wird als repräsentativ für die grubenklimatischen Bedingungen in einem Kalisalzbergwerk angesehen. Bei 105°C und $F_R = 0$ % setzt die thermische Zersetzung der Bindemittelphase ein.

Tabelle 21: Übersicht zu den Ergebnissen der Laboruntersuchungen des GV2-Bohrkernmaterials

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bohrung	Probe	Teufe	Trocknung	Reindichte	Trockendichte	Lösungsgehalt	Porosität aus Dichte	Porosität aus Hg-Porosimetrie bis 100 µm / bis 300 µm	Sättigung
		[m]		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[%]
B40	P266-1/6	0,04 - 0,07	Umgebungstemperatur, F _R = 32,5 %	2,338±0,006*	2,253±0,025	-0,33±<0,02**	4,1±1,1		
	P266-1/10	0,10 - 0,13		2,333±0,006	2,212±0,022	-0,34±<0,02**	5,2±1,0	4,1 / -	**
	P266-1/12	0,13 - 0,16		2,338±0,006*	2,257±0,028	-0,57±<0,02**	3,9±1,2		**
	P266-1/15	0,16 - 0,19		2,338±0,006*	2,261±0,013	-0,41±<0,02**	3,7±0,6		**
	P266-1/18	0,23 - 0,26		2,338±0,006*	2,252±0,030	-0,53±<0,02**	4,1±1,3		**
	P266-1/21	0,61 - 0,64		2,338±0,006*	2,257±0,023	-0,17±<0,02**	3,9±1,0		**
	P266-1/24	1,01 - 1,05		2,338±0,006*	2,245±0,013	-0,21±<0,02**	4,4±0,6		**
	P266-1/27	1,64 - 1,67		2,338±0,006*	2,255±0,006	-0,15±<0,02**	4,0±0,4		**
	P266-1/30	2,50 - 2,53		2,338±0,006*	2,235±0,018	-0,59±<0,02**	4,8±0,8		**
	P266-1/33	3,63 - 3,66		2,338±0,006*	2,267±0,011	-0,53±<0,02**	3,5±0,5		**
B41	P266-2/6	0,02 - 0,05		2,340±0,006	2,187±0,026	-0,40±<0,02**	6,5±1,1	3,3 / 6,6	**
	P266-2/9	0,05 - 0,08		2,381±0,006	2,275±0,026	-0,38±<0,02**	4,5±1,1	4,6 / -	**
	P266-2/12	0,09 - 0,12		2,309±0,006	n.b.	-0,51±<0,02**	n.b.	3,7 / -	n.b.
	P266-2/15	0,15 - 0,18		2,282±0,006	n.b.	-0,69±<0,02**	n.b.	5,7 / -	n.b.
	P266-2/18	0,28 - 0,31		2,347±0,006	2,208±0,019	0,06±<0,02	5,9±0,9	4,4 / -	1,6±0,2
	P266-2/21	0,60 - 0,63		2,338±0,006	2,216±0,023	0,07±<0,02	5,7±1,0		2,1±0,4
	P266-2/24	1,04 - 1,07		2,353±0,006	2,230±0,004	0,09±<0,02	5,2±0,3	3,4 / 5,9	2,9±0,2
	P266-2/27	1,63 - 1,66		2,350±0,006	2,255±0,015	-0,64±<0,02**	4,0±0,7	5,1 / -	**
	P266-2/30	2,57 - 2,60		2,330±0,006	2,166±0,064	-0,25±<0,02**	7,0±2,8	4,0 / 5,2	**
	P266-2/33	3,68 - 3,71		2,344±0,006	2,247±0,025	-0,36±<0,02**	4,1±1,1	3,6 / -	**
	P266-2/39	0,70 - 0,80		2,338±0,006*	n.b.	-0,62±<0,02**	n.b.		n.b.
	P266-2/40	0,70 - 0,80		2,338±0,006*	n.b.	0,21±<0,02	n.b.		n.b.
	P266-2/41	1,03 - 1,06		2,353±0,006*				5,6 / -	
	P266-2-52	0,02 - 0,05		2,340±0,006*				5,6 / -	

MgO-SEAL (02E11435)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bohrung	Probe	Teufe	Trocknung	Reindichte	Trockendichte	Lösungsgehalt	Porosität aus Dichte	Porosität aus Hg-Porosimetrie bis 100 µm / bis 300 µm	Sättigung
		[m]		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[%]
B44	P266-3/4	0,01 - 0,04		2,338±0,006*	2,230±0,025	0,07±<0,02	5,1±1,1		2,3±0,5
	P266-3/7	0,05 - 0,08		2,338±0,006*	n.b.	n.b.	n.b.		n.b.
	P266-3/10	0,12 - 0,15		2,338±0,006*	n.b.	-0,21±<0,02**	n.b.		**
	P266-3/13	0,55 - 0,58		2,338±0,006*	n.b.	-0,24±<0,02**	n.b.		**
	P266-3/16	1,49 - 1,52		2,338±0,006*	n.b.	-0,20±<0,02**	n.b.		**
Zusammenfassung:				2,338±0,025 (2,282 - 2,381; 12 EW)	2,238±0,027 (2,166 - 2,275; 21 EW)	-0,3±0,3 (-0,7 - 0,2; 26 EW)	4,4±1,1 (3,0 - 7,0; 21 EW)	4,4±0,9 (3,3 – 5,7; 12 EW) / 5,9±0,7 (5,2 – 6,6; 3 EW)	2,0±1,0 (2,0 - 3,0; 4 EW)
B40	P266-1/7	0,04 - 0,07	105°C, F _R = 0 %	2,482±0,020*	2,075±0,013	6,35±<0,02	16,4±0,9		60,2±3,2
	P266-1/9	0,10 - 0,13		2,482±0,020*	2,059±0,019	7,25±<0,02	17,1±1,0		65,5±3,9
	P266-1/13	0,13 - 0,16		2,482±0,020*	2,061±0,014	6,91±<0,02	16,9±0,9		62,9±3,3
	P266-1/16	0,16 - 0,19		2,482±0,020*	2,081±0,012	6,63±<0,02	16,1±0,8		64,0±3,3
	P266-1/19	0,23 - 0,26		2,482±0,020*	2,119±0,032	6,17±<0,02	14,6±1,5		66,8±6,7
	P266-1/22	0,61 - 0,64		2,482±0,020*	2,116±0,018	5,98±<0,02	14,7±1,0		64,3±4,4
	P266-1/25	1,01 - 1,05		2,482±0,020*	2,118±0,006	6,25±<0,02	14,7±0,7		67,5±3,4
	P266-1/28	1,64 - 1,67		2,477±0,020	2,114±0,006	6,11±<0,02	14,7±0,7		66,0±3,3
	P266-1/31	2,50 - 2,53		2,474±0,020	2,085±0,010	6,75±<0,02	15,7±0,8		67,1±3,4
	P266-1/34	3,63 - 3,66		2,482±0,020*	2,128±0,014	6,74±<0,02	14,3±0,9		75,2±4,8
B41	P266-2/7	0,02 - 0,05	105°C, F _R = 0 %	2,482±0,020*	2,119±0,008	7,05±<0,02	14,6±0,8		76,4±4,0
	P266-2/10	0,05 - 0,08		2,482±0,020*	2,134±0,022	5,98±<0,02	14,0±1,1		68,0±5,4
	P266-2/13	0,09 - 0,12		2,482±0,020*	n.b.	7,21±<0,02	n.b.		n.b.
	P266-2/16	0,15 - 0,18		2,512±0,020	n.b.	7,00±<0,02	n.b.	10,4 / -	n.b.
	P266-2/19	0,28 - 0,31		2,482±0,020*	2,055±0,020	6,75±<0,02	17,2±1,0		60,2±3,7
	P266-2/22	0,60 - 0,63		2,482±0,020*	2,108±0,026	6,22±<0,02	15,1±1,3		65,1±5,5
	P266-2/25	1,04 - 1,07		2,466±0,020	2,104±0,008	6,37±<0,02	14,7±0,8		9,1 / -

MgO-SEAL (02E11435)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bohrung	Probe	Teufe	Trocknung	Reindichte	Trockendichte	Lösungsgehalt	Porosität aus Dichte	Porosität aus Hg-Porosimetrie bis 100 µm / bis 300 µm	Sättigung
		[m]		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[%]
	P266-2/28	1,63 - 1,66		2,482±0,020*	2,106±0,015	6,61±<0,02	15,2±0,9	9,4 / -	68,7±4,2
	P266-2/31	2,57 - 2,60		2,482±0,020*	2,066±0,044	6,76±<0,02	15,8±1,9	12,7 / -	62,3±7,1
	P266-2/34	3,68 - 3,71		2,482±0,020*	2,114±0,017	6,67±<0,02	14,8±1,0		71,1±4,7
	P266-2/37	0,27 - 0,30		2,482±0,020*	n.b.	6,62±<0,02	n.b.		n.b.
	P266-2/38	0,27 - 0,30		2,482±0,020*	n.b.	6,21±<0,02	n.b.		n.b.
B44	P266-3/5	0,01 - 0,04		2,482±0,020*	2,095±0,036	7,30±<0,02	15,6±1,6		73,3±7,6
	P266-3/8	0,05 - 0,08		2,482±0,020*	2,097±0,009	6,84±<0,02	15,5±0,8		69,2±3,5
	P266-3/11	0,12 - 0,15		2,482±0,020*	n.b.	6,91±<0,02	n.b.		n.b.
	P266-3/14	0,55 - 0,58		2,482±0,020*	2,082±0,015	6,82±<0,02	16,1±0,9		66,0±3,7
	P266-3/17	1,49 - 1,52		2,482±0,020*	2,093±0,010	6,41±<0,02	15,7±0,8		64,0±3,2
Zusammenfassung:				2,482±0,020 (2,466 - 2,512; 4 EW)	2,097±0,023 (2,055 - 2,134; 22 EW)	6,6±0,4 (6,0 - 7,3; 27 EW)	15,5±1,0 (14,0 - 17,2; 22 EW)	10,4±1,6 (9,1 - 12,7; 4 EW) / -	66,9±4,3 (60,2 - 76,4; 22 EW)

3.13 Überbohrung der B34: Analyse des mit Lösung in Kontakt stehenden MgO-Betons

Die Bohrung B34 wurde im April / Mai 2018 überbohrt. Ziel war es, zu prüfen, ob eine derartige Überbohrung mit einem Kerndurchmesser von 30 cm trocken mit gekühlter Luft als Spülung realisiert werden kann. Des Weiteren sollte der Phasenbestand des Kernmaterials, das mit bereits länger im Bohrloch vorhandener Lösung in Kontakt gekommen war, analysiert werden. Das Bohrloch war über mehrere Jahre mit $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung drucklos befüllt (verbliebener Zustand aus Untersuchungszeitraum CARLA). Vor dem Überbohren wurde die im Bohrloch stehende Lösung zur Beprobung entnommen. Aus dem im Anschluss gewonnenen Bohrkern wurden Bohrkernscheiben (Abbildung 56) für eine ortsaufgelöste Phasenanalyse geschnitten. Anhand der Scheiben war optisch zu erkennen, dass die angestandene Lösung kaum in den Baustoff eingedrungen war. Mit der Zeit entwickelte sich jedoch, nachdem die MgO-Beton-scheibe hergestellt war, eine scheinbar weiter in den Baustoff hineinreichende Lösungsfront (auch nachdem die Scheibe zur Aufbewahrung in Folie luftdicht verpackt war) (Abbildung 57).



Abbildung 56: Bohrkern der Überbohrung der B34

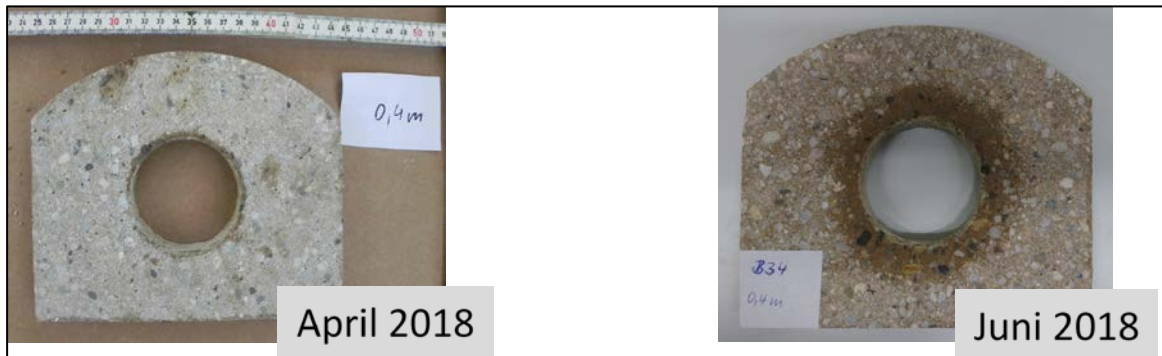


Abbildung 57: Optische Veränderung am Beispiel der Bohrkernscheibe bei 0,4 m; links: unmittelbar nach der Herstellung (Schnitt aus Bohrkern, Abbildung 56); rechts: „vermeintliche Lösungsfront“, welche sich erst mit der Zeit auf der frisch geschnittenen Oberfläche der Scheibe gebildet hat.

Die ortsaufgelösten Phasenanalysen im Bereich des nachträglich entstandenen „Lösungssaumes“ zeigen, dass sich dort die 3-1-8-Phase gebildet hat. Im primär nur wenige Millimeter tiefen Lösungseindringbereich konnte die 3-1-8-Phase nicht identifiziert werden. Wie auch im Bereich außerhalb davon war nur die 5-1-8-Phase nachweisbar. Der mit der Lösung in Kontakt gestandene Bohrlochsraum ist infolge des Kontaktes mit der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung sehr hygroskopisch geworden. Die $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung weist eine Gleichgewichtsfeuchte von etwa 20 % (relative Luftfeuchte, bei 27°C) auf und nimmt damit Feuchte aus der Umgebung auf, sobald diese eine höhere Luftfeuchte aufweist. Diese Eigenschaft wird dann an den Baustoff übertragen bzw. auf den Bereich, der mit dieser Lösung porenerfüllt ist. Die sich so vergrößernde vermeintliche „Lösungsfront“ wandert im Wesentlichen entlang der Oberfläche der

Bohrkernscheibe und löst dabei die Bildung der 3-1-8- aus der 5-1-8-Phase aus (Abbildung 58). Primär ist die 3-1-8-Phase jedoch kaum im Baustoff nachweisbar.

Dagegen wurden die weißen Ablagerungen im Saumbereich in der Bohrlochkontur ausschließlich als 3-1-8-Phase neben silikatischen Phasen identifiziert (Abbildung 59). Aufgrund des sehr geringen Porenraumes im MgO-Beton (Lösung ist nur ca. 1-2 mm eingedrungen, Abbildung 57 links) ist die 3-1-8-Phase offensichtlich bevorzugt in den Bereich der drucklos anstehenden Lösung ausgehend von der Betonoberfläche kristallisiert.

Die Analyse der Lösung (Tabelle 22) zeigt im Vergleich zur Ausgangszusammensetzung die zu erwartenden Veränderungen. In der Lösung haben sich Hydroxid-Ionen aufgrund des Kontaktes zum Baustoff angereichert. Deren Konzentration ist jedoch gegenüber der 3-1-8-Phase noch stark übersättigt, was darauf hinweist, dass die 3-1-8-Phase aus der Lösung noch weiter auskristallisieren wird. Der $MgCl_2$ - und $CaCl_2$ -Gehalt weist den im Rahmen von CARLA dazu ausgewiesenen und bereits bei einer früheren Beprobung (am 06.11.2015) dieser Bohrlochlösung analysierten Konzentrationsbereich auf.

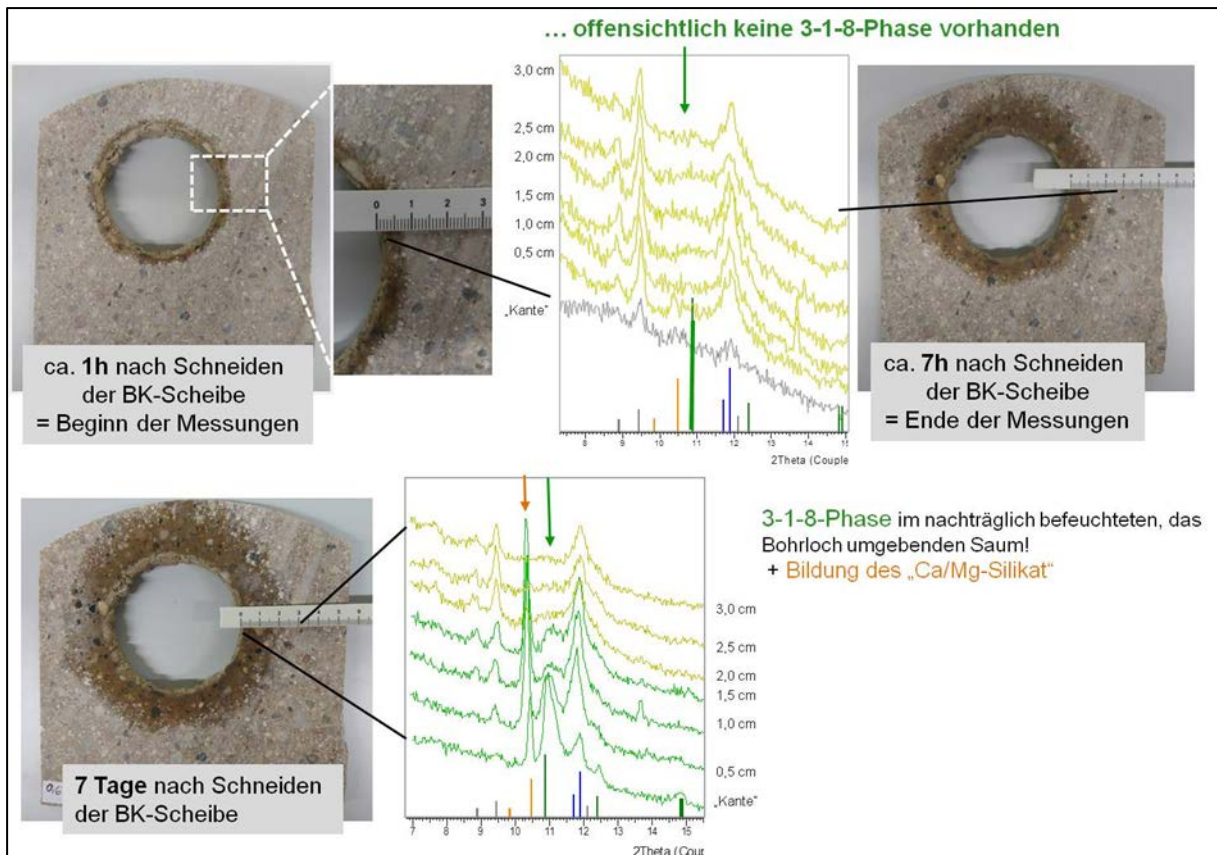


Abbildung 58: Zeitabhängige orts aufgelöste Phasenuntersuchungen der Lösungsfront der Bohrkernscheibe bei 0,678 m aus der Bohrung B34.

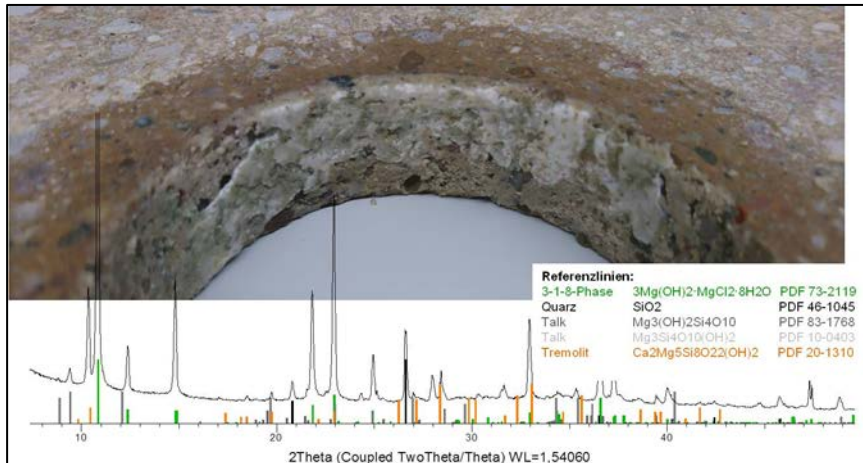


Abbildung 59: Ablagerung auf dem Bohrlochinneren und zugehöriges Pulverdiffraktogramm aus Bohrung B34

Tabelle 22: Lösungskonzentrationen der aus der B34 entnommen $\text{MgCl}_2/\text{CaCl}_2$ -Lösung im Vergleich zur Ausgangskonzentration

Ionenkonzentration	$\text{MgCl}_2/\text{CaCl}_2$ -Ausgangslösung, (def. in CARLA)	Probenahme aus B34 am 06.11.2015	Probenahme aus B34 unmittelbar vor Überbohrung am 04.04.2018
Mg^{2+} [mol/kg(H_2O)]	2,64	2,3	2,6
Ca^{2+} [mol/kg(H_2O)]	5,16	5,61	5,5
K^+ [mol/kg(H_2O)]	nicht bestimmt	0,058	0,06
Cl^- [mol/kg(H_2O)]	15,60	15,76	15,7
OH^- [mol/kg(H_2O)]	nicht bestimmt	0,039	0,05
Dichte bei 25°C [g/cm ³]	nicht bestimmt	nicht bestimmt	1,468

Im Rahmen der orts aufgelösten Phasenanalyse an den Bohrkernscheiben wurde auch speziell der Bereich der Betonierabschnittsgrenzen untersucht (Abbildung 60). Es konnten keine Auffälligkeiten hinsichtlich eines eventuell höheren Lösungseintritts entlang der Betonierabschnittsgrenzen festgestellt werden. Die Lösung ist also entlang der Betonierabschnittsgrenzen genauso weit (und nicht weiter) in den Baustoff eingedrungen, wie im Inneren eine Spritzbetonschicht. Auch bei den Betonierabschnittsgrenzen wurde unmittelbar nach der Scheibenherstellung nur die 5-1-8-Phase nachgewiesen. Eine Hygroskopie entlang der Betonierabschnittsgrenzen, was auf ein Eindringen der Lösung entlang der Betonierabschnittsgrenzen hinweisen würde, konnte nicht beobachtet werden. Vom Bohrlochsaum (ehemaliger Lösungskontaktbereich) wurde der Baustoff gleichmäßig nach innen hinein (minimal) befeuchtet, unabhängig davon, ob Betonierabschnittsgrenzen darin enthalten waren oder nicht. Die 3-1-8-Phase wurde erst nach Tagen in diesem sekundär befeuchteten Bereich vorgefunden.

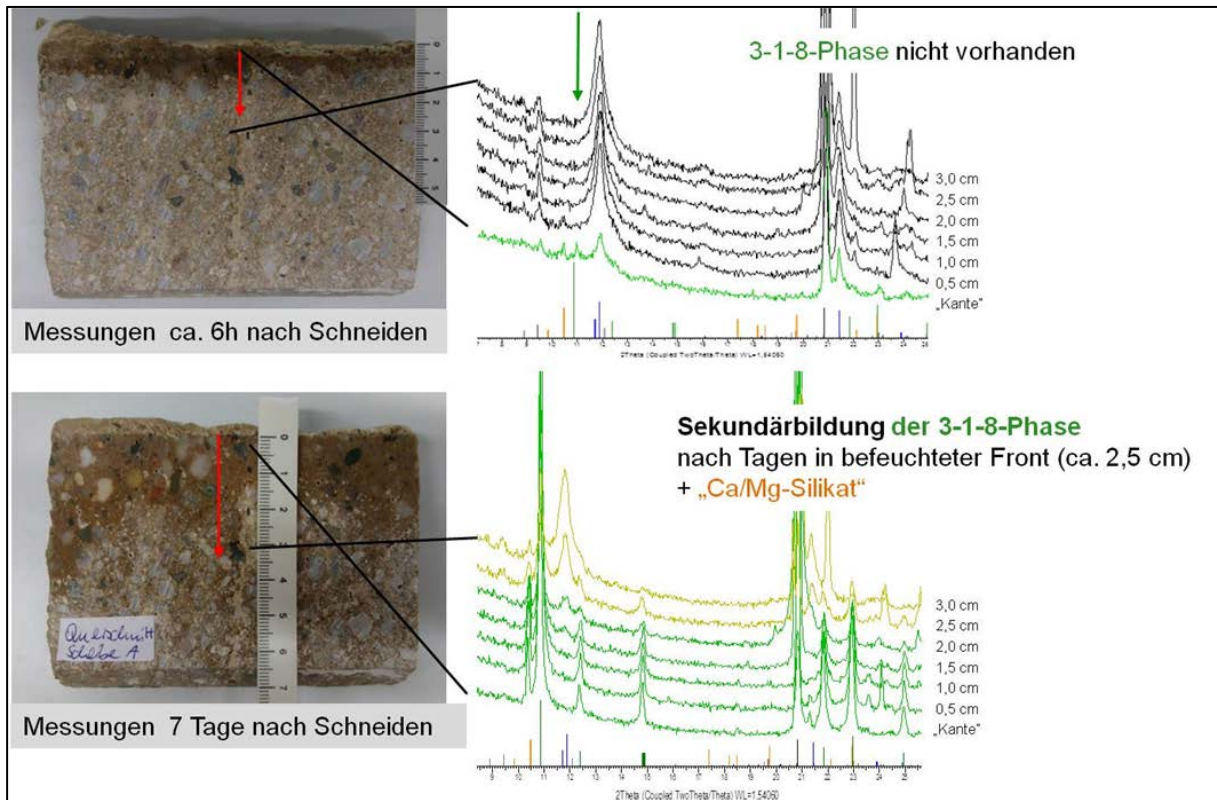


Abbildung 60: Zeitabhängige orts aufgelöste Phasenuntersuchungen entlang einer Betonierabschnittsgrenze (vertikal in Probenmitte) der Bohrkernscheibe 0,678-0,782 m der B34.

3.14 Festigkeits- und Kriechverhalten

3.14.1.1 Versuchsprogramm

Baustoffparameter zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften (z.B. Festigkeit und zeitliches Verformungsverhalten) sind Voraussetzung, um mittels numerischer Verfahren den geomechanischen Integritätsnachweis für das Bauwerk führen zu können, z.B. zum Nachweis der Stabilität gegen Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung. Beim geomechanischen Integritätsnachweis treten in einem Verschlussbauwerk nach vorliegenden Erfahrungen nur kleine Spannungsdeviatoren (und nur im Bereich der Dammstirnflächen möglicherweise etwas Größere) auf. Unabhängig davon ist es günstig, wenn die Baustofffestigkeit mindestens der Festigkeit des umgebenden Salzgesteins entspricht, weil damit gewährleistet ist, dass das Gebirge auf den Dammkörper aufkriechen kann. Beim Aufkriechen bildet sich die in der Salzkontur unvermeidliche Auflockerungszone zurück und gleichzeitig nimmt aufgrund der Einspannung die Durchlässigkeit im Baustoffkörper ab.

Für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften stand Kernmaterial aus der horizontalen Bohrung B42 zur Verfügung. Diese Bohrung wurde trocken gebohrt und ein Kern von 4,10 m Länge und mit einem Durchmesser von ca. 107 mm gewonnen (zur Lage der Bohrung s. Abschnitt 2.4). Das Probenmaterial weist optisch die charakteristischen Spritzbeton-Übergänge auf, wobei an einzelnen Betonierabschnittsgrenzen Abrisse auftraten (s. Abschnitt 3.6).

In Tabelle 23 ist das Programm für die geomechanischen Untersuchungen zusammengefasst. Das Untersuchungsprogramm musste wegen der nur begrenzten Anzahl an Proben so ausgelegt werden, dass trotzdem die relevanten Festigkeitsparameter zumindest indexartig festgestellt werden konnten. Die gewonnenen Festigkeitsparameter wurden mit früheren Versuchsergebnissen oder Festigkeitsparametern von anderen Baustoffen verglichen. Dies sind:

- Versuchsergebnisse zu Festigkeitsparametern, gewonnen im Rahmen des Forschungsvorhabens CARLA \Rightarrow Vergleich der Ergebnisse von Rückstellproben (aus Spritzkästen), gewonnen während der Bauphase versus neu gewonnenen in-situ-Proben aus dem realen Bauwerk; Feststellung möglicher Alterungseffekte;
- Versuchsergebnisse zu Festigkeitsparametern von verschiedenen anderen Sorelbaustoffen (z.B. A1, B2, C3 und D4⁴) \Rightarrow Einordnung der Ergebnisse in das vorhandene Eigenschaftsspektrum von Sorel-Baustoffen.

⁴ Diese materialspezifische Nomenklatur basiert auf dem Vorhaben ERCOSPLAN (2014) [AU24], in dessen Rahmen vier verschiedene Sorelbeton-Varianten untersucht wurden:

- A1: Von der Fa. DBE-TEC in Zusammenarbeit mit der Fa. K-UTEC speziell für Anwendungen auf der Schachanlage Asse II entwickelter Sorelbeton (Zuschlagstoff Salzgrus: $\varnothing \leq 4\text{mm}$).
- B2: Sorelbeton der Rezeptur DBM2, von der Fa. K-UTEC für Anwendungen im ERA Morsleben entwickelter Baustoff, u.a. mit Anhydritmehl, Quarzsand und Mikrosilikat.
- C3: Der Sorelbaustoff C3 ist innerhalb des BMWi-FuE-Vorhabens „Zusammenhang von Chemismus und mechanische Eigenschaften des MgO-Baustoffs“ [AU1] entwickelt worden (alternative Bezeichnung: R3a-Mörtelvariante). Entsprechend des stöchiometrischen Ansatzes der Rezeptur bildet sich hier vorrangig die langzeitstabile 3-1-8 Sorelphase. Als Zuschlagstoff kommen Quarzmehl bzw. Silikat Korn (\varnothing bis 8 mm) zum Einsatz.
- D4: Der MgO-Beton mit Silikatzuschlag wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens mit dem Kurztitel „CARLA“ [AU5] für Anwendung als Ort- oder Spritzbeton entwickelt. In [AU24] wurde nur die Ortbeton-Variante untersucht.

Tabelle 23: Untersuchungsprogramm an Kernstücken aus der Kernbohrung B42 (für die Kurzbezeichnungen der Testspezifikationen s. Text).

Kernstück		Probenlänge (cm)	Test
Anfang (m)	Ende (m)		
0,07	0,25	18,0	TC PE1
0,25	0,45	20,0	TCMS1
0,48	0,54	6,0	SZ 2
0,54	0,69	15,0	HZV 2
0,69	0,76	7,0	SZ 3
0,76	0,90	14,0	HZV 3
0,90	0,97	7,0	SZ 4
1,01	1,21	20,0	TC REL1
1,25	1,44	19,0	TC Frac
2,40	2,60	20,0	TCMS2
2,60	2,80	20,0	Reserve
2,90	2,97	7,0	SZ 5
2,97	3,17	20,0	TC REL2
3,62	3,69	7,0	SZ 6
3,69	3,84	15,0	TC PE2
3,87	3,94	7,0	HZV 4
3,94	4,09	15,0	HZV 1

HZV:	4
TCMS:	2
TC REL	2
SZ	5
TC PE	2
TC Frac	1

An dem vorhandenen Kernmaterial wurden ausgehend von der Probendokumentation und der petro-physikalischen Charakterisierung (Bestimmung der Dichte sowie v_p und v_s mit den dynamischen Elastizitätskenngrößen) folgende Materialparameter bestimmt:

- Zugfestigkeit:
 - der Baustoffmatrix, als Spaltzugversuch an Proben aus dem Inneren einer Spritzbetonschicht: SZ (alternative Bezeichnung: Brazilian-Test oder indirekter Zugversuch)
 - von Betonierabschnittsgrenzen, als Haftzugversuch: HZV (alternative Bezeichnung: direkter Zugversuch)
- Triaxiale Druckfestigkeit (Bestimmung der MOHR-COULOMB-Parameter): Triaxialer Mehrstufentest TC-MS
- Kompaktion bei isostatischer Belastung (zyklische Vorbelastung vor TC)
- Kriechverhalten im Kurzzeittest, hier mittels Untersuchung des zeitabhängigen Kompaktions- (TC_{iso}) und Relaxationsverhalten: Relaxationstest TC-REL

Darüber hinaus wurden noch Permeabilitätstests unter triaxialer Druckeinspannung zur Bestimmung der Permeabilität von Proben mit und ohne Betonierabschnittsflächen durchgeführt (TC PE)

Teilergebnisse der Untersuchungen sind in der Studienarbeit von Knöfel [AU25] dokumentiert.

3.14.1.2 Triaxiale Druckversuche

Für die Untersuchung der Kompaktions- und Festigkeitseigenschaften im triaxialen Kurzzeitversuch wurde eine triaxiale Verformungsapparatur nach dem KÁRMÁN-Prinzip (servohydraulische Prüfmaschine RBA 2500 mit $F_{max} = 2500$ kN; Hersteller: Schenk Trebel) eingesetzt. Untersucht wurden Probekörper mit einem Durchmesser zwischen 90 und 110 mm (bei einem Verhältnis Durchmesser zu Länge von 1:2).

Wegen des begrenzten Probenmaterials umfasst jeder Test mehrere Versuchsphasen mit unterschiedlichen Zielsetzungen. Folgendes Versuchsregime wurde je Prüfkörper durchgeführt:

- (1) Isostatischer Kompaktionsversuch (TC_{iso}: $\sigma_1 \approx \sigma_3$) (schnelle Belastung: $\dot{\sigma} = 0,1$ MPa/s) mit 3 zwischengeschalteten axialen und/oder lateralen Zwischenlastungen bei $p = 5$ MPa, 10 MPa und 15 MPa → Untersuchung des Kompaktionsverhaltens („schnelle“ Belastung),
- (2) Triaxialer Mehrstufendruckversuch (TC-MS: $\sigma_1 > \sigma_3$) bei $\sigma_3 = 2, 4, 6$ und 10 MPa; Die Bestimmung der Bruchspannung erfolgt als Kompressionsversuch mit konstanter Axialverformungsrate ($\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/s) in den verschiedenen Manteldruckstufen, wobei bei Erreichen eines Spannungsmaximums (Bruchpunkt) die Belastung reduziert und die nächste Manteldruckstufe angefahren wird. Erst bei $\sigma_3 = 10$ MPa wird die Probe bis in den Restfestigkeitsbereich verformt → Ableitung der Festigkeitskurve ($\sigma_{1\text{Bruchpunkt}}$ versus σ_3) mit den MOHR-COULOMB-Parametern.

Die Ergebnisse der Festigkeitstests von zwei Proben (609-TC-MS1 und 609-TCMS2) sind im Festigkeitsdiagramm σ_1 versus σ_3 in Abbildung 61 als MOHR-COULOMB-Geraden (blaue Kurven) dargestellt. Für die Einordnung in das Ergebnisfeld unterschiedlicher MgO-Baustoffe sind zusätzlich Datensätze von Einzelproben von Spritz- und Ortbeton aus CARLA sowie ERCOSPLAN (2014) [AU24] für die dort untersuchten vier MgO-Betongruppen A1, B2, C3 und D4 enthalten.

Die MgO-Betone weisen für die einaxiale Druckfestigkeit (= Schnittpunkt der Mohr-Coulomb-Gerade mit der Y-Achse) eine erhebliche Variation der Festigkeit (zwischen < 20 MPa und > 100 MPa) auf, wobei die Festigkeit mit steigendem Manteldruck noch erheblich zunimmt. Die Festigkeit des MgO-Baustoffs hängt primär vom Phasenbestand der Binderphase ab, wobei 3-1-8-Rezepturen generell niedrigere Festigkeiten als 5-1-8-Rezepturen aufweisen. Qualitativ nimmt die Festigkeit generell in der Abfolge von C3, über B2 und A1 bis zum hier relevanten D4 zu. Zusätzlich können innerhalb einer Rezeptur- und Probengruppe die Festigkeiten noch erheblich variieren, was z.B. über das Variationsfeld der ESA-Daten [AU24] für einen A1-Ansatz deutlich wird.

Die für den D4 in früheren Untersuchungen bestimmte einaxiale Druckfestigkeit variiert zwischen 65 MPa und 110 MPa, bzw. die zugehörigen Mohr-Coulomb-Geraden überdecken einen weiten Festigkeitsbereich. Deshalb wurden im Rahmen des Vorhabens CARLA für die Modellberechnungen zwei unterschiedliche Festigkeitskurven (jeweils die untere Einhüllende des Datenspektrums) für Ortbeton („Modell Ortbeton MB10“) und Spritzbeton („Modell Spritzbeton GV2“) abgeleitet (siehe Abbildung 61). Die aktuellen Spritzbetonproben 609-TC-MS1 und 609-TCMS2 aus dem GV2 liegen nahezu vollständig oberhalb der Modellgrenzkurve für Spritzbeton (schwarze Gerade). Allerdings ist die Festigkeit von Spritzbeton generell niedriger als die Festigkeit von MgO-Ortbeton. Gleichzeitig können Proben aus Laboransätzen von D4 deutlich höhere Festigkeiten aufweisen als die hier untersuchten in-situ-Proben. Davon unabhängig gibt es aber keine Hinweise auf Alterungsprozesse mit einer Veränderung der Festigkeitseigenschaften. Gleichzeitig ist die Festigkeit von Spritzbeton sehr hoch und auch höher als für hochfesten Beton.

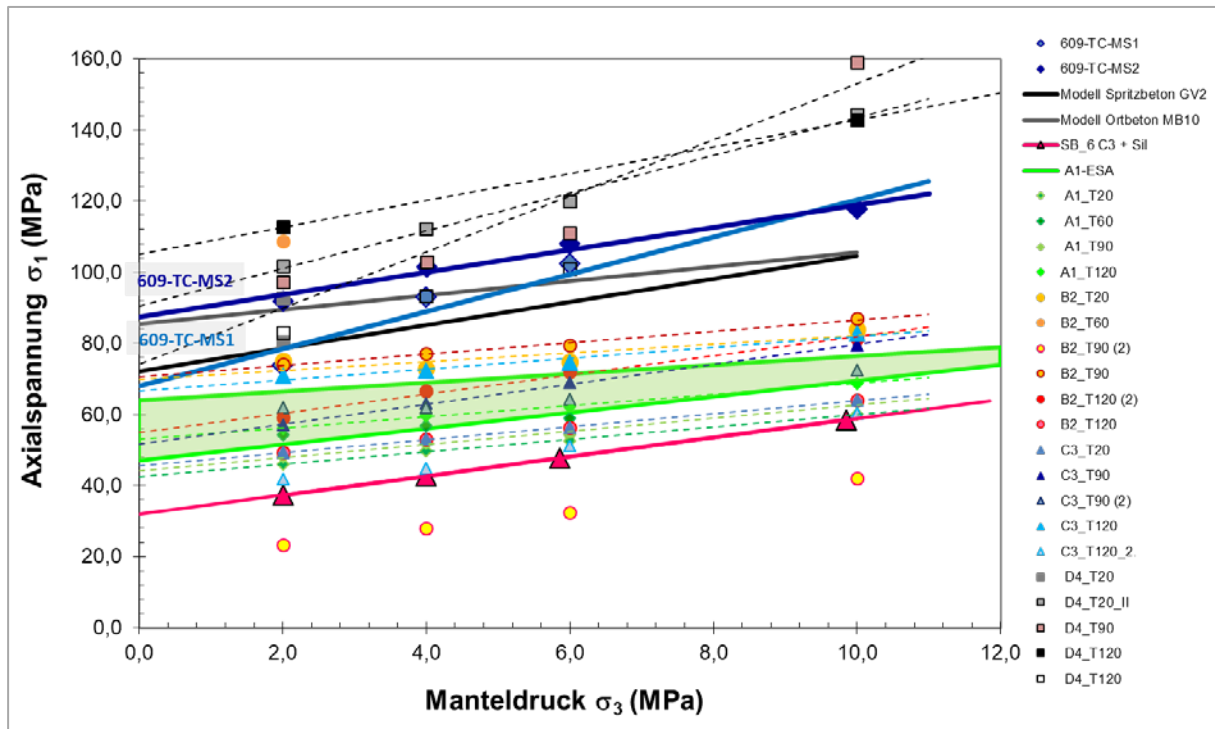


Abbildung 61: MOHR-COULOMB-Diagramm (σ_1 vs. σ_3) für die zwei untersuchten Proben (609-TC-MS2 und 609-TC-MS1) im Vergleich mit den Grenzkurven für Modellrechnungen für Ort- und Spritzbeton aus dem Forschungsvorhaben CARLA sowie im Vergleich mit den MOHR-COULOMB-Geraden für die MgO-Beton-Varietäten A1, B2, C3 und D4 aus Ercosplan (2014) [AU24].

3.14.1.3 Spaltzug- und Haftzugfestigkeit

Die Bohrkernproben zeichnen sich makroskopisch durch die Betonierabschnitte (im Mittel ca. 10 cm Schichtdicke) senkrecht zur Probenachse aus. Die Betonierabschnitte (= die Spritzbetonschichten) können im Kernstück nur qualitativ durch einen Farb- und Korngrößenwechsel von einer quasi-homogenen Betonmatrix (milchig weißgraue Quarz-Körnung und gelblich/bräunliches Bindemittel) zu einem vermutlich etwas Bindemittel-reicheren und feinkörnigeren Bereich an der Betonierabschnittsgrenze identifiziert werden.

Da Betonierabschnittsgrenzen möglicherweise Schwächeflächen im ansonsten hochfesten Beton (Matrix) darstellen können, wurden sowohl Haftzugversuche (= direkter Zugversuch) senkrecht zur Schichtfläche als auch Spaltzugversuche an Kernstückabschnitten zur Bestimmung der Matrixfestigkeit durchgeführt. Unter „Matrixfestigkeit“ wird die Festigkeit einer Probe aus dem Inneren einer Spritzschicht (also ohne Betonierabschnittsgrenze) verstanden. Der jeweilige Versuchsaufbau bzw. die Probengeometrie sind beispielhaft als Inset in Abbildung 62 dargestellt.

Beim direkten Zugversuch werden auf die zylindrischen Proben jeweils stirnseitig zwei Zugplatten aufgeklebt, die in einer Prüfmaschine auf Zug belastet werden. Da die Festigkeit teilweise höher als die Kleberfestigkeit war, wurden die Proben noch verjüngt („Hundeknochenprobe“). Beim „Brazilian-Test“ (= indirekter Zugversuch) wird die Zylinderprobe (bzw. Scheibe) senkrecht auf der Scheibenachse belastet. Der Riss bildet sich im Idealfall parallel zur Betonierabschnittsfläche.

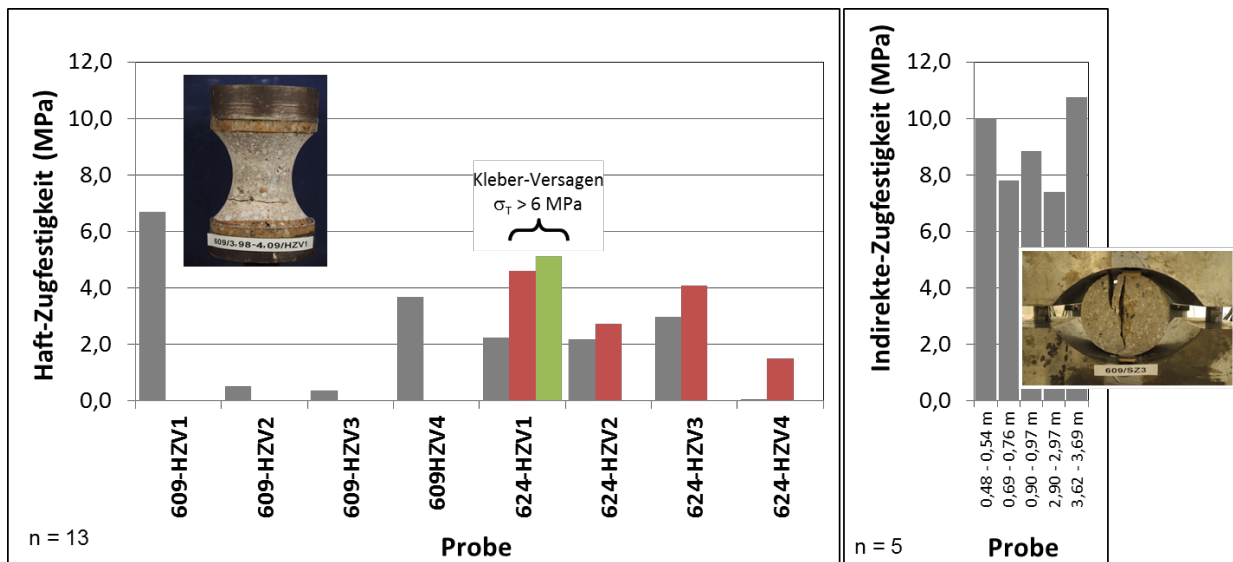


Abbildung 62: Spaltzug- und Haftzugfestigkeiten. (li.) Säulendiagramm mit Haftzugfestigkeiten (13 Proben, wobei bei 624-HZV1 zwei und 624-HZV2 ein zusätzlicher Zugversuch am Restkernstück durchgeführt wurde, s. Farbmarkierung); (re.) Säulendiagramm der Spaltzugfestigkeit zur Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit an Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht (5 Proben).

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Spaltzugfestigkeit der Proben (= Matrixfestigkeit) aus dem Inneren einer Spritzbetonschicht beträgt im Mittel aus 6 Versuchen $\sigma_{TMA} = 9,0 \text{ MPa}$ bei einer Standardabweichung von 1,5 MPa. Die Spaltzugfestigkeit liegt damit in der gleichen Größenordnung wie die Spaltzugfestigkeit von MgO-Ortbeton.
- Die Haftzugfestigkeit an den 12 Proben mit Betonierabschnittsgrenzen beträgt im Mittel $\sigma_{TBA} = 2,8 \text{ MPa}$ bei einer Standardabweichung von 2,0 MPa. Damit weisen die Proben mit Betonierabschnittsgrenzen eine geringere Zugfestigkeit als die Proben aus dem Inneren einer Spritzbetonschicht auf. Allerdings sind auch einige Proben an den Betonierabschnittsgrenzen gebrochen. Die Haftzugfestigkeit an den Betonierabschnittsgrenzen kann damit auch Null sein.

3.14.1.4 Kompaktions- und Relaxationsverhalten

Nach den Erfahrungen des IfG lassen sich u.a. Sorelbaustoffe relativ zuverlässig anhand ihres belastungs- und zeitabhängigen Kompaktions- bzw. Relaxationsverhaltens charakterisieren, wofür jeweils eine vom IfG entwickelte spezielle Untersuchungsmethodik eingesetzt wurde.

Kompaktionsverhalten:

Als poröse Baustoffe kompaktieren Sorelbetone je nach Zusammensetzung und Gefügezustand bei mechanischer Belastung mehr oder weniger stark. In Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung und den Einbaubedingungen sind die elastischen und plastischen Verformungsanteile unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei (zyklischer) isostatischer Belastung im Triaxialversuch ($\sigma_{iso} = \sigma_1 = \sigma_3$) ist die in Abhängigkeit vom Druck erreichte Volumenkompaktion nicht elastisch-reversibel, sondern bleibt als plastische Kompaktion teilweise erhalten, wobei dies u.a. von der Kompaktionsrate abhängig ist. Die Volumenkompaktion wird im Triaxialversuch näherungsweise über die Messung der axialen Verformungsrate bestimmt:

$$\varepsilon_{vol} = 3 \cdot \varepsilon_1$$

Der Einfluss der Verformungsrate ist beispielhaft in Abbildung 63 dargestellt. Wie die Kompaktionskurven von Spritzbetonproben aus GV2 zeigen, verhält sich das Material bei isostatischer schneller Belastung ($\dot{p} = 0,1 \text{ MPa/s}$) etwas steifer als bei einer langsamen Belastung ($\dot{p} = 0,005 \text{ MPa/s}$). Die Unterschiede sind aber nur gering und gleichzeitig ist die bei zyklischer Belastung erreichte Kompaktion insgesamt klein ($\Delta V/V \leq 0,5 \%$ bei $\sigma_{\text{iso}} = 15 \text{ MPa}$) und annähernd reversibel. Damit verhält sich das Material sehr steif, d.h. zeitabhängige Kompaktionsprozesse („Kompaktionskriechen“) sind weitgehend vernachlässigbar.

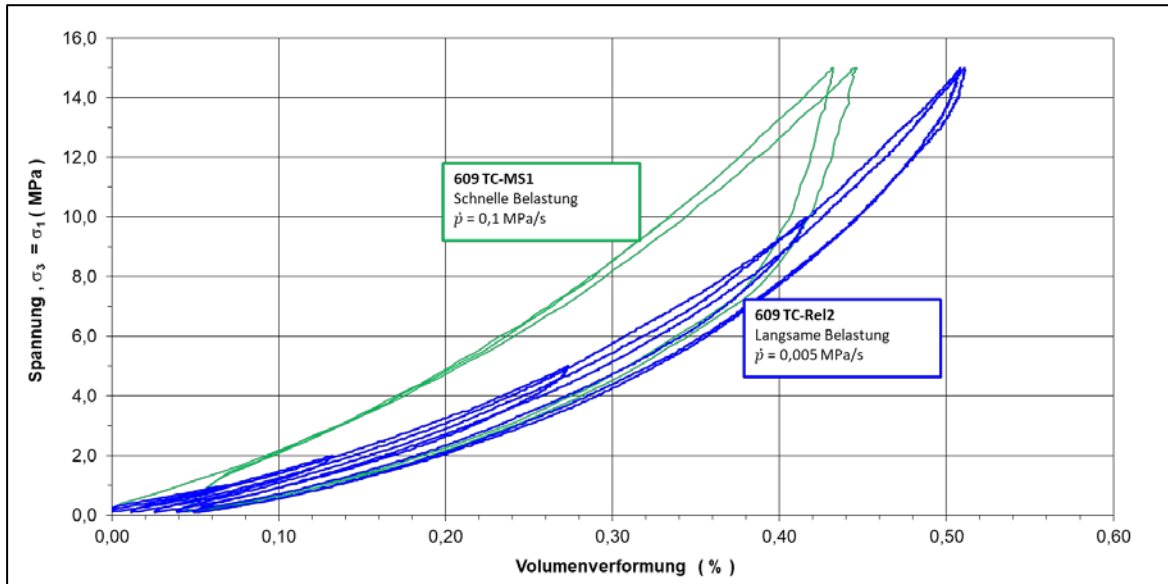


Abbildung 63: Isostatische Kompaktion von Spritzbetonproben aus dem GV2: Spannungs-/Verformungskurven bei schneller und langsamer Belastungsrate.

Insgesamt weisen die beiden an den Spritz-Betonproben aus GV2 durchgeführten Kompaktionstests gegenüber den anderen Sorelbeton-Chargen A1, B2 und C3 ein sehr viel günstigeres Materialverhalten auf, weil die bei Belastung (bis $\sigma_{\text{iso}} = 15 \text{ MPa}$) erreichte Volumenverformung $< 0,5\%$ ist, während bei anderen Sorelchargen eine Volumenverformung bis $> 2 \%$ erreicht wurde. Allerdings zeigen die Kompaktionsversuche eine große Streuung, weshalb damit insgesamt nur eine qualitative Aussage möglich ist.

Relaxationsverhalten:

Unter Relaxation ist der bei Baustoffen und Gesteinen allgemein zu beobachtende, zeitabhängige Spannungsabbau zu verstehen, wie er im Laborversuch während eines Druckversuchs in Phasen konstanter Dehnung auftritt, d.h. die Verformungsrate $\dot{\epsilon}_1 = 0$. Als Folge von Relaxationsprozessen wird sich die in einem Verschlussbauwerk (Strecken- oder Schachtverschluss) unter äußerer Belastung aufgrund von Konvergenz (oder infolge der sich beim Abbindeprozess entwickelnden Kristallisationsdrücke) erreichte Spannung im Laufe der Zeit durch Strukturänderungen (z.B. infolge von deviatorischem oder Kompaktions-Kriechen) innerhalb des Baustoffs abgebaut. Daraus folgt, dass die sich einstellende Deviatorspannung im Baustoff abhängig von der Belastungsrate und vom zeitabhängigen Verformungsverhalten des Baustoffs ist.

Da in-situ-relevante Belastungsraten ($\dot{\epsilon}_1 \approx 10^{-10} \text{ 1/s}$) im Labor praktisch nicht realisiert werden können, wurde hier der in-situ-Tragwiderstand des MgO-Baustoffs durch Relaxationsversuche auf Basis von (schnellen) Laborversuchen ($\dot{\epsilon}_1 \approx 10^{-5} \text{ 1/s}$) bestimmt. Der hierfür durchgeführte Triaxialversuch umfasst ein mehrstufiges Versuchsregime (vgl. Abbildung 64):

- (1) Deviatorische Verformung der Probe bei $\sigma_3 = 2$ MPa als konventioneller triaxialer Druckversuch mit einer konstanten Verformungsrate von $\dot{\epsilon}_1 = \text{ca. } 10^{-5}$ 1/s bis ein bestimmter Spannungs- bzw. Verformungszustand (hier ca. 80 % der triaxialen Bruchfestigkeit, nach dem Ergebnis von Vorversuchen) erreicht war (Abbildung 64a).
- (2) Danach wurden die Druckeinspannung (Manteldruck) und die Axialverformung (ϵ_1) konstant gehalten, d.h. $\dot{\epsilon}_1 = 0$, und die Reduktion der Differenzspannung über die Zeit (bis zu 48 h) durch Relaxation des Baustoffes beobachtet (Abbildung 64b bzw. c). Aus der in (10) über die Standzeit beobachteten Spannungsabfallrate $\dot{\sigma}_{Diff}$ und unter Berücksichtigung der inhärenten (experimentell bestimmten) Steifigkeit des Prüfsystems (E_s) kann die resultierende Kriechrate des Baustoffs in der Relaxationsphase ermittelt werden.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}_{Diff}}{E_s} \quad (10)$$

Als Ergebnis erhält man bei Darstellung der Effektivspannung gegen die logarithmierte Verformungsrate für jeden Relaxationsversuch eine quasi-lineare Kurve, womit sich über Extrapolation auf $\dot{\epsilon}_1 \approx 10^{-10}$ 1/s der in situ-relevante Tragwiderstand ergibt (Abbildung 64c).

- (3) Nach Beendigung der Relaxationsphase wurde die Probe abschließend bis zum Bruch bzw. bis zum Restfestigkeitsniveau verformt (Abbildung 64d).

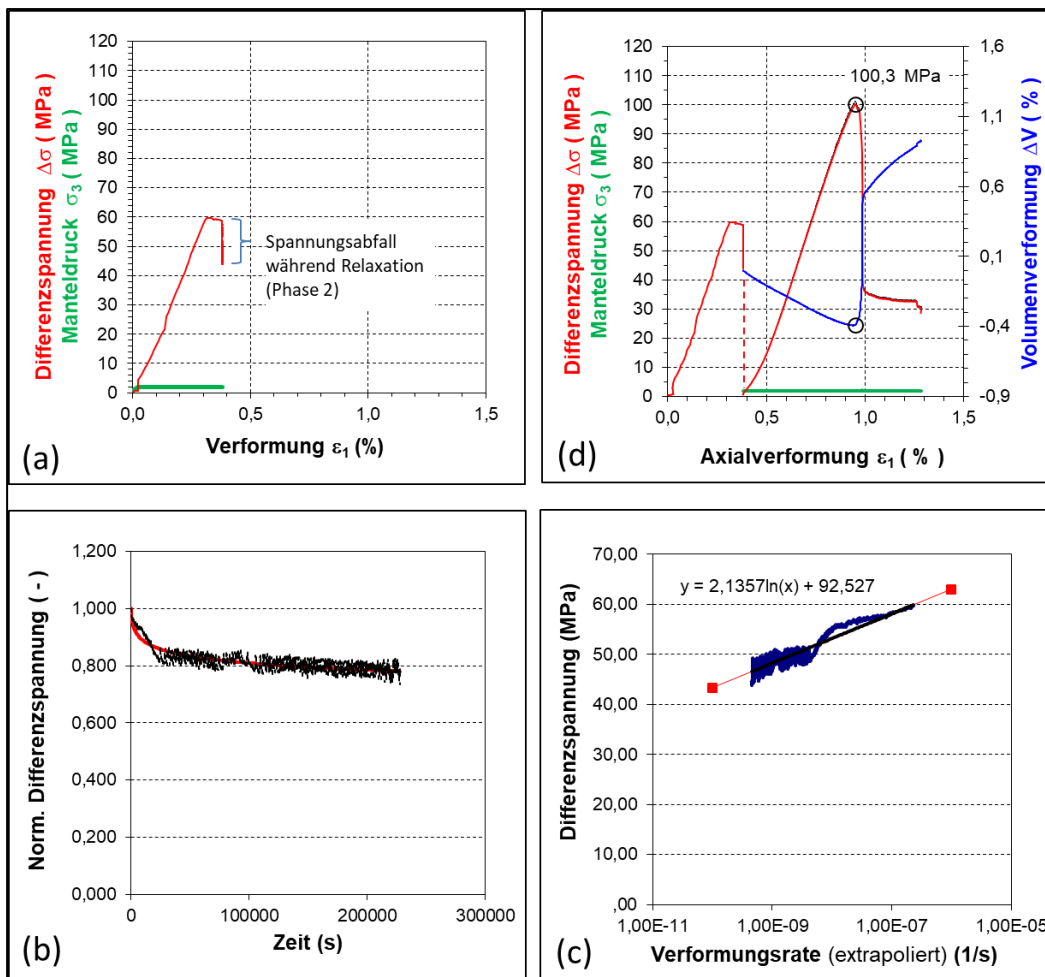


Abbildung 64: Mehrphasiger Relaxationsversuch (Test Rel2). Für Erläuterung s. Text).

Die aus den Indexversuchen für Spritzbetonproben aus dem GV2 abgeleiteten Abfallkurven der in Abhängigkeit von der Verformungsrate wirkenden Deviatorspannung $\sigma_1 - \sigma_3$ sind in Abbildung 65 im Vergleich zu anderen Sorelbeton-Rezepturen (A1 und C3 aus dem ESA-Vorhaben [AU24]) dargestellt.

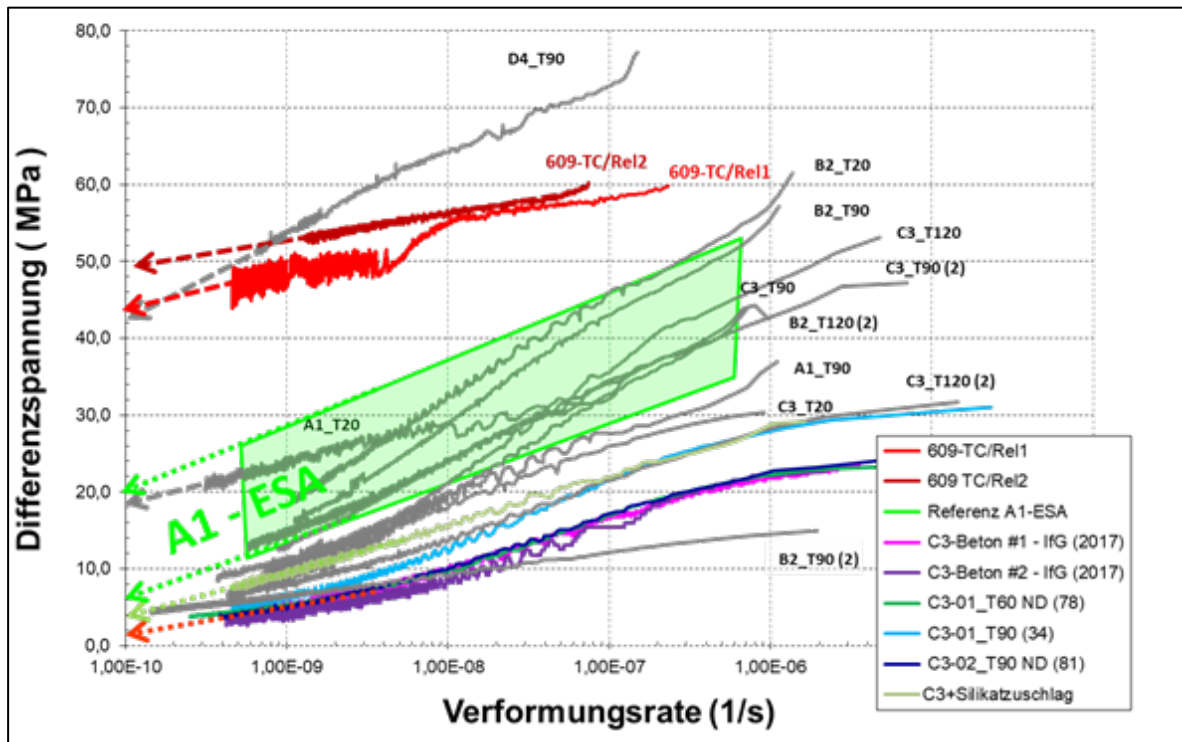


Abbildung 65: Relaxationsverhalten von zwei Spritzbeton-Proben (609-TC/Rel1 und 2); Transformierter Spannungsverlauf vs. log Kriechrate.

Die untersuchten Proben 609-TC/Rel1 und 609-TC/Rel2 aus Spritzbeton liegen im oberen Bereich des Variationsspektrums für MgO-Baustoffe. Bereits der qualitative Vergleich macht deutlich, dass der MgO-Beton D4 in der hier untersuchten Spritzbeton-Variante aus dem GV2 gegenüber den anderen Baustoffen ein sehr günstiges Relaxationsverhalten aufweist, weil er nur sehr gering bis vernachlässigbar kriecht. Die untersuchten Proben 609-TC/Rel1 und 609-TC/Rel2 (rot dargestellte Versuchskurven in Abbildung 65) relaxieren unter Endlager-relevanten Verformungsbedingungen gegen einen vergleichsweise hohen Restspannungswert von 45 MPa bis 50 MPa (ca. 75 % des Ausgangswertes). Im Gegensatz dazu liegt beim A1 das Spannungsniveau mit 5 MPa bis 20 MPa deutlich niedriger, während der C3-Baustoff sogar gegen 0 tendiert. Das bedeutet, dass der C3 unter Belastung quasi wegstreicht, womit Widerlager notwendig sind, wenn dieser in einem Strecken- oder Schachtverschluss eingesetzt wird.

MgO-Spritzbeton-Baustoffe mit 5-1-8-Phase sind im Unterschied zu den 3-1-8-Baustoffen in der Lage, deviatorische Spannungen, wie sie in einem Widerlager bei einer Druckbelastung zu erwarten sind, aufzunehmen. Letztendlich wird eingeschätzt, dass aufgrund der hohen Festigkeit und nur geringen Kriechneigung ein zeitabhängiges Verformungsverhalten vernachlässigt werden kann. Unabhängig davon wird für eine zukünftige Nachweisführung empfohlen, in Analogie zu Qualitätsuntersuchungen am A1-Beton für das Endlager Asse, isostatische Kriechversuche in Kombination mit Festigkeitsversuchen zur Bestimmung des Ersatzkompaktionsmoduls⁵ auch am MgO-Spritzbeton durchzuführen.

⁵ Der Ersatzkompaktionsmodul wird aus der volumetrischen Kompaktion bei der isotropen Belastung und der darauffolgenden isotropen Kriechphase (im isostatischen Kriechversuch) ermittelt. Dieser charakterisiert den Kompaktionswiderstand gegenüber repräsentativen, isotropen Spannungszuständen. Im Unterschied zum Kompaktionsmodul einer zügigen Belastung gilt der Ersatzkompaktionsmodul für in-situ-Kompaktionsraten.

4 Permeabilitätsuntersuchungen

4.1 Frühere Untersuchungsergebnisse im Rahmen des FuE-Projektes CARLA

Schon im Projekt CARLA wurde die Permeabilität des MgO-Betons in Bohrungen und im Labor an Kernmaterial für den MgO-Ortbeton und den MgO-Spritzbeton untersucht. [AU2], [AU12] Insbesondere wurde die Permeabilität k des MgO-Spritzbetons am GV2 in Bohrlochpacker-tests in der Bohrung B34 mehrfach bestimmt, um den Zusammenhang $k=f(t)$ für Gas und für $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung (Lösung 3) zu bestimmen [AU1]. Folgende Ergebnisse und Schlussfolgerungen wurden damals in Bezug auf die Permeabilität und den zeitlichen Verlauf der Permeabilität des MgO-Spritzbetons erhalten bzw. formuliert:

- Die Gaspermeabilität des Spritzbetons wurde im Bereich von $2,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $2,1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ gemessen.
- Der Spritzbeton hat eine mittlere Porosität von 6,5 Vol.-%.
- Ca. 500 Tage nach der Herstellung des Spritzbetons liegt der mittlere Lösungsgehalt in der Größenordnung von ca. 0,2 M.-%. Dies entspricht einer mittleren Porenraum-sättigung mit Flüssigkeit von ca. 4 Vol.-%.
- Für die geringe mittlere Lösungssättigung kann die in B35 ermittelte Gaspermeabilität ($2,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$) als durchaus repräsentativ für die Permeabilität des MgO-Spritzbetons im untersuchten Einbauzustand angesehen werden.
- Die in der Kernansprache identifizierten Bereiche mit Betonierabschnittsgrenzen wiesen keine höhere Permeabilität (mit Gas) im Vergleich zu Bereichen im Inneren von Spritzbetonlagen auf.
- In situ hat sich an zwei Messpunkten (MP2 und MP3) nach ca. 15 Tagen die Gaspermeabilität um maximal eine halbe Zehnerpotenz reduziert.
- Im Messpunkt 1 wurde die integrale Lösungsporeabilität des Spritzbetons zeitabhängig in der Größenordnung von $2,5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $6,2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ermittelt.
- Im Kontakt zu $CaCl_2$ - $MgCl_2$ -Lösung kommt es zu Sekundärreaktionen des Magnesia-binders, die den für die Permeabilitätsermittlung erfassten Druckverlauf eines Strömungsprozesses beeinflussen. Eine Quantifizierung dieses Einflusses ist aus den damals ausgeführten Messungen nicht möglich.
- Die Permeabilitätstests mit Lösung lassen darauf schließen, dass sich die Permeabilität des Baustoffes im Kontakt zu der $CaCl_2$ - $MgCl_2$ -Lösung (Lösung 3) verringert.
- Das für die ersten 1 m bis 2 m (ab Ortsbrust) ermittelte integrale Permeabilitätsniveau für Lösung im MgO-Spritzbeton reduzierte sich innerhalb von ca. 480 Tagen von $6,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ auf $2,5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$, was mit einer Nachreaktion des Betons im Kontakt mit der Versuchslösung in Verbindung stehen könnte.
- Die Permeabilität (integral) für MgO-Spritzbeton verringerte sich nach etwa einem Jahr nach Herstellung des GV2 auf ca. $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ für Gas und Lösung.

Die Abbildung 66 zeigt die im Projekt CARLA in situ nachgewiesene Permeabilitätsverringereung des MgO-Spritzbetons bei einer Durchströmung mit Lösung in der Bohrung B34. [AU2]

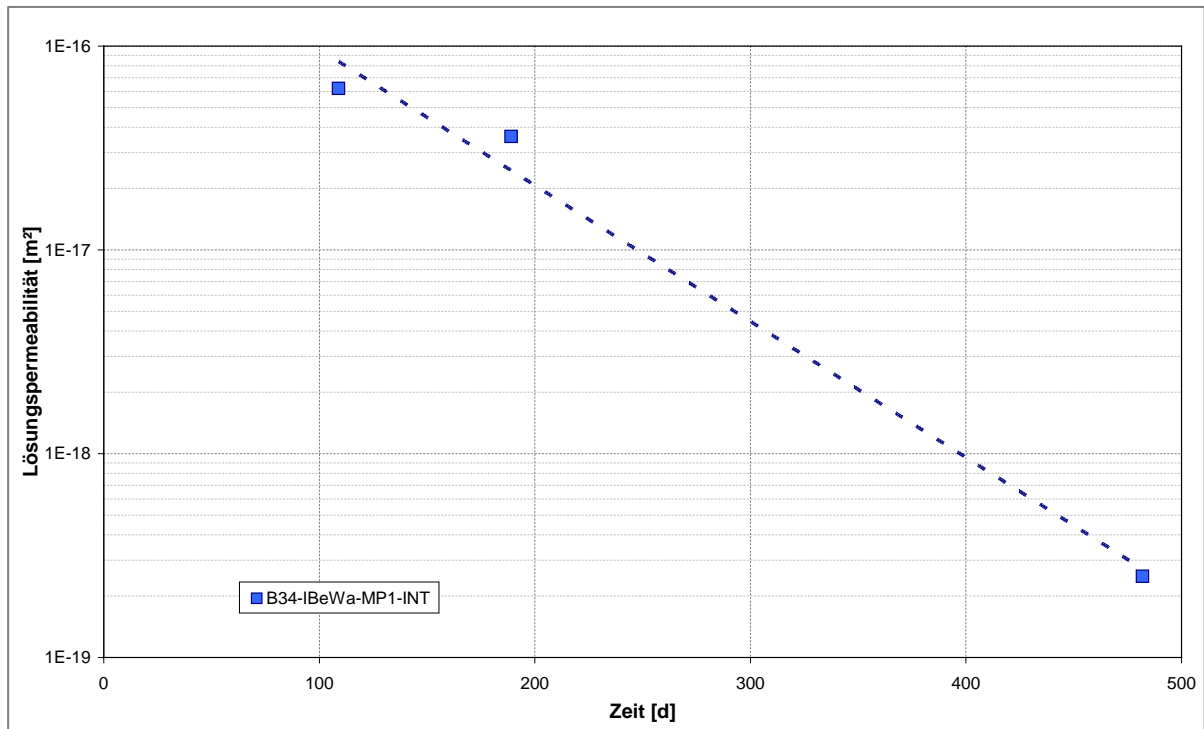


Abbildung 66: Zeitliche Veränderung der Lösungspermeabilität im MgO-Spritzbeton in der Bohrung B34 mit MgCl₂/CaCl₂-Lösung [AU2]

4.2 Untersuchungen in den Bohrungen B40, B41 und B44

Wie in Abschnitt 2.4 dargestellt wurde die Permeabilität in situ in den Bohrungen B40, B41 und B44 und im Labor an Kernmaterial bestimmt. In den drei Bohrungen wurden Bohrlochpacker-tests in verschiedenen Einbautiefen durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde in den Bohrungen und am Kernmaterial Gas (als inertes Strömungsfluid) verwendet. Parallel zur Bestimmung der Gaspermeabilität wurde der Lösungsgehalt an Proben aus dem Bohrkern in den Teufenbereichen der Permeabilitätsuntersuchungen zur Beurteilung der Sättigung des Porenraums mit Flüssigkeit im MgO-Spritzbeton ermittelt. (Abschnitte 3.8 bis 3.11). Anhand der Lösungsgehalte bzw. der Flüssigkeitssättigung im Porenraum wurde die ermittelte Gaspermeabilität interpretiert. Sowohl in situ als auch an den Kernen wurde für die Untersuchungen der Gaspermeabilität trockene Druckluft verwendet.

In einem zweiten Schritt wurde die Permeabilität mit zwei verschiedenen Salzlösungen, die nicht inert sind und mit dem MgO-Beton reagieren, sowohl an den Kernproben als auch in situ in den Bohrlöchern gemessen. Bei den zwei Salzlösungen handelt es sich zum einen um eine reine, gesättigte NaCl-Lösung, die Magnesium-frei ist (Lösung 1) und zum anderen um eine NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung (Lösung 2) (siehe Abschnitt 3.4 zu den Lösungen).

Weiterhin stand die zeitliche Entwicklung der Permeabilität ($k=f(t)$), analog zu den Untersuchungen in der Bohrung B34 im Projekt CARLA, sowie der langfristige Lösungsangriff mit konstantem Druck bei den In-situ-Lösungspermeabilitätsuntersuchungen im Vordergrund. Für die Bestimmung der in situ-Lösungspermeabilität wurde über den Zeitraum von knapp 600 Tagen ein Fluidruck im Bohrloch aufrechterhalten. Während der Druckhaltung wurde in zeitlichen Abständen die Lösungspermeabilität bestimmt.

Sowohl bei den In-situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen als auch bei den Permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial (Gas und Lösung) stand die Permeabilität im Bereich der

Betonierabschnittsgrenzen im Vergleich zu der Permeabilität im Inneren einer Spritzschicht im Fokus (Abschnitt 3.1).

Die Permeabilität wurde sowohl in situ als auch am Kernmaterial mit instationären, strömungstechnischen Versuchen (Impulstests) untersucht.

4.2.1 In-situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Gas

In den drei Bohrungen B40, B41 und B44 wurde zunächst die Permeabilität mit Gas insgesamt 12 Mal gemessen. Es wurden Versuche mit kurzen Prüfabschnitten zwischen 4 cm und 13 cm und integral über nahezu die gesamte Bohrlochlänge durchgeführt. Bei den kurzen Prüfabschnitten wurde zwischen Bereichen aus dem Inneren einer Spritzschicht und Bereichen mit Betonierabschnittsgrenzen unterschieden. Der angewandte Prüfdruck betrug zwischen 0,13 MPa und 0,59 MPa.

Die Tabelle 24 fasst alle Ergebnisse der in-situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen zusammen. In Abbildung 67 ist die in den Bohrungen B40, B41 und B44 ermittelte **In-situ-Gaspermeabilität** in Abhängigkeit vom Konturabstand dargestellt. Zudem ist durch horizontale schwarze Striche das Messintervall angegeben (siehe Teufenangaben in Tabelle 24)

Die Gaspermeabilität bei allen Versuchen schwankte zwischen $1,1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ und $1,9 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Die Gaspermeabilität wurde wie folgt gemessen:

- a) **in Bereichen im Inneren einer Spritzschicht** (also ohne Betonierabschnittsgrenzen): im Mittel $2,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.
- b) **in Bereichen mit Betonierabschnittsgrenzen**: $4,6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Die an den Prüfbereichen mit Betonierabschnittsgrenze gemessene Permeabilität wies eine große Streubreite von 3 Größenordnungen auf ($1,9 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ - $1,9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$). Von den sechs Bereichen mit jeweils einer Betonierabschnittsgrenze wurde an drei eine vergleichsweise geringe Permeabilität bestimmt. An drei anderen Bereichen mit Betonierabschnittsgrenze wurde eine ähnliche Permeabilität wie für den MgO-Beton aus dem Inneren einer Spritzschicht ermittelt. Eine Betonierabschnittsgrenze stellt somit nicht zwangsläufig einen Bereich mit höherer Permeabilität dar.
- c) **bei den integralen Messungen**: $1,9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bei einer Messbereichslänge von 3,09 m (B41) bis 3,14 m (B44)

Tabelle 24: Ergebnisse der in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen

Bohrung	Messpunkt	Bezeichnung	Messdatum	Prüfdruck	Teufe OK	Teufe UK	Teufen MP	Gaspermeabilität	Bemerkung
				[MPa]	[m v. AP]				
B40	MP1	B40-124-G1	13.06.2016	0,44	1,22	1,30	1,26	1,9*10 ⁻¹⁹	BAG
	MP2	B40-120-G1	27.06.2016	0,31	1,18	1,22	1,20	1,1*10 ⁻¹⁹	Inneres einer SpB.schicht
	MP3	B40-228-G1	14.06.2016	0,10	2,23	2,32	2,28	3,2*10 ⁻¹⁹	Inneres einer SpB.schicht
	MP4	B40-238-G1	23.06.2016	0,47	2,33	2,38	2,36	2,0*10 ⁻¹⁸	BAG
	MP5	B40-050-INT-G1	16.06.2016	0,59	0,49	3,58	2,03	1,7*10 ⁻¹⁹	integral Bohrung
B41	MP1	B41-123-G1	15.06.2016	0,14	1,21	1,29	1,25	3,2*10 ⁻¹⁹	BAG
	MP2	B41-134-G1	21.06.2016	0,16	1,31	1,36	1,34	3,8*10 ⁻¹⁹	Inneres einer SpB.schicht
	MP3	B41-233-G1	16.06.2016	0,21	2,28	2,37	2,33	2,6*10 ⁻¹⁹	Inneres einer SpB.schicht
	MP4	B41-228-G1	30.06.2016	0,23	2,23	2,28	2,26	5,0*10 ⁻¹⁷	BAG
	MP5	B41-050-INT-G1	20.06.2016	0,13	0,49	3,63	2,06	2,1*10 ⁻¹⁹	integral Bohrung
B44	MP1	B44-083-G1	24.06.2016	0,20	0,80	0,93	0,87	1,9*10 ⁻¹⁶	BAG
	MP2	B44-111-G1	27.06.2016	0,28	1,07	1,20	1,14	3,4*10 ⁻¹⁷	BAG

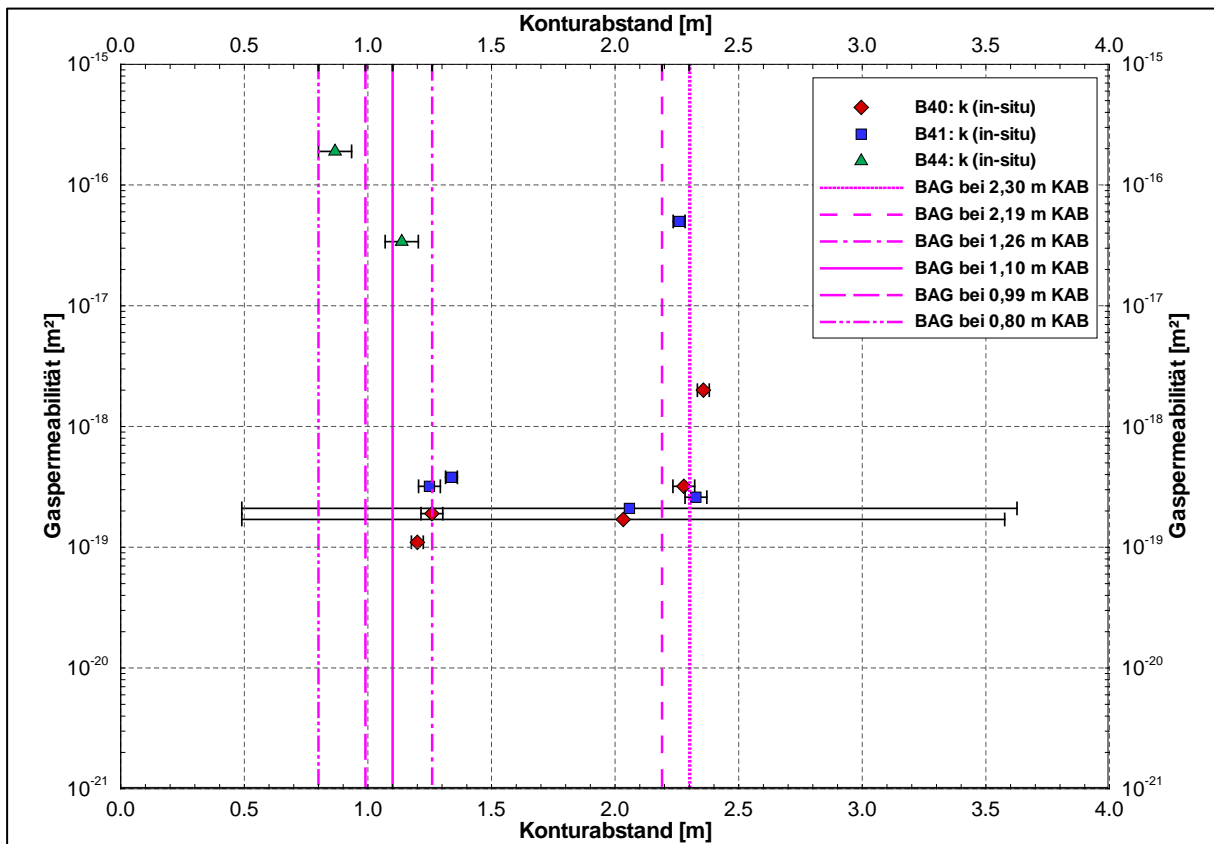


Abbildung 67: Gaspermeabilität in situ in B40, B41 und B44

4.2.2 Permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial mit Gas

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der **Gaspermeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial** der Bohrkerne aus den Bohrungen B40, B41 und B44 zusammengefasst. Bei der Bestimmung der Gaspermeabilität an den Kernproben wurden Probenpaare senkrecht und parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen untersucht.

In Abbildung 68 werden die Einzelergebnisse und die (geometrischen) Mittelwerte parallel und senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen dargestellt.

Die Permeabilität, gemessen parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen, beträgt zwischen $9 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ und $6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Bei Durchströmung senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen liegt die Permeabilität zwischen $8 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ und $8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Wie in der Abbildung 68 zu erkennen ist, ergibt sich eine mittlere Permeabilität parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen von $7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ und senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen von $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$.

Während sich die in situ bestimmte Permeabilität zwischen Bereichen mit Betonierabschnittsgrenzen und kompaktem Beton kaum unterscheidet, variiert die Permeabilität an den Kernproben parallel und senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen um über eine Zehnerpotenz. Insgesamt ist die an den Kernproben ermittelte Permeabilität geringer als in situ. Ob diese Abweichung Ausdruck einer Veränderung des Probenmaterials, z.B. durch Feuchtigkeitsaufnahme (Abschnitt 3.8), Umkristallisation infolge der Feuchtigkeitsaufnahme oder Manteldruckeinflüsse ist, konnte nicht abschließend geklärt werden. Alternativ könnte ein Unterschied in den in situ und an Kernmaterial ermittelten Gaspermeabilität auch Ausdruck lokal inhomogener, auf den Betonierabschnittsgrenzen ausgeprägter Permeabilitätsunterschiede sein. Ebenfalls denkbar ist, dass die Bohrkerne trotz der vorsichtigen Probenahme und Probebehandlung durch Erschütterungen eine minimale Auflockerung an den Betonierabschnittsgrenzen erfahren haben, wodurch die Permeabilität bei paralleler Durchströmung zur Betonierabschnittsgrenze bei den Kernproben höher ist als bei den in situ Untersuchungen.

Prinzipiell kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die in situ-Untersuchungen mit Gas belastbarer sind, insbesondere da sich, wie im Abschnitt 3.8 dargelegt, gezeigt hat, dass der MgO-Spritzbeton unter in situ-Verhältnissen primär trocken ist. Damit ist die in situ ermittelte Gaspermeabilität die unbeeinflusste, totale Permeabilität.

In Bezug auf Permeabilitätsunterschiede zwischen Bereichen mit Betonierabschnittsgrenzen und Bereichen aus dem Inneren einer Spritzschicht wird geschlussfolgert, dass sowohl Betonierabschnittsgrenzen mit höherer Permeabilität in der Größenordnung $> 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ (gemessen im Bohrloch in situ) als auch mit einer Permeabilität im Bereich des MgO-Spritzbetons im Inneren einer Spritzschicht existieren. Dies wird auch unter Einbeziehung der Permeabilitätsuntersuchungen in den Bohrungen B38 und B39 deutlich (Abschnitt 4.3.3: B38: kein Druckaufbau möglich, B39: $\approx 3,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$). Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Abschnitt 3.14) kommen zu einer ähnlichen Differenzierung der Betonierabschnittsgrenzen in Bezug auf die Festigkeitseigenschaften.

Allerdings kann auch festgestellt werden, dass die Bereiche mit einer Permeabilität von kleiner 10^{-16} m^2 sich nicht über die gesamte Querschnittsfläche (ca. $3 \times 3 \text{ m}^2$) erstrecken, sondern lokal begrenzt sind.

Tabelle 25: Ergebnisse der Gaspermeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial

Bohrung	Probenbezeichnung	Teufe OK [m v. AP]	Teufe UK [m v. AP]	Teufe MP [m v. AP]	Orientierung zu BAG	Gaspermeabilität [m ²]
-	-	[m v. AP]	[m v. AP]	[m v. AP]	-	[m ²]
B40	P266-1/3	2,32	2,36	2,34	parallel	1*10 ⁻¹⁸
	P266-1/4	2,38	2,42	2,40	senkrecht	8*10 ⁻²⁰
B41	P266-2/1	1,26	1,30	1,28	parallel	6*10 ⁻¹⁸
	P266-2/2	1,32	1,38	1,35	senkrecht	8*10 ⁻²¹
	P266-2/3	2,34	2,38	2,36	parallel	9*10 ⁻²⁰
	P266-2/4	2,27	2,33	2,30	senkrecht	2*10 ⁻²⁰
B44	P266-3/1	1,25	1,29	1,27	parallel	2*10 ⁻¹⁸
	P266-3/20	0,93	0,97	0,95	parallel	1*10 ⁻¹⁹
	P266-3/21	1,15	1,21	1,18	senkrecht	2*10 ⁻²⁰

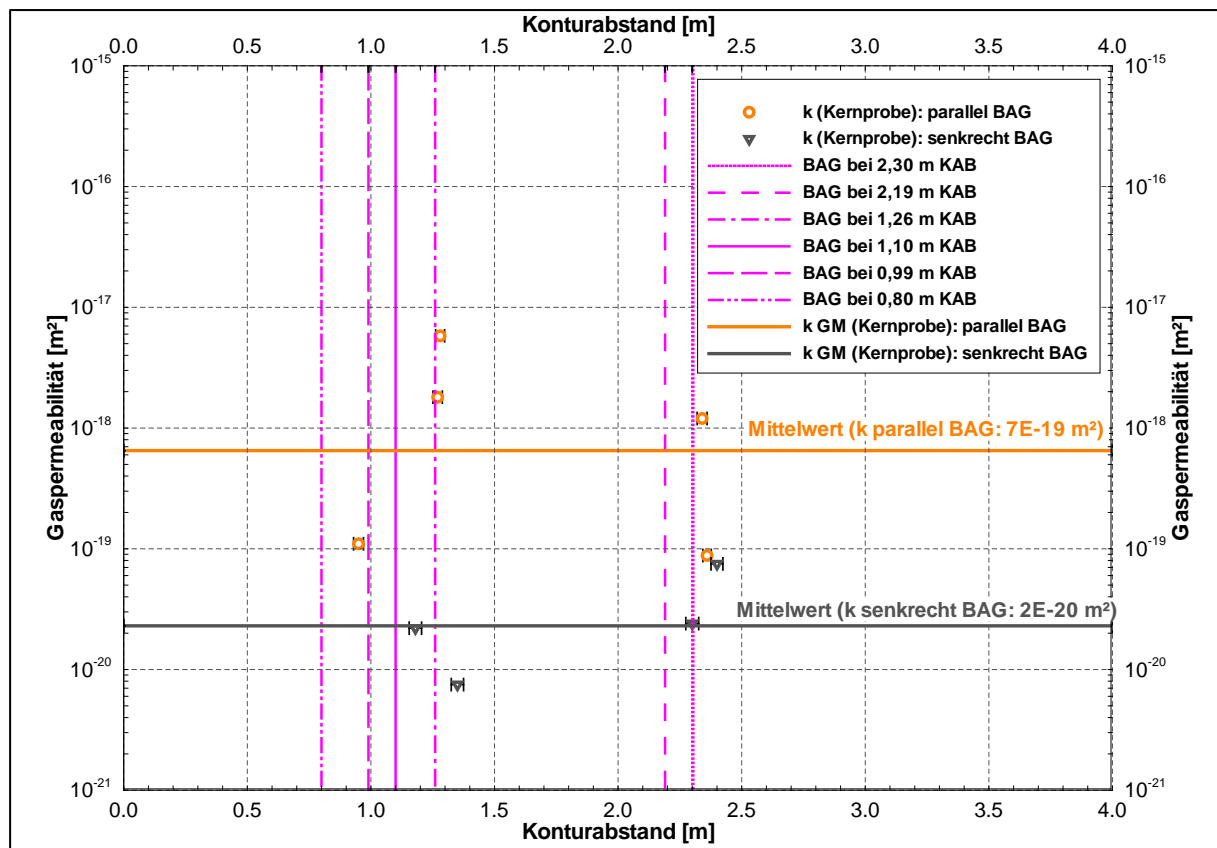


Abbildung 68: Gaspermeabilität von Kernproben aus den Bohrungen B40, B41 und B44

4.2.3 Permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial mit Lösung

In Tabelle 26 sind die Ergebnisse der 8 **Lösungsp permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial** der Bohrkern aus den Bohrungen B40 und B41 zusammengefasst. Analog zu Untersuchungen mit Gas wurde wieder zwischen Untersuchungen mit Strömung parallel und senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen unterschieden.

Die Lösungsp permeabilität beträgt bei allen untersuchten 8 Proben zwischen 1*10⁻²⁰ m² und 2*10⁻¹⁹ m². 4 Proben wurden parallel und 4 Proben senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen durchströmt.

Im Vergleich der Gaspermeabilität mit der Lösungspereabilität am Kernmaterial deutet sich an, dass bei Lösungsangriff der Unterschied in der Permeabilität von Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht und von Proben mit Betonierabschnittsgrenzen kleiner ist als bei den Permeabilitätsuntersuchungen mit Gas (Abbildung 69). Eine Ursache dafür kann aus den Versuchen nicht abgeleitet werden. Die Permeabilität für Lösung ist in beiden Orientierungsrichtungen kleiner $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ und damit gering. Es ist zu vermuten, dass es infolge der Wechselwirkungen zwischen Versuchslösung und Feststoff zu einer Veränderung des Porengefüges und infolgedessen zu einer generell geringeren Permeabilität kommt. Das Gas kann für die Versuchsdauer als inert gegenüber dem Feststoffgefüge angesehen werden. Dies ist möglicherweise eine Ursache für den deutlich größeren Wertebereich der Gaspermeabilität.

Der Unterschied zwischen den (geometrischen) Mittelwerten der Permeabilität bei Durchströmung parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen und bei Durchströmung senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen ist sehr gering:

- a) Mittelwert der Permeabilität im Bereich der Betonierabschnittsgrenzen: $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$;
- b) Mittelwert der Permeabilität im Inneren der Spritzschichten: $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$.

Das geometrische Mittel über alle Proben (Messungen parallel und senkrecht zu Betonierabschnittsgrenzen) beträgt $4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Bei den Kernproben ist die Permeabilität mit Lösung bei Proben aus dem Inneren einer Spritzbetonschicht in der gleichen Größenordnung wie die Permeabilität bei Proben mit Betonierabschnittsgrenzen.

Tabelle 26: Ergebnisse der Lösungspereabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial

Bohrung	Probenbezeichnung	Teufe OK	Teufe UK	Teufe MP	Orientierung zu BAG	Lösungspermeabilität
-	-	[m v. AP]	[m v. AP]	[m v. AP]	-	[m ²]
B40	P266-1/1	1,26	1,30	1,28	parallel	$4 \cdot 10^{-20}$
	P266-1/2	1,21	1,25	1,23	senkrecht	$1 \cdot 10^{-20}$
	P266-1/3	2,32	2,36	2,34	parallel	$4 \cdot 10^{-20}$
	P266-1/4	2,38	2,42	2,40	senkrecht	$3 \cdot 10^{-20}$
B41	P266-2/1	1,26	1,30	1,28	parallel	$4 \cdot 10^{-20}$
	P266-2/2	1,32	1,38	1,35	senkrecht	$9 \cdot 10^{-20}$
	P266-2/3	2,34	2,38	2,36	parallel	$2 \cdot 10^{-20}$
	P266-2/4	2,27	2,33	2,30	senkrecht	$2 \cdot 10^{-19}$

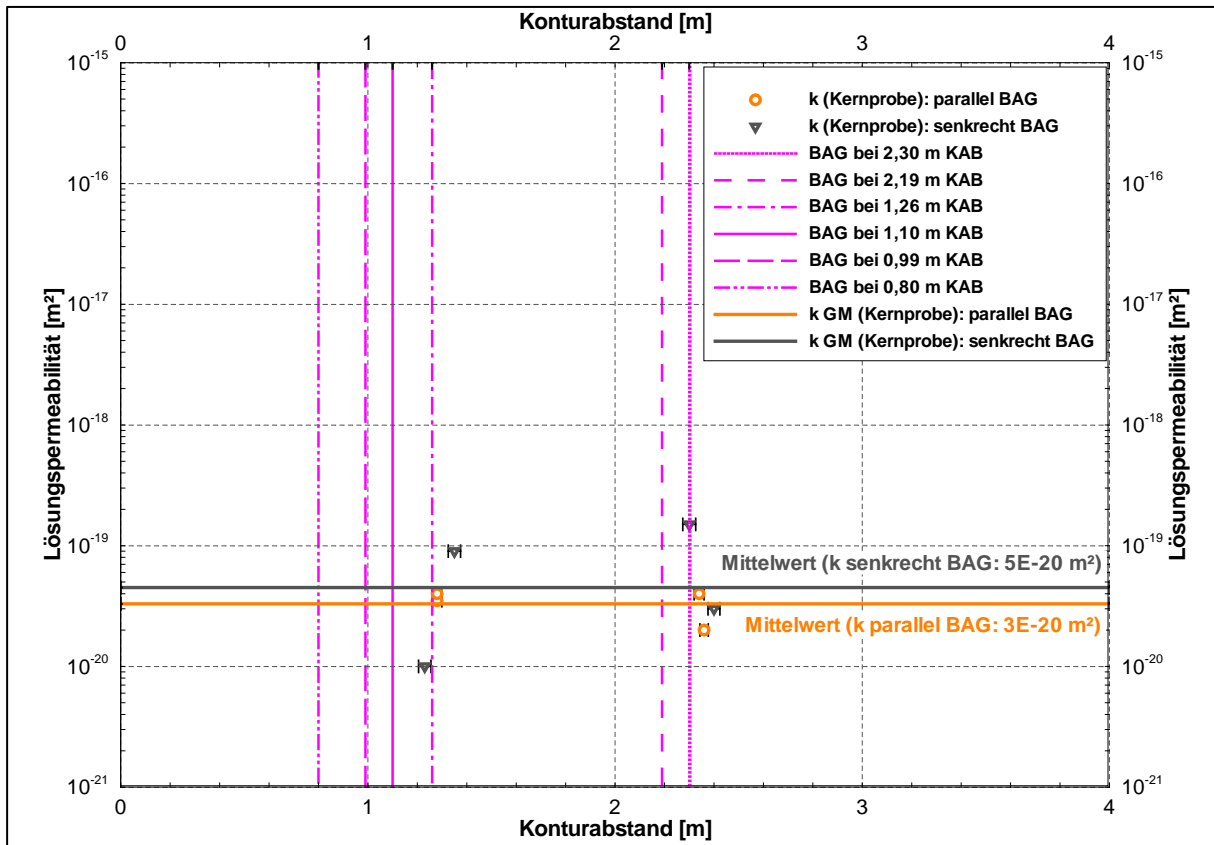


Abbildung 69: Lösungspermeabilität von Kernmaterial aus den Bohrungen B40 und B41

4.2.4 In-situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Lösung

Die in situ Lösungspermeabilität wurde in den Bohrungen B40 und B41 bestimmt. Um beurteilen zu können, wie sich die Lösungspermeabilität in dem MgO-Baustoff über die Zeit entwickelt, wurden die beiden Bohrungen mit Lösung befüllt und analog zu den Messpunkten MP5 der in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen die Lösungspermeabilität bestimmt. In der Bohrung B40 wurde eine reine, gesättigte NaCl-Lösung (Lösung 1) verwendet, in der Bohrung B41 eine NaCl-gesättigte, $MgCl_2$ -haltige Lösung (Lösung 2). Um eine bestmögliche Aufsättigung des Strömungsraums zu erreichen, stand die Lösung nach der Befüllung der Bohrlöcher 57 bzw. 58 Tage im Bohrloch, bevor zum ersten Mal die Lösungspermeabilität ermittelt wurde. In dieser Zeit konnte allerdings die Lösung bereits mit dem MgO-Beton reagieren, sofern eine Reaktion stattfand. Die Messungen wurden 155 Tage, 267 Tage und 602 Tage nach der Bohrungsbefüllung wiederholt. Der verwendete Fluidruck betrug bei den ersten drei Messungen zwischen 0,26 MPa und 0,37 MPa. Für die vierte Messung wurde der Fluidruck auf über 0,9 MPa erhöht.

In den Zeiten, in denen keine In-situ-Permeabilitätsuntersuchungen in den beiden Bohrungen durchgeführt wurden, standen die Lösungen in den Bohrungen B40 und B41 unter einem Druck von ca. 0,3 MPa bzw. ca. 0,4 MPa.

In Tabelle 27 sind die Ergebnisse der Lösungspermeabilitätsuntersuchungen aufgeführt. In der Abbildung 70 ist sowohl die ermittelte in situ-Lösungspermeabilität in Abhängigkeit von der Zeit nach der Bohrungsbefüllung mit Lösung als auch zum Vergleich die für den Messpunkt MP5 ermittelte in situ-Gaspermeabilität dargestellt.

Die integrale Lösungspermeabilität im Messpunkt 5 (von 0,5 m bis zur Endteufe in 3,65 m) 57 Tage nach der Befüllung von B40 mit reiner, gesättigter NaCl-Lösung (rote Kreise in Abbildung 70) ist mit $6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ im Vergleich zur integralen Gaspermeabilität ($k_{\text{Gas}} = 1,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$) etwas geringer.

Die Messungen wurden 155 Tage, 267 Tage und 602 Tage nach der Befüllung wiederholt. Zwischen den In-situ-Permeabilitätsuntersuchungen wurde Lösung in die Bohrungen injiziert, um den Flüssigkeitsdruck konstant zu halten. In dem Zeitraum zwischen 267 und 602 Tagen nach der Bohrungsbefüllung gelang es, den Druck in den Bohrungen auf einem Niveau von ca. 3 bar bzw. ca. 4 bar nahezu konstant zu halten (Abschnitt 4.2.5). Wie die Abbildung 70 zeigt, reduzierte sich die Lösungspermeabilität über den Gesamtzeitraum, in dem die Bohrungen unter Lösung standen, um ca. eine halbe Zehnerpotenz von $6,0 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ auf $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Die Ergebnisse der Bestimmung der Permeabilität für gesättigte NaCl-Lösung mit MgCl_2 (Lösung 2) in der Bohrung B41 (blaue Quadrate in Abbildung 70) sind den Ergebnissen in der Bohrung B40 ähnlich. Die Permeabilität hat sich von $6,0 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ auf $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ reduziert, obwohl bei der Wiederholungsmessung nach 602 Tagen der Prüfdruck auf ca. 0,9 MPa erhöht wurde.

Setzt man die ohnehin schon geringe in situ-Gaspermeabilität am Messpunkt MP5 von $1,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ (B40) bzw. $2,1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ (B41) als Ausgangspermeabilitätsniveau an, ergibt sich über die Zeit des Lösungsangriffs in den Bohrungen eine maximale Permeabilitätsverringerung um ca. eine Zehnerpotenz auf $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (B40) bzw. $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (B41). Dabei liegt die Lösungspermeabilität in situ in der gleichen Größenordnung wie die an Kernmaterial ermittelte Lösungspermeabilität ($1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen bzw. $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen, Abschnitt 4.2.3).

Tabelle 27: Ergebnisse der in situ-Lösungspermeabilitätsuntersuchungen in B40 und B41 mit Lösung 2

Bohrung	Messpunkt	Bezeichnung	Messdatum	Tage nach Lösungs-befüllung	Prüfdruck	Teufe OK	Teufe UK	Teufen MP	Lösungs-permea-bilität
B40	MP5	B40-050-INT-0L9	24.11.2016	57	0,37	0,49	3,58	2,03	$6 \cdot 10^{-20}$
	MP5	B40-050-INT-1L9	02.03.2017	155	0,36	0,49	3,58	2,03	$2 \cdot 10^{-20}$
	MP5	B40-050-INT-5L3	22.06.2017	267	0,33	0,49	3,58	2,03	$3 \cdot 10^{-20}$
	MP5	B40-050-INT-9L4	24.05.2018	602	0,94	0,49	3,58	2,03	$1 \cdot 10^{-20}$
B41	MP5	B41-050-INT-0L9	25.11.2016	58	0,35	0,49	3,63	2,06	$7 \cdot 10^{-20}$
	MP5	B41-050-INT-1L10	02.03.2017	155	0,26	0,49	3,63	2,06	$2 \cdot 10^{-20}$
	MP5	B41-050-INT-5L3	22.06.2017	267	0,27	0,49	3,63	2,06	$3 \cdot 10^{-20}$
	MP5	B41-050-INT-9L4	24.05.2018	602	0,92	0,49	3,63	2,06	$3 \cdot 10^{-20}$

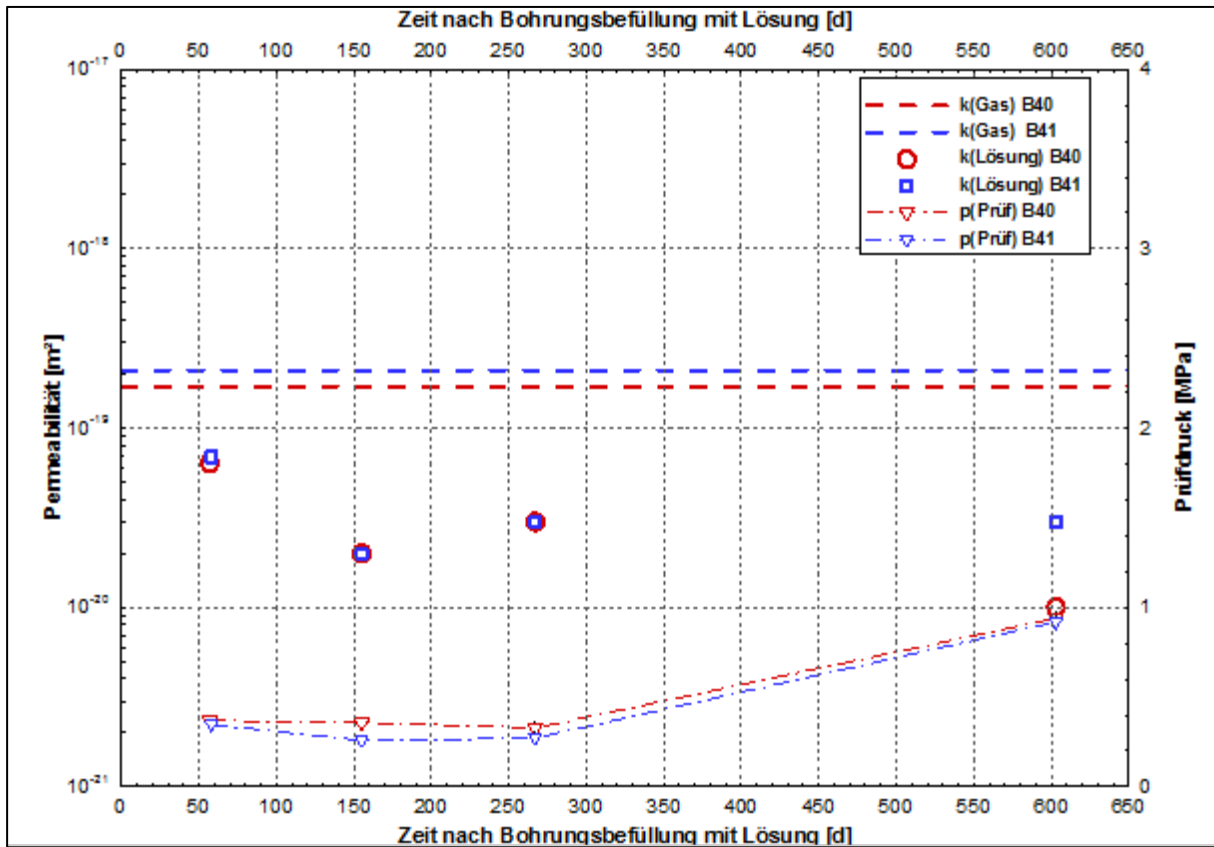


Abbildung 70: Entwicklung der Permeabilität mit Lösung 2 in Abhängigkeit von der Zeit (Messung der Gaspermeabilität vor der Befüllung des Bohrloches).

Ursächlich für die in den Bohrungen B40 und B41 nachgewiesene Permeabilitätsreduzierung in Abhängigkeit von der Dauer des Lösungsangriffs ist die Porenraumveränderung durch Umkristallisation von MgO und metastabilen Sorelphasen zur langzeitbeständigen 3-1-8-Sorelphase unter Volumenzunahme bei Zutritt einer MgCl₂-haltigen Lösung.

4.2.5 Bewertung der Druckhaltephase mit Lösung

Wie im Abschnitt 4.2.4 beschrieben, wurden die Bohrungen B40 und B41 einem Lösungsangriff bei einem Druckniveau von ca. 0,3 MPa bzw. ca. 0,4 MPa vom 22.06.2017 bis zum 23.05.2018 über einen Zeitraum von ca. 335 Tagen (ca. 11 Monate) ausgesetzt. Zu diesem Zweck wurden Druckregelanlagen eingesetzt (Abbildung 71).



Abbildung 71: Mobile Druckregelanlagen für einen Lösungsangriff mit konstantem Druck

Für die **Bohrung B40** (Lösung 1 = reine, gesättigte NaCl-Lösung) konnte der Flüssigkeitsdruck über 335 Tage nahezu konstant gehalten werden (Abbildung 72).

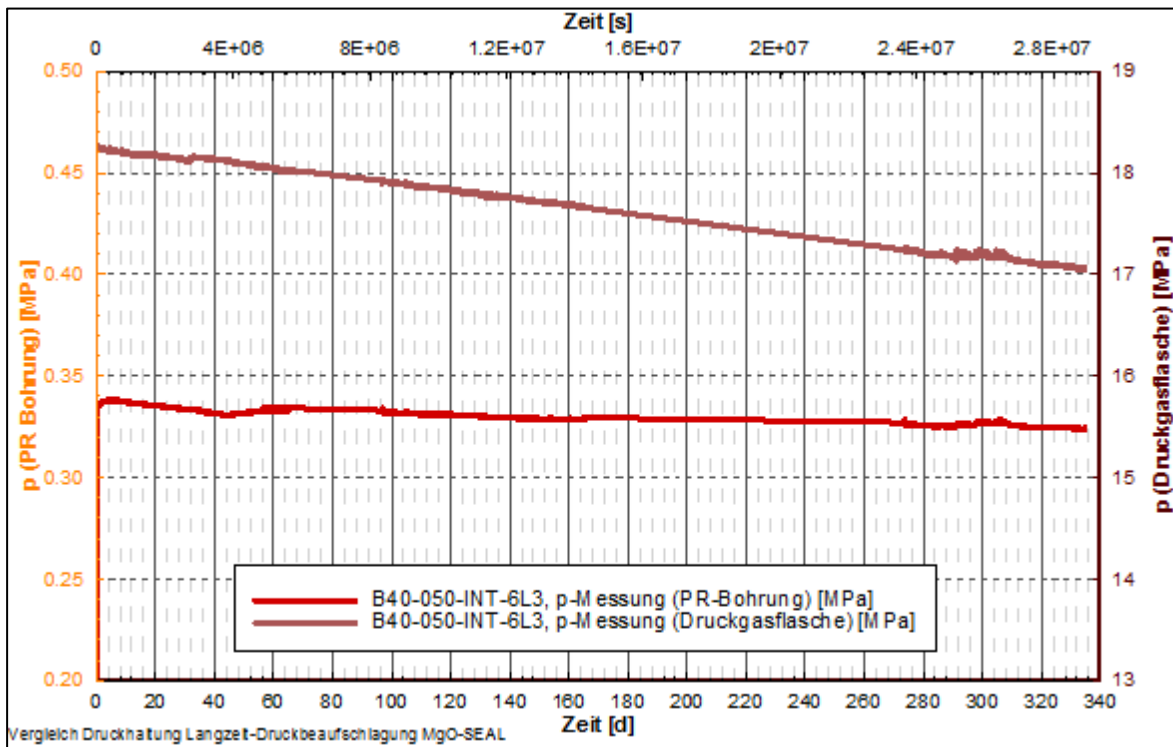


Abbildung 72: Druckhaltephase von 267 d bis 602 d nach Befüllung (B40)

Wie die Abbildung 72 zeigt, schwankte der Flüssigkeitsdruck vom 22.06.2017 bis zum 23.05.2018 in der Bohrung B40 lediglich im Bereich von 0,324 MPa bis 0,338 MPa ($\Delta p = 0,014$ MPa) über die Zeit von 335 d. Bei den Druckschwankungen spielen zum Teil auch die Temperatur der Grubenwetter, insbesondere während der Arbeiten im Zuge der Überbohrung (Durchmesser 300 mm) von Bohrung B34 (Abbildung 73), eine Rolle.

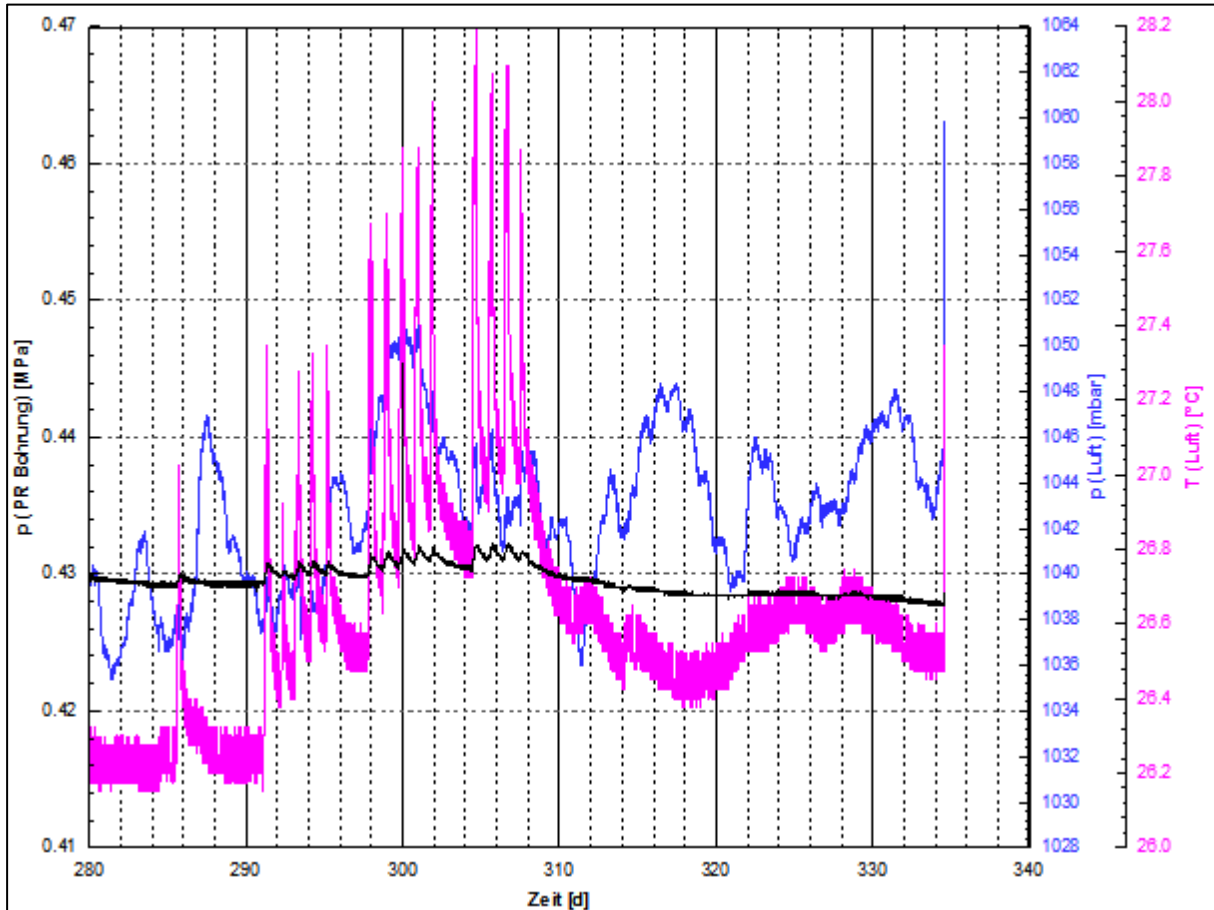


Abbildung 73: Temperatur und Luftdruck am Versuchsort während der Druckhaltephase in Bohrung B40

Die Druckschwankungen zwischen 280 d und 320 d korrelieren mit Temperaturschwankungen zwischen 26,2 °C und 28,2 °C (Abbildung 73).

Der Druckabfall in der Gasdruckflasche während der Druckhaltephase (nahezu konstanter Flüssigkeitsdruck) in Abbildung 72 wurde für eine Abschätzung des injizierten Flüssigkeitsvolumens benutzt. Demnach würde über den Zeitraum von 335 d ein Flüssigkeitsvolumen von ca. 2,5 l injiziert. Daraus wurde ein Volumenstrom von ca. 0,3 ml/h bzw. ca. $5 \cdot 10^{-6}$ l/min berechnet. Dieser sehr geringe Volumenstrom bestätigt die im Abschnitt 4.2.4 gemessene geringe Permeabilität in der Bohrung B40. Für den Mittelwert der mittels Quecksilberporosimetrie (Trocknung bei 25°C und $F_R = 32,5$ %; kleines Dilatometer) bestimmten Porosität ($\bar{n}_{Hg} = 0,044$) würde sich theoretisch eine radiale Eindringtiefe von ca. 8,1 cm integral über das Testintervall ergeben. In der Realität wird die durch den Rückbau (Überbohren von B40) ermittelte Eindringtiefe aufgrund einer inhomogenen k- und/oder n-Verteilung im Testintervall sowie einem möglichen Lösungsverbrauch durch Phasenumwandlungen von diesem theoretisch ermittelten Wert abweichen.

Für die **Bohrung B41** (Lösung 2 = gesättigte NaCl-Lösung mit $MgCl_2$) konnte der Flüssigkeitsdruck über einen Zeitraum von ca. 160 Tagen nahezu konstant gehalten werden (Abbildung 74).

Der Flüssigkeitsdruck in der Bohrung B41 schwankte zwischen dem 22.06.2017 und dem 29.11.2017 lediglich im Bereich von 0,383 MPa bis 0,391 MPa ($\Delta p=0,008$ MPa) über den Zeitraum von ca. 160 d, wie die Abbildung 74 zeigt. Aufgrund technischer Schwierigkeiten mit der entsprechenden Druckregelanlage musste die Langzeit-Druckbeaufschlagung der Bohrung B41 nach ca. 160 d abgebrochen werden, da sich der Druck nicht mehr konstant halten ließ. Auf eine Abschätzung des injizierten Flüssigkeitsvolumens wurde verzichtet, da es auch technische Probleme mit der Gasdruckflasche gab.

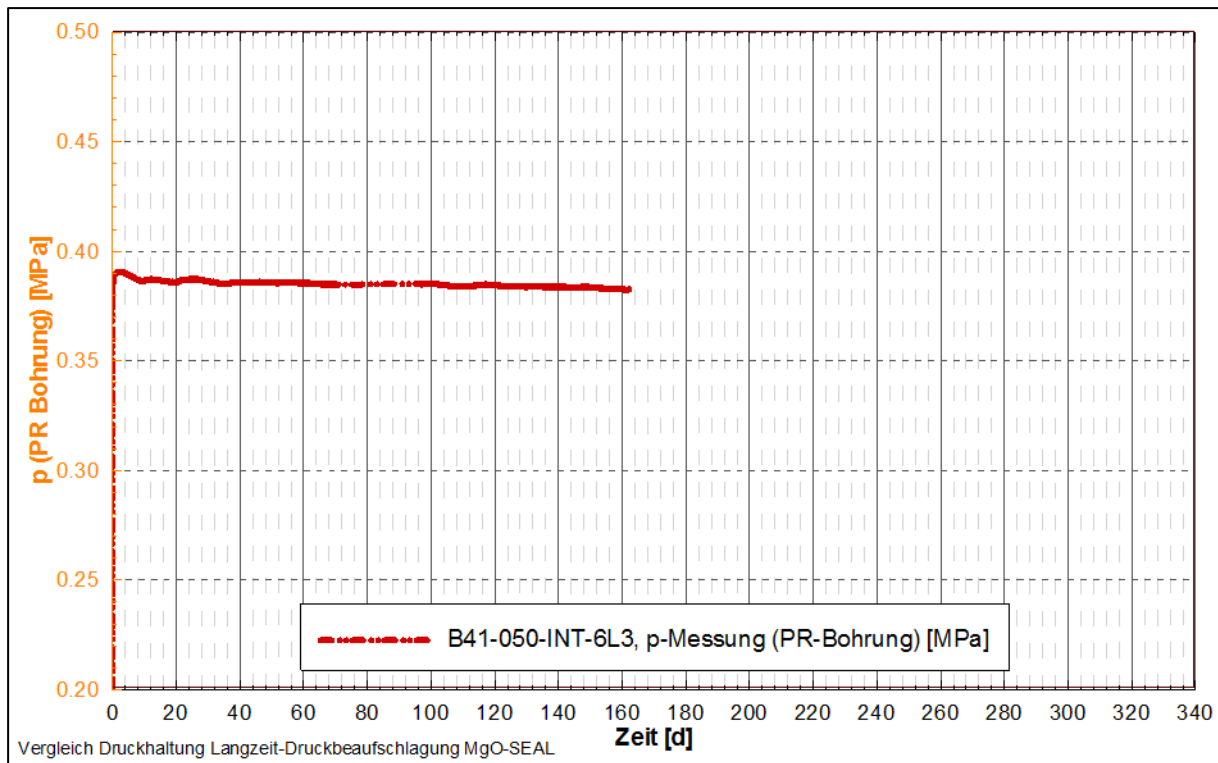


Abbildung 74: Druckhaltephase von 267 Tagen bis 427 Tagen nach Befüllung (B41)

4.2.6 Ultraschall-Messungen zur Identifikation von Betonierabschnittsgrenzen

Am 23.10.2017 wurden Ultraschallmessungen von der luftseitigen Ortsbrust des GV2 durch die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Abteilung 8.2: Zerstörungsfreie Schadensdiagnose/Non-Destructive Damage Analysis, durchgeführt. Hierbei sollte geprüft werden, ob zwischen den Betonierabschnittsgrenzen „Defekte“ vorhanden sind, die die Festigkeit und die Permeabilität des Bauwerkes negativ beeinflussen können. Weiterhin wurde getestet, ob Ultraschallmessungen zur Qualitätskontrolle bei MgO-Beton geeignet sind.

Für die Ultraschallmessungen wurden sowohl das Ein-Kanal-Gerät ACS A1220 Transvisor und das Mehr-Kanal-Gerät ACS A1040 Mira verwendet. Auf zwei Flächen mit einer Fläche von je etwa 0,5 m² konnten Messungen bis eine Tiefe von 1 m in das Bauwerk ausgeführt werden. Diese orientierenden Messungen stellen Voruntersuchungen dar, die durch umfangreichere Untersuchungen mittels *Large Aperture UltraSound Apparatur* (LAUS-Apparatur) verifiziert werden sollen.

Im Zuge der Planung der Überbohrung der Bohrung B34 (Altbohrung aus CARLA 2, siehe Abschnitt 4.1) wurden die Ergebnisse aus den Ultraschallmessungen herangezogen und mit den Betonierabschnittsgrenzen im Bauwerksbereich von 0 m bis ca. 4 m verglichen. In der Abbildung 75 sind die festgestellten Ultraschall-Reflexionen den Betonierabschnittsgrenzen gegenübergestellt. In der Abbildung 75 sind die Lagebeziehungen sowohl im Blockbild (A) als

auch im Horizontalschnitt (B) und Vertikalschnitt (C) zu sehen. Wie im Vertikalschnitt (C) zu erkennen ist, fallen Reflektorsignale bei ca. 0,29 m und ca. 0,73 m mit Betonierabschnittsgrenzen zusammen (blau markiert in Abbildung 75 C). Dies könnte ein Indiz für lokal auf diesen Betonierabschnittsgrenzen auftretende Bereiche mit verminderter Festigkeit und/oder mit erhöhter Permeabilität sein.

Zusätzlich sind die Bohrungsspuren B34, B40 und B41 dargestellt. Da der Vertikalschnitt nicht direkt im Bereich der Bohrungen aufgenommen wurde, sind die Reflektorsignale nicht direkt auf die Bereiche der Bohrungen übertragbar. Eine Verifizierung mittels LAUS-Apparatur im Bereich der zu überbohrenden Bohrungen wurde geplant.

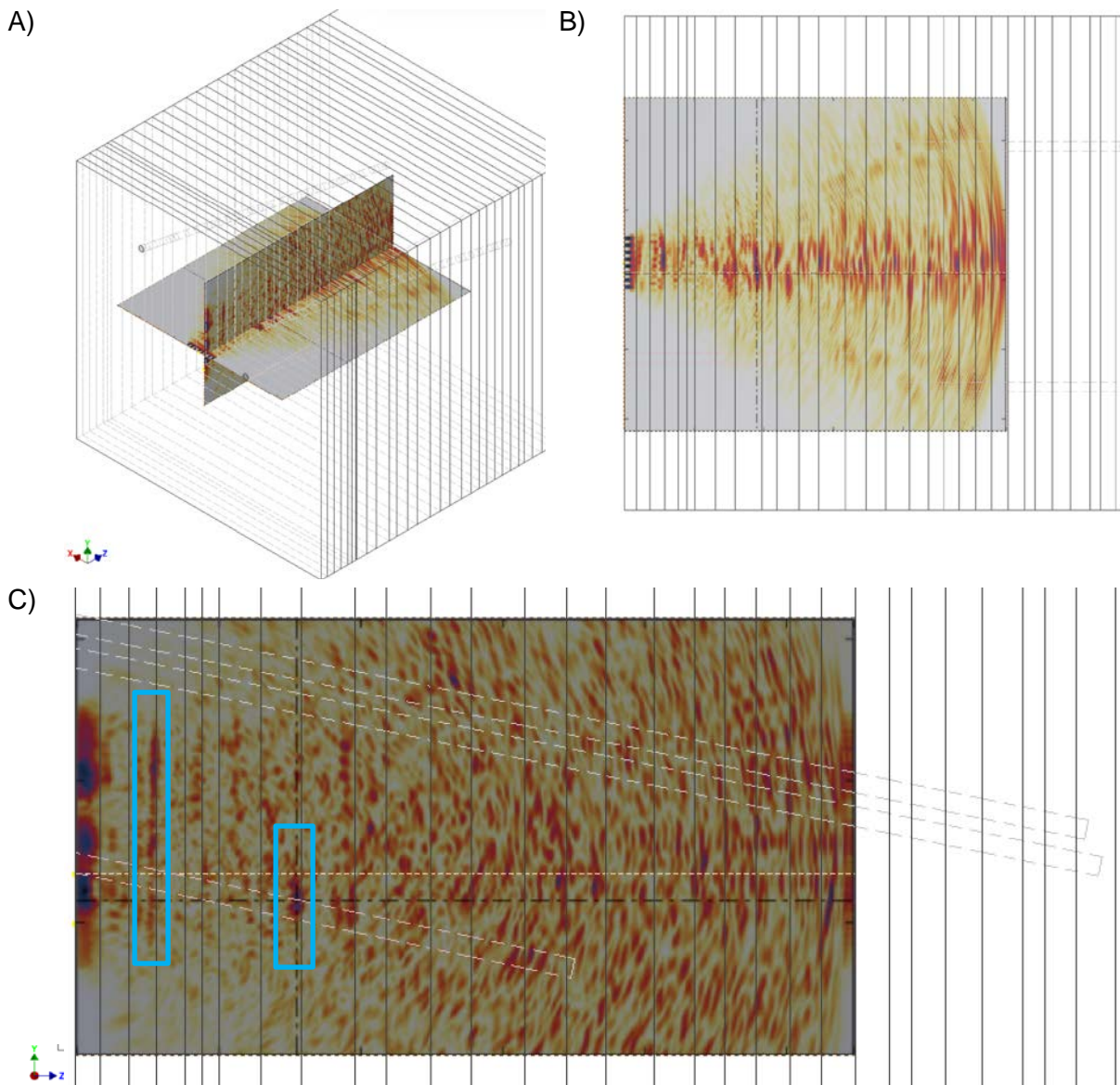


Abbildung 75: Orientierende Ultraschalluntersuchungen und Lagebeziehungen zu Betonierabschnittsgrenzen (senkrechte Linien = Betonierabschnittsgrenzen; farbig = Reflexionen der Ultraschallmessungen; schräge gestrichelte Linien = Bohrungsverlauf B34, B40, B41)

4.3 Permeabilitätsuntersuchungen an den Bohrungen B38 und B39 sowie an Kernmaterial aus der B42

4.3.1 Permeabilitätsuntersuchungen am Bohrkern der B42

Die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Messungen zum Einfluss von Betonierabschnittsgrenzen wurden jeweils an zylindrischen Probekörpern durchgeführt, die entweder senkrecht bzw. parallel zu einer Betonierabschnittsgrenze gebohrt waren. Im Ergebnis zeigte sich, dass zylindrische Proben, die parallel zu einer Betonierabschnittsgrenze erbohrt wurden, eine etwa um den Faktor 35 höhere Permeabilität hatten als Proben, die senkrecht zu einer Betonierabschnittsgrenze erbohrt wurden. Dabei war jedoch keine exakte Untersuchung der diskreten Betonierabschnittsgrenze in der Probe möglich, da nur ein Mittelwert über die gesamte Probe bestimmt wurde.

Weiterhin sollten im Dammkörper von GV2 Drucktests mittels Lösung durchgeführt werden, wobei bisher keine Kenntnisse zur hydraulischen Aufreißfestigkeit und damit zu einem zulässigen Maximaldruck eines gering eingespannten Probekörpers vorlagen. Zur genaueren Untersuchung beider Fragestellungen wurden vom IfG weitere Laboruntersuchungen an zwei Proben als Indexversuche mit einer etwas aufwändigeren Versuchstechnik durchgeführt.

Permeabilitätsuntersuchungen senkrecht und parallel zu Betonierabschnittsgrenzen

Zur Untersuchung der möglichen Effekte von Betonierabschnittsgrenzen wurde ein Kernstück zunächst konventionell axial senkrecht zur Betonierabschnittsgrenze, d.h. integral mit Gas beaufschlagt. In einem zweiten Versuch in derselben Probe wurde über eine Zentralbohrung der Gasdruck lokal direkt auf die einzelne Betonierabschnittsgrenze eingeleitet und der radiale Gasdurchtritt beobachtet. Die jeweils verwendete Versuchsanordnung mit dem analytischen Auswerteverfahren für Permeabilitätsmessungen mit Gas ist schematisch in Abbildung 76 dargestellt.

Es wurden zwei Kernproben (TC PE1 und 2) in der axialen Versuchsanordnung vermessen, wobei jeweils senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen trotz Injektionsdrücken, die in der Größenordnung des Einspannungsdruckes lagen ($p_{\text{Gas}} \approx 80 \text{ bar}$, $\sigma_1 = \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$), kein Gasdurchgang bestimmbar war (siehe Abbildung 77). Die Gaspermeabilität war damit kleiner 10^{-20} m^2 . Bei radialer Durchströmung wurde eine Permeabilität in der Größenordnung von $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ gemessen. Der Unterschied in der Permeabilität betrug damit etwa Faktor 500. Dies unterstreicht die Relevanz der Betonierabschnittsgrenzen als potenzielle hydraulische Schwächefläche. Es sei allerdings hinzugefügt, dass nur zwei Proben untersucht werden konnten.

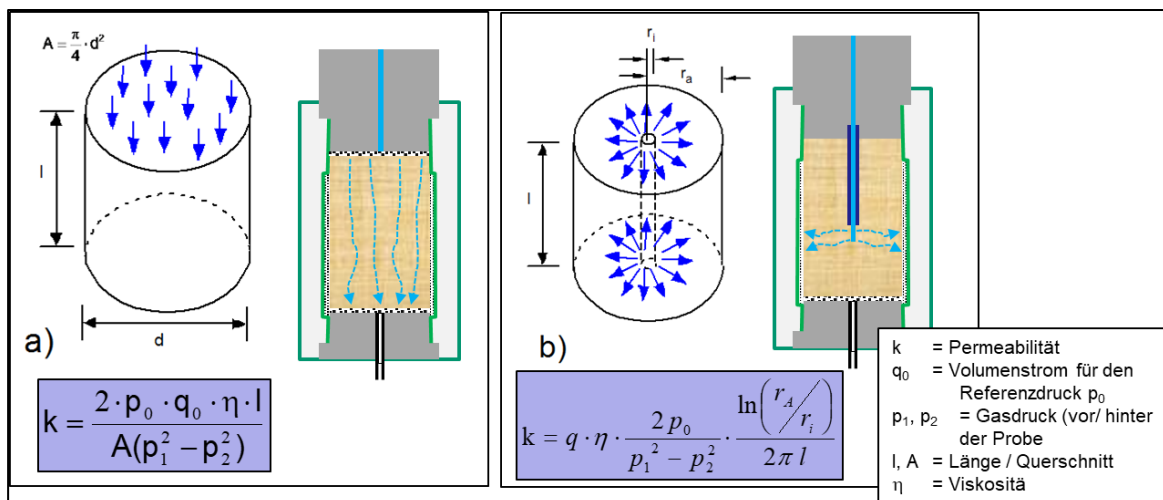


Abbildung 76: Versuchsanordnung und Bestimmung der Gaspermeabilität bei (a) axialer und (b) radialer Durchströmung.

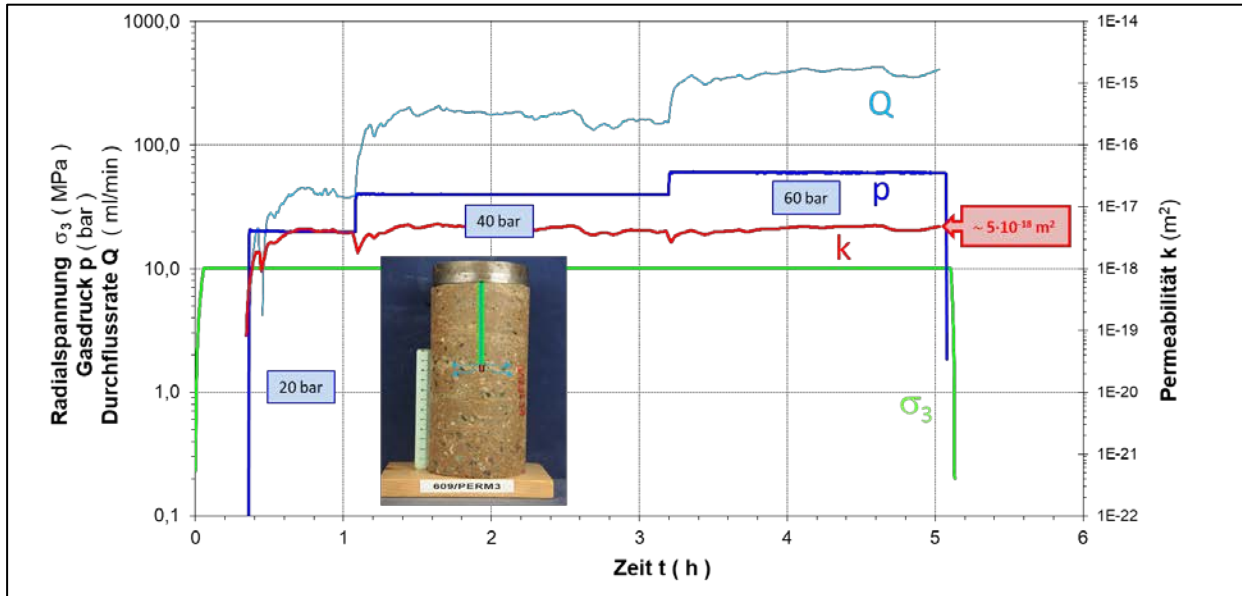


Abbildung 77: Gaspermeabilität einer Betonierabschnittsgrenze bei direkter, radialer Injektionsgeometrie (TC PE2).

Untersuchung der hydraulischen Aufreißfestigkeit

Zur Untersuchung der hydraulischen Aufreißfestigkeit wurde eine Probe ebenfalls radial durchströmt. Allerdings wurde als Injektionsfluid eine gesättigte MgCl_2 -Lösung verwendet, die über einen Trennkolben mittels eines QUIZIX-Pumpensystems druckbeaufschlagt wurde. Der Druck wurde punktuell über ein eingeklebtes Hydraulikrohr in einem freien Bohrlochsegment von ca. 1 cm Höhe und 0,5 cm Durchmesser eingeleitet. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 78 (li.) dargestellt.

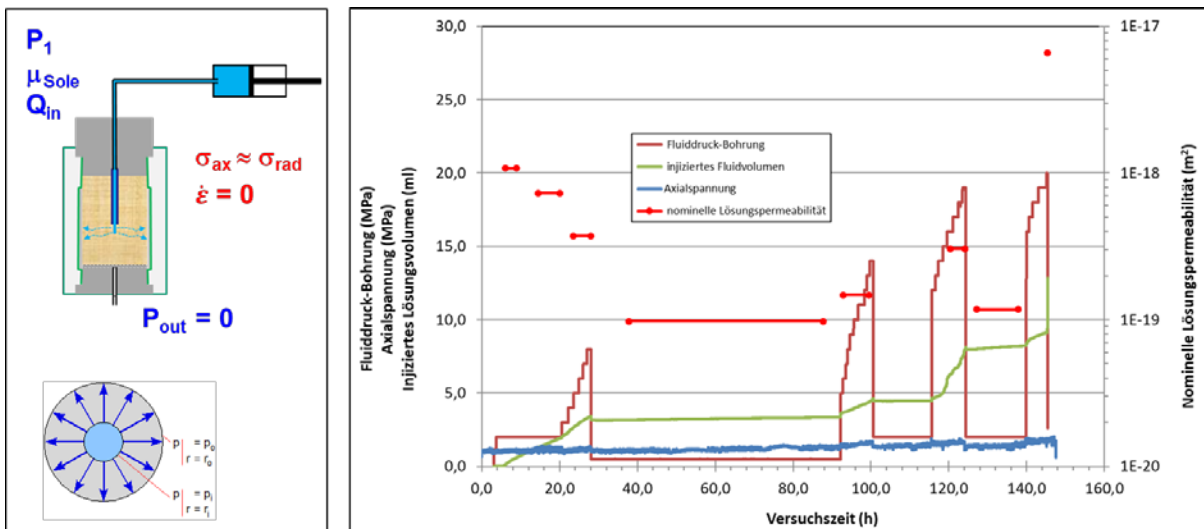


Abbildung 78: Permeabilitätstest mit Gas (TC PE3 bzw. fortgesetzt als Fracversuch mit Salzlösung) bei radialer Durchströmung an einer Betonierabschnittsgrenze; (li.) Versuchsgometrie und Auswertung; (re.) Schrittweise Druckbeaufschlagung unter quasi-isostatischer Einspannung.

Im Ausgangszustand wurde zunächst die Gas-Permeabilität der Betonierabschnittsgrenze in der Größenordnung von $k_{\text{Gas}} \approx 3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ gemessen (hier nicht dargestellt). Durch die Änderung des Injektionsmediums zu (NaCl-gesättigter) MgCl_2 -haltiger Lösung (Lösung 2) ergab sich eine Anfangspermeabilität von $k_{\text{MgCl}_2\text{-Lösung}} \approx 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Dieses Ergebnis ist zunächst vergleichbar mit der Gas-Permeabilität.

Danach wurde der Versuch als Frac-Versuch mit der Zielsetzung „Aufreißen des Baustoffs mit Überschreitung der Einspannung durch Erhöhung des Injektionsdruckes“ fortgesetzt. Die Radialspannung betrug konstant 0,5 MPa und die Axialspannung variierte gering in der gleichen Größenordnung, weil als Regelgröße der Weg konstant gehalten wurde. Es wurden in einem Zeitraum von ca. 6 Tagen vier Injektionstests durchgeführt, wobei jeweils der Druck stufenweise erhöht wurde ($p_{\text{max I}} = 8 \text{ MPa}$, $p_{\text{max II}} = 14 \text{ MPa}$, $p_{\text{max III}} = 19 \text{ MPa}$ und $p_{\text{max IV}} = 20 \text{ MPa}$).

Zunächst überraschend, ergab sich im ersten Zyklus scheinbar unabhängig vom Injektionsdruck eine Abnahme der Injektionsrate, die einer Permeabilitätsabnahme auf $k_{\text{MgCl}_2\text{-Lsg}} \approx 1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ entsprach. Hier, wie auch in den später folgenden Zyklen, gelang es trotz stufenweiser Erhöhung des Injektionsdrucks auf bis zu $\leq 20 \text{ MPa}$ nicht, den Baustoff hydraulisch aufzureißen. Die Druckerhöhung war jeweils mit einer druck-proportionalen Zunahme der Injektionsrate verbunden. Erst in der letzten Druckstufe bei $p_{\text{max IV}} = 20 \text{ MPa}$ ergab sich eine signifikante Zunahme der Permeabilität bis auf $k_{\text{MgCl}_2\text{-Lösung}} \approx 7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

Die Erklärung dieser hohen Aufreißfestigkeit ist nicht einfach und spiegelt offenbar einen Skaleneffekt wider. Da die Injektion nur in einem sehr kleinen Probenvolumen (5 mm Zentralbohrung mit 10 mm Höhe) erfolgte, kommt es offenbar im Umfeld der druckbeaufschlagten Bohrung wegen der geringen Permeabilität des Baustoffes zu einer Gefügeverdichtung, die den hydraulischen Druckanstieg quasi abpuffert. Erst bei Injektionsdrücken $> 14 \text{ MPa}$ war eine Zunahme der Injektionsrate infolge Gefügeaufweitung nachweisbar. Obwohl dieser Prozess möglicherweise skalenabhängig ist (z.B. Aufreißen entlang von Schwächeflächen), wurde gezeigt, dass ein Risiko eines hydraulischen Frackings des Dammkörpers bei den hier im Bohrloch realisierten Fluidrücken ($\leq 5 \text{ MPa}$) praktisch ausgeschlossen war.

Weiterhin bemerkenswert ist, dass die Lösungspereabilität stetig abnahm, was auf eine mögliche „Selbsteilung bei Durchströmung“ der Betonierabschnittsgrenze hindeutet.

Die Laborergebnisse in Relation zu den in situ-Permeabilitätsmessungen werden in Abschnitt 4.3.4 abschließend bewertet.

4.3.2 Messungen der Lösungspereabilität in situ mit 6 m Messtrecke

Zielstellung der **In-situ-Messungen** war vorrangig, die integrale Lösungspereabilität sowie deren zeitliche Änderung im Langzeitversuch zu bestimmen, wenn die Lösung 1 und die Lösung 2 verwendet wird. In den zwei 6,0 m langen Bohrungen B38 und B39 wurde über mehrere Monate die Lösungspereabilität zeitabhängig gemessen. In der Bohrung B38 wurde die Lösung 1 (gesättigte NaCl-Lösung) und in der Bohrung B39 die Lösung 2 (NaCl-gesättigte, MgCl_2 -haltige Lösung) verwendet.

In Abbildung 79 ist die Position der Bohrungen an der Ortsbrust, die Seitenansicht des Dammes mit der Lage der Bohrungen und der Betonierabschnittsgrenzen sowie die Packeranordnung im Bohrloch dargestellt. Die geneigten Bohrungen reichen bis in den Bereich des Zahns. Hier wurden durch die Kamerabefahrung und die Ultraschalluntersuchungen lokal Bereiche identifiziert, die eventuell hinsichtlich der Permeabilität und/oder Festigkeit „auffällig“ sind (siehe Abschnitt 3.2).

Erste Befüllung der Bohrungen B38 und B39 mit Lösung 1 und Lösung 2

Die Bohrungen wurden am 10.06.2016 mit jeweils ca. 7 L der entsprechenden Versuchslösung befüllt und drucklos stehengelassen. Bei der Inspektion am 22.06.2016 war der Lösungspegel in beiden Bohrungen erheblich gesunken, woraufhin jeweils ca. 5 L Lösung nachgefüllt wurden.

Ausgehend von der Annahme, dass die Lösungsverluste mutmaßlich durch lokale „Fehlstellen“ im Bereich des Bauwerkzahns verursacht waren, wurden zusätzlich noch abschnittsweise in beiden Bohrungen die Permeabilität mit einem Doppelpackersystem gemessen. Die Messungen zielten darauf ab, die Permeabilität im Inneren einer Spritzschicht (also ohne Betonierabschnittsgrenzen) zu bestimmen (s. Abschnitt 4.3.3).

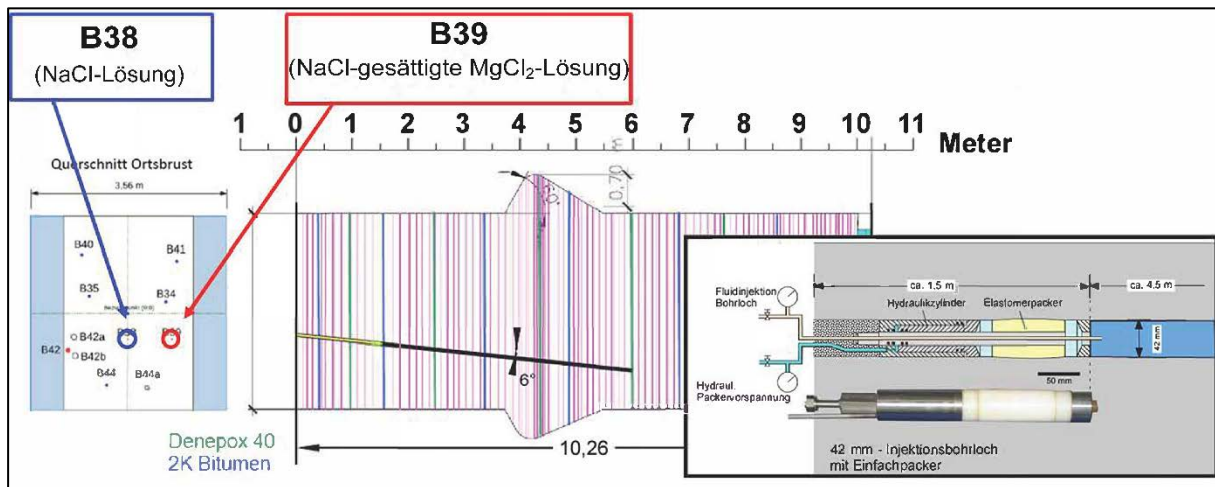


Abbildung 79: Lösungsdruckbeaufschlagung in B38 und B39: (li.) Ortsbrust mit den Bohrungen B38 und B39; (Mitte) Seitenansicht des Damms mit Spritzbetonabschnitten (violett) und Injektionsbereichen (grün bzw. blau); (re.) Packieranordnung.

Nach dem Lösungsverlust stand der Lösungspegel ungefähr zwischen 4 m und 5 m-Bohrlochtiefe. Die Bohrungen wurden im Abstand von ca. 1 m bis 1,5 m (nominelles Lösungsvolumen hinter dem Packer: $\leq 6,23$ L) von der Dammstirnseite durch einen hydraulisch vorgespannten Packer luftblasenfrei abgedichtet. Es war nicht notwendig, den Packer zusätzlich noch mit MgO-Material zu füllen, da die zu realisierenden und die realisierten Lösungsdrücke im Bereich weniger bar liegen sollten.

Anschließend sollten mit einer hoch-präzisen Injektionspumpe (LEWA K3[®]) Drucktests zur Steifigkeitsbestimmung des Messsystems (u.a. Leitungen, Packer, Bohrloch) durchgeführt werden.

Wegen der Lösungsverluste konnte allerdings nicht die Steifigkeit des Bohrlochsystems (= Bohrlochwandung mit Lösung) bestimmt werden, da das Messfluid bei Injektionsraten zwischen 100 ml/h und 350 ml/h abströmte (Abbildung 80). Während in B38 mit den unterschiedlichen Druckraten nur sehr geringe und stark schwankende Injektionsdrücke auftraten, stellten sich in B39 mit stationären Injektionsraten zwei auswertbare Druckniveaus ein, womit die Versuchsbedingungen einem „constant-injection rate“-Test entsprachen.

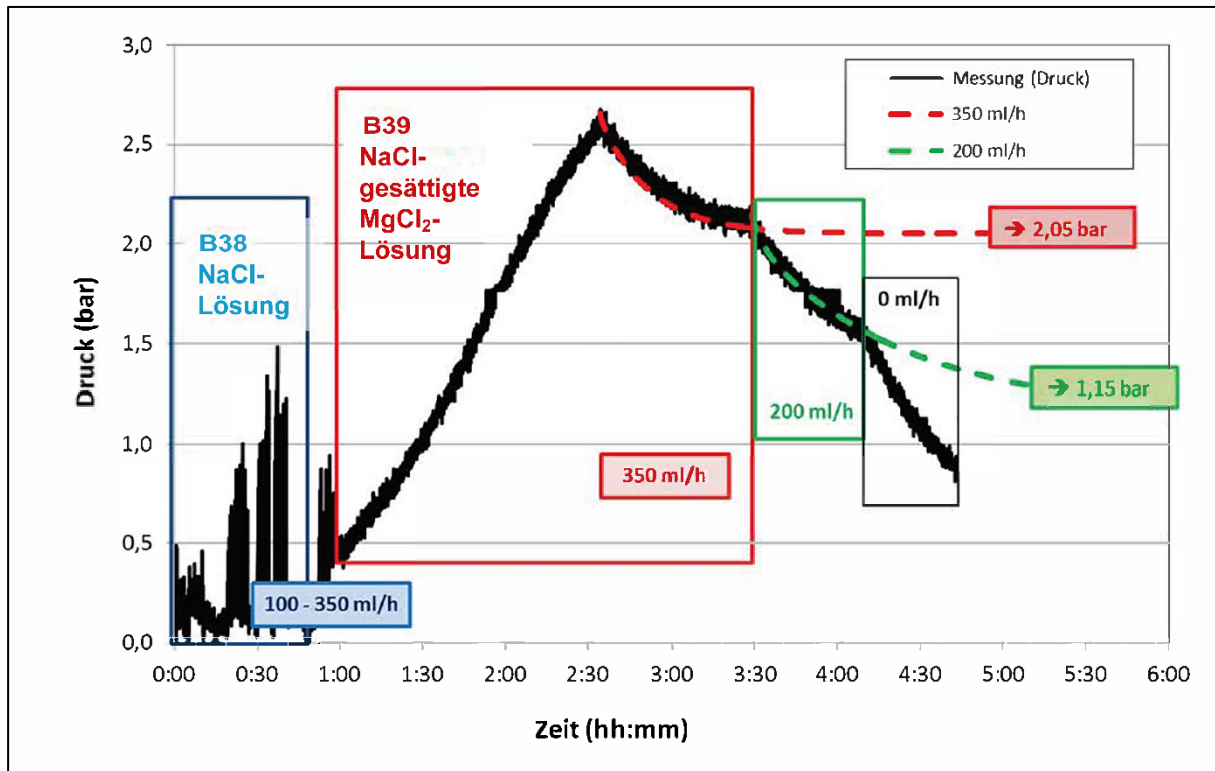


Abbildung 80: Erstmalige Lösungsdruckbeaufschlagung (23.06.2016) in den Bohrungen B38 (Lösung 1: gesättigte NaCl-Lösung) und B39 (Lösung 2: NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung).

Die ersten beiden Permeabilitätstests in B38 und B39

Bei Wiederholungsmessungen (in Bohrung B38 am 12.01.2017 bzw. in Bohrung B39 am 11.03.2017) zeigte sich, dass in beiden Bohrungen die Durchlässigkeit erheblich abgenommen hatte - offenbar infolge einer stattgefundenen Selbstabdichtung.

Unabhängig davon wurde auf Basis der vorliegenden Erfahrungen mit vergleichsweise hohen Fluidinjektionsraten (mehrere ml/h) bei niedrigen Injektionsdrücken von wenigen bar am Messort eine neue Druckbeaufschlagungseinrichtung installiert – jeweils getrennt für die beiden Bohrungen B38 und B39 (Abbildung 81).

Sie basiert auf einer lösungsgefüllten Messburette (ca. 100 ml Volumen bei 0,1 ml Messauflösung), die mit Pressluft über einen Druckminderer definiert mit einem Gasdruck bis max. 6 bar konstant beaufschlagt wird. Der sich zeitlich ändernde Flüssigkeitsmeniskus jeder Bürette wird manuell abgelesen. Zur Vermeidung von Havarien, wenn z.B. das Lösungsvolumen vollständig verpresst werden würde oder Luft ins Bohrloch eingepresst werden würde, wurden die Messungen nur unter Aufsicht durchgeführt.

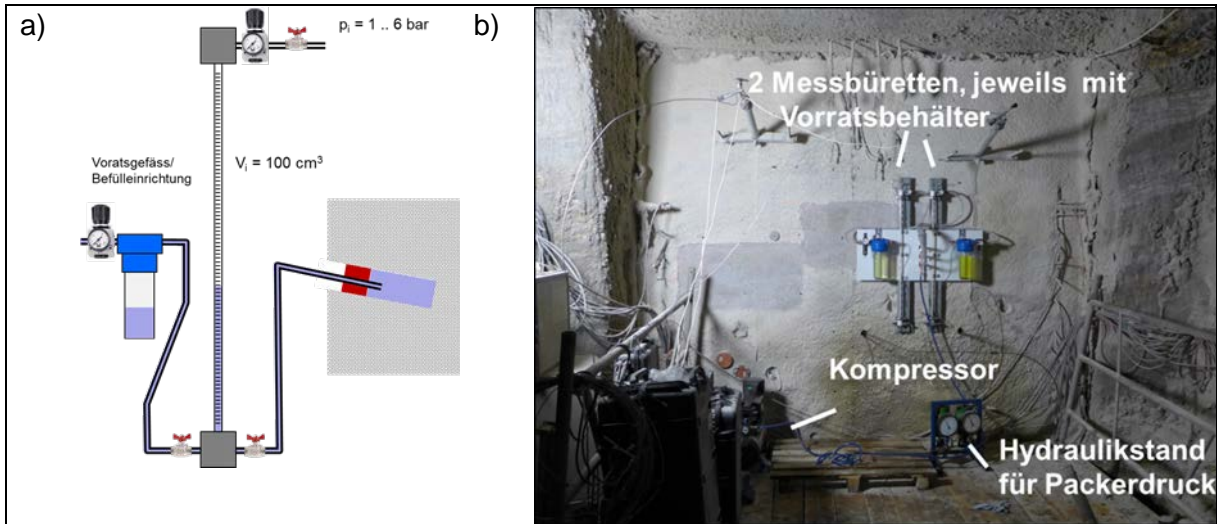


Abbildung 81: Bestimmung der Lösungspermeabilität mittels eines Bürettensystems an den Bohrungen B38 und B39: a) schematische Messanordnung; b) in situ-Situation an der Ortsbrust von GV2.

Beispielhaft sind in Abbildung 82 Messkurven für beide parallel druckbeaufschlagten Bohrungen (Messung vom 19.07.2018) aus den „Constant-pressure“-Tests, jeweils mit einer Versuchsdauer von ca. 6 h dargestellt. Das injizierte Lösungsvolumen nimmt über die Zeit stark ab, wobei innerhalb der Beobachtungszeit kein Gleichgewichtszustand (konstante Volumeninjektionsrate) erreicht wird. Die Abnahme der injizierten Lösungsmenge mit der Zeit bei konstantem Injektionsdruck von 4,1 bar (B39) und 4,8 bar (B38) kann durch verschiedene Effekte bedingt sein – z.B. möglicherweise durch die druckbedingte Aufsättigung der Kontur oder die Abnahme der Porosität.

Die aus dem Lösungsvolumen abgeleitete Injektionsrate wurde extrapoliert und eine Exponentialfunktion der Injektionsrate angepasst. Für einen besseren Vergleich der verschiedenen Messungen wurde in allen Messungen die Injektionsrate zum Zeitpunkt 1000 Minuten nach Messbeginn zur Abschätzung der Permeabilität herangezogen.

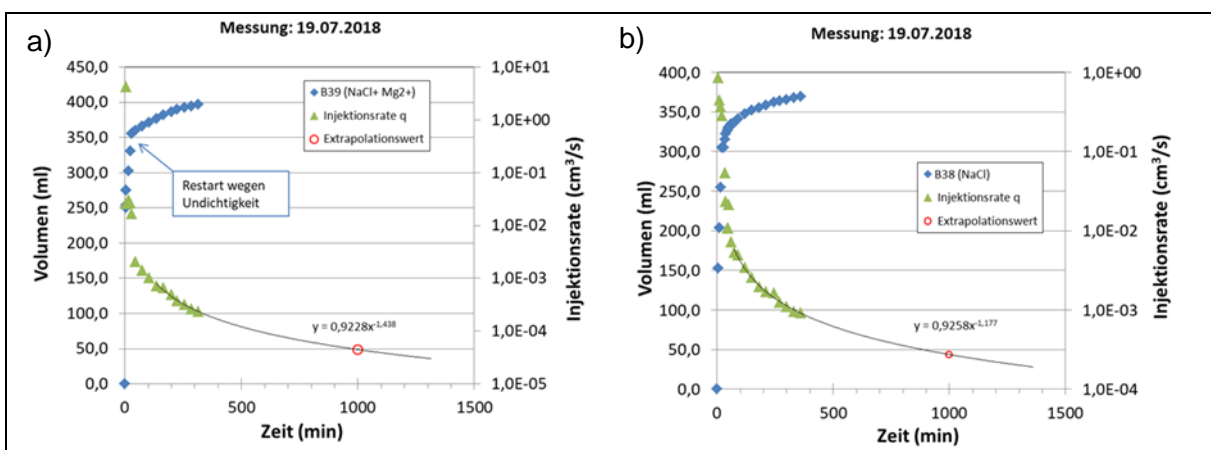


Abbildung 82: Messkurven aus „Constant-pressure“-Test. a) Bohrloch B39 (gesättigte NaCl-Lösung mit MgCl_2 -Anteil; $p_i = 4,1 \text{ bar}$); b) Bohrloch B38 (gesättigte NaCl-Lösung; $p_i = 4,8 \text{ bar}$).

Stationäre Injektionstests in B38 und B39

Im Zeitraum zwischen dem 23.06.2016 bis 23.08.2018 wurden insgesamt 8 Permeabilitätstests in den Bohrungen B38 und B39 durchgeführt (vgl. Tabelle 28). Zwischenzeitlich standen die Bohrungen jeweils drucklos unter Lösung.

Ausgehend von den Gleichgewichtsdruckniveaus der verschiedenen „constant-injection rate“-Tests (mittels LEWA K3[®]) bzw. den gemessenen Injektionsraten in den „constant-pressure“-Tests (mittels Bürettensystems) wurde auf Basis des Darcy-Gesetzes die Lösungspemeabilität mit einem einfachen Modell einer quasi-rotationssymmetrischen Fluidausbreitung ins Bauwerk abgeschätzt. Dabei wurde im Modell ein hypothetischer Außenradius von 1,5 m und ein Fluidruck am Modellrand von $p_{fi} = 0$ bar angenommen. Für die tatsächliche Messstreckenlänge von 4,8 m bei Bohrung B38 und 4,5 m bei Bohrung B39 ergibt sich die in Spalte 5 der Tabelle 28 berechnete Lösungspemeabilität. Die Permeabilität über die Zeit ist in Abbildung 83 grafisch dargestellt.

Des Weiteren wurde noch berechnet, welche Permeabilität sich ergeben würde, wenn die Lösung im Bohrloch nicht über die 4,8 m (B38) „gleichmäßig“ abströmen würde, sondern wenn die Versuchslösung über eine fiktive 2 cm breite Betonierabschnittsgrenze mit höherer Permeabilität abströmen würde und der restliche Bereich der Messstrecke vollkommen dicht wäre. Die so berechnete Permeabilität kann Spalte 6 in Tabelle 28 entnommen werden.

Tabelle 28: Auswertung der stationären Injektionstests in den Bohrungen B38 und B39

1		2	3	4	5	6
Bohrung/ Datum	Messtag	Injektionsrate		p_{innen}	Lösungspemeabilität	
	(d)	[ml/h]	[ml/s]	[MPa]	Abgepackertes Bohrloch	Fiktive „Betonierab- schnittsgrenze“
					[m ²]	[m ²]
B38		Gesättigte NaCl-Lösung (Lösung 1)			(Messstrecke 4,8 m)	(angenommene BAG-Weite: 0,02 m)
23.06.2016	44	350	$9,72 \cdot 10^{-2}$	0,04	$1,7 \cdot 10^{-15}$	$4,1 \cdot 10^{-13}$
12.01.2017	247	25	$6,94 \cdot 10^{-3}$	0,50	$9,8 \cdot 10^{-18}$	$2,4 \cdot 10^{-15}$
15.08.2017	462	2,06	$5,73 \cdot 10^{-4}$	0,27	$1,5 \cdot 10^{-18}$	$3,6 \cdot 10^{-16}$
05.10.2017	513	0,84	$2,33 \cdot 10^{-4}$	0,25	$5,4 \cdot 10^{-19}$	$1,6 \cdot 10^{-16}$
29.01.2018	629	-	-	-	-	-
19.07.2018	800	0,98	$2,73 \cdot 10^{-4}$	0,48	$2,8 \cdot 10^{-19}$	$9,6 \cdot 10^{-17}$
23.08.2018	835	0,30	$8,37 \cdot 10^{-5}$	0,50	$8,2 \cdot 10^{-20}$	$2,8 \cdot 10^{-17}$
25.10.2018	898	1,56	$4,33 \cdot 10^{-4}$	0,50	$4,3 \cdot 10^{-19}$	$1,5 \cdot 10^{-16}$
17.01.2019	982	0,1	$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,50	$2,8 \cdot 10^{-20}$	$9,6 \cdot 10^{-18}$
B39		NaCl-ges., MgCl₂-haltige Lösung (Lösung 2)			(Messstrecke 4,5 m)	(angenommene BAG-Weite: 0,02 m)
23.06.2016	44	350	$9,72 \cdot 10^{-2}$	0,205	$3,6 \cdot 10^{-16}$	$8,1 \cdot 10^{-14}$
11.03.2017	305	0,8	$2,22 \cdot 10^{-4}$	0,115	$1,7 \cdot 10^{-19}$	$3,8 \cdot 10^{-17}$
15.08.2017	462	1,88	$5,22 \cdot 10^{-4}$	0,115	$1,5 \cdot 10^{-18}$	$3,0 \cdot 10^{-16}$
05.10.2017	513	0,45	$1,25 \cdot 10^{-4}$	0,115	$3,4 \cdot 10^{-19}$	$8,5 \cdot 10^{-17}$
29.01.2018	629	0,19	$5,26 \cdot 10^{-5}$	0,115	$1,2 \cdot 10^{-19}$	$3,6 \cdot 10^{-17}$
19.07.2018	800	0,16	$4,48 \cdot 10^{-5}$	0,410	$5,4 \cdot 10^{-20}$	$1,9 \cdot 10^{-17}$
23.08.2018	835	0,03	$9,60 \cdot 10^{-6}$	0,410	$2,5 \cdot 10^{-20}$	$4,0 \cdot 10^{-18}$
25.10.2018	898	0,15	$4,10 \cdot 10^{-5}$	0,41	$4,9 \cdot 10^{-20}$	$1,7 \cdot 10^{-17}$
17.01.2019	982	0,22	$6,21 \cdot 10^{-5}$	0,41	$7,5 \cdot 10^{-20}$	$2,6 \cdot 10^{-17}$

Die Ergebnisse für die zeitliche Abnahme der gemessenen Permeabilität bei Betrachtung der Messtrecke mit 4,8 m (B38) und 4,5 m (B39) Messtrecke sind grafisch in Abbildung 83 dargestellt. Mit der Erstbeaufschlagung der Bohrlöcher (23.06.2016) wurde zunächst in beiden Bohrungen unerwartet eine sehr hohe Permeabilität bestimmt mit $k_{\text{integral}} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ (B38 – gesättigte NaCl-Lösung = Lösung 1) bzw. $k_{\text{integral}} \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ (B39 – NaCl-gesättigte, MgCl_2 -haltige Lösung = Lösung 2). Über einen Zeitraum von ca. 2,5 Jahren hat dann die Permeabilität in den Folgemessungen in beiden Bohrungen deutlich abgenommen. Nach etwa 600 bis 800 Tagen lag die Permeabilität in beiden Bohrungen im Bereich von $k_{\text{integral}} \leq 10^{-19} \text{ m}^2$, was dem integralen Permeabilitätsniveau des MgO-Betons innerhalb eine Spritzbetonschicht entspricht (unter der Annahme, dass die Permeabilität integral für die Bohrlochsraumzone gilt).

Die Spalte 6 in Tabelle 28 zeigt die Permeabilität eines fiktiven stärker durchlässigen Bereiches von 2 cm, der eine stark durchlässige Betonierabschnittsgrenze darstellen könnte. Die Permeabilität liegt in der Größenordnung 10^{-13} bis 10^{-16} m^2 . Dies ist in etwa die Größenordnung der Permeabilität, die bei der ersten Messung (am 23.06.2016) für das gesamte Messtrecke von 4,5 m (B38) bzw. 4,8 m (B39) festgestellt wurde. Es wird deshalb erwartet, dass die hohe Anfangspermeabilität am 23.06.2016 durch einen stärker durchlässigen, nur wenige Zentimeter breiten Bereich (z.B. bei einer Betonierabschnittsgrenze) verursacht wurde. Die lokale Permeabilität für eine derartige Schwächezone ist proportional zur reduzierten Modelldicke um mehr als zwei Größenordnungen höher.

Insgesamt ist die Permeabilität in der Bohrung B38 mit der NaCl-gesättigten Lösung (Lösung 1) etwa zwei- bis fünffach höher als in der Bohrung B39 mit NaCl-gesättigter, MgCl_2 -haltiger Lösung (Lösung 2). Aber auch im Bohrloch B38 wurde nach ca. 800 Tagen eine Permeabilität kleiner als $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ gemessen.

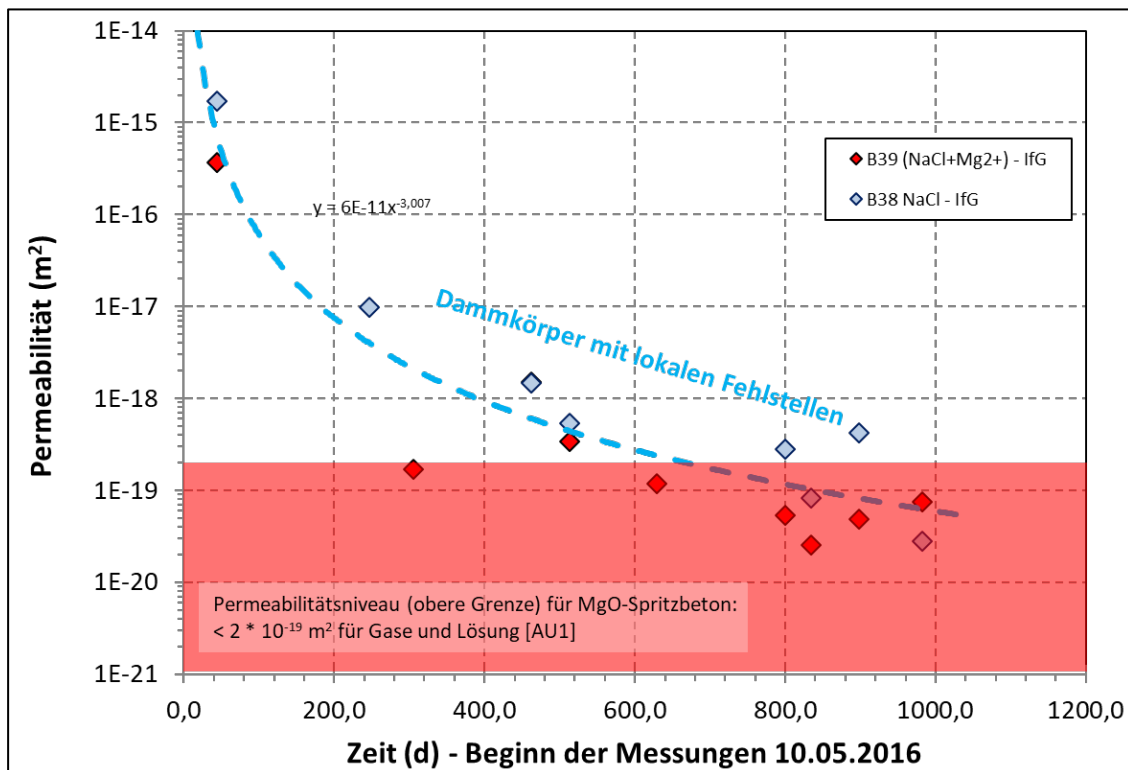


Abbildung 83: Zeitliche Veränderung der Lösungspermeabilität (Startwert: 10.05.2016) in den Bohrungen B38 und B39.

4.3.3 Punktuelle Messungen in situ

Neben den integralen Messungen der Permeabilität wurden im Frühjahr 2017 in den Bohrungen B38 und B39 zusätzlich punktuell die Permeabilität mit einer 2-fach-Packeranordnung (Prüfraumlänge ca. 120 mm) als Druckstoßtests mit Öl bestimmt. So sollten lokale Fehlstellen im Bauwerk lokalisiert bzw. die bei früheren Messungen beobachtete, hohe Matrixdichtheit des Baustoffes verifiziert werden.

Die gemessenen Druckabfallkurven zur Bestimmung der Fluidpermeabilität wurden numerisch entsprechend dem z.B. unter [AU26] beschriebenen Verfahren ausgewertet. Es wurde die zeitlich/räumliche Fluidausbreitung in den Baustoff modelliert. Dabei wurden die experimentell gemessene druckabhängige Steifigkeit des Gesamtsystems (Bohrlochwandung – Messeinrichtung) und die Fluidviskosität unter Lösung der Umkehraufgabe der rotationssymmetrischen zweidimensionalen Strömung und die Parameter (schalenabhängige Permeabilität und Porosität) aus den Druckstoßtests berücksichtigt.

Die Details der Untersuchungen sowie Teilergebnisse sind in [AU25] dokumentiert. In [AU25] wurden auch Varianten zu einer möglichen Ergebnisstreuung der Baustoffpermeabilität aufgrund von Parameterbandbreiten (Unsicherheiten bei der Systemkompressibilität bzw. Baustoffporosität) berechnet. Da die effektive Baustoffpermeabilität nicht bekannt ist, wurde beispielsweise die Anströmporosität in einem realistischen Rahmen zwischen 3 % und 10,5 % variiert. Dabei betrug die Streuung für die resultierende Permeabilität bis zu einer halben Größenordnung (Abbildung 84). Qualitativ zeigt sich dabei - wie zu erwarten war -, dass die Permeabilität umso größer ist, je kleiner die anströmbare Porosität ist.

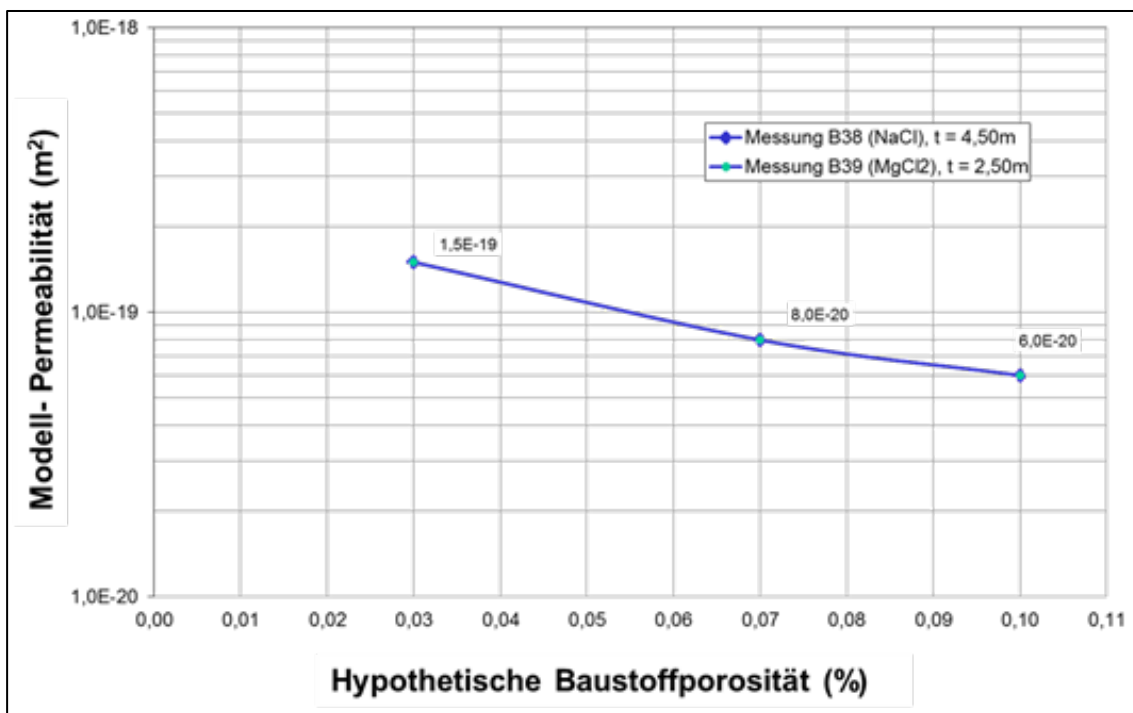


Abbildung 84: Scheinbare Permeabilitäts-/Porositätsbeziehung für die Auswertung zweier Druckabfallkurven nach Anpassung mit unterschiedlichen Porositätsdaten (beide Kurven liegen aufeinander).

Die punktuellen Einzelmessungen wurden in den Bohrungen B38 und B39 an definierten Messpositionen (= Mitte des Messintervalls von ca. 250 mm: 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m, 4,5 m und 5,5 m) mit Injektionsdrücken zwischen 17 bar und 22 bar durchgeführt. Die jeweils erhaltenen Druckabfallkurven (vgl. [AU25]) unterschieden sich untereinander nicht deutlich, mit Ausnahme der Messung in B38 bei 5,5 m. Bei dieser Messung wurde ein signifikant stärkerer

Druckabfall beobachtet. Die schrittweise numerische Auswertung der Druckabfallkurven erbrachte im ersten Modellschritt eine Anfangspermeabilität in der Größenordnung $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$, die danach bei schrittweiser Anpassung der Druckabfallkurve entsprechend der weiteren Fluidausbreitung in der Saumzone (wenige mm) deutlich abnahm. Sobald die an die Messkurve angepasste Permeabilität kleiner 10^{-20} m^2 war, wurde die Auswertung wegen der geringen Permeabilität des Baustoffes beendet, was mit Ausnahme der Messung B38/ 5,5 m für alle Messungen zutraf (Abbildung 85). Das bedeutet, dass der Baustoff innerhalb des Messintervalls baupraktisch dicht war.

Für den Messpunkt B38/5,5 m betrug die für den Messverlauf bestimmte Permeabilität $1 - 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$, was auf lokale Undichtigkeiten im Baustoff hindeutet. Allerdings erklärt dieser Wert nicht den gesamten anfänglich aufgetretenen Lösungsverlust, d.h. im Bauwerk müssen lokal größere Undichtigkeiten vorgelegen haben. Gleichzeitig entspricht dieser Wert nicht der maximalen Anfangspermeabilität der in den Kamerabefahrungen (vgl. Abschnitt 3.2.1) und in den Ultraschallbohrlochmessungen (vgl. Abschnitt 3.2.2) angetroffenen Fehlstellen aufgrund der bereits stattgefundenen Selbstabdichtung.

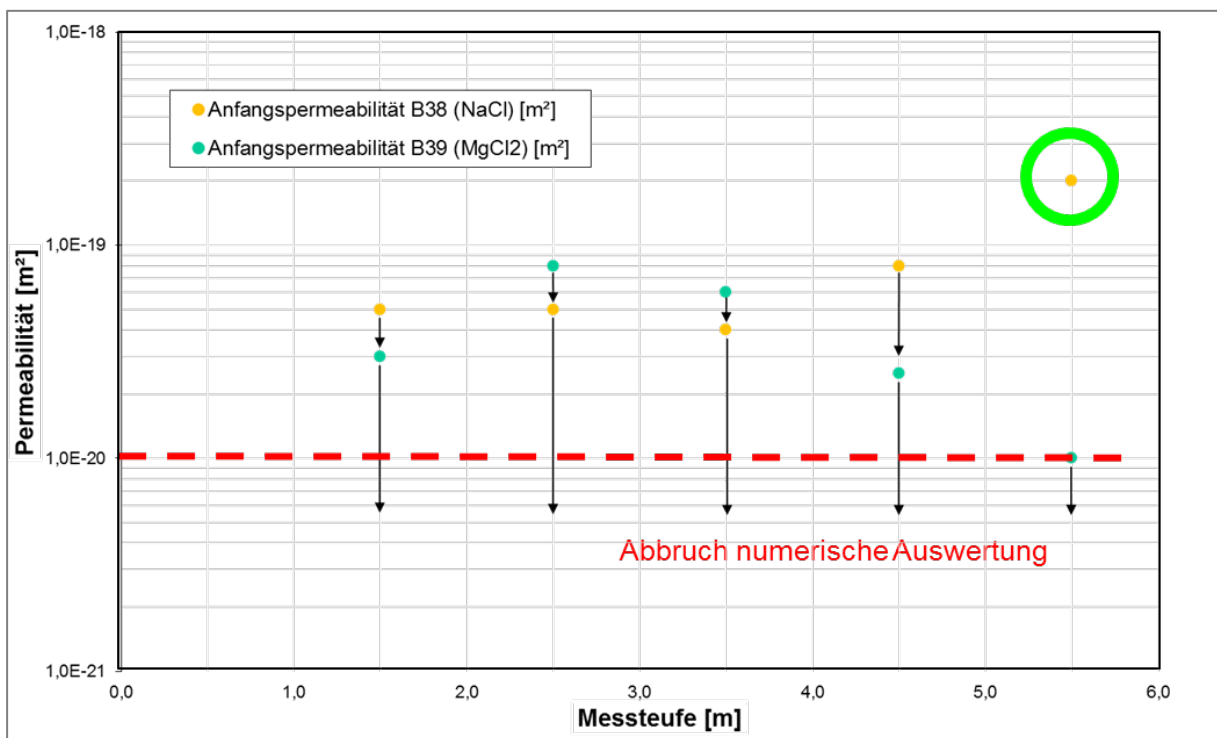


Abbildung 85: Lösungsdruckbeaufschlagung (23.06.2016) in den Bohrungen B38 (Lösung 1: gesättigte NaCl-Lösung) und B39 (Lösung 2: NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung).

4.3.4 Zusammenfassung zu den Permeabilitätsmessungen in den Bohrungen B38 und B39

Insgesamt wird mit den Ergebnissen der Lösungsdruckbeaufschlagung in den Bohrungen B38 und B39 der bestehende Kenntnisstand zum MgO-Spritzbeton (u.a. aus dem Vorhaben CARLA) bestätigt, wobei es zusätzlich folgende wichtige neue Befunde gibt:

1. Die Permeabilität im Inneren einer Spritzschicht und an den Betonierabschnittsgrenzen im MgO-Spritzbeton ist sehr niedrig, wie die punktuell im Meterabstand durchgeführten 2-fach-Packermessungen (Messintervall: ca. 25 cm) belegen (Druckstoßmessungen mit Öl). Sie beträgt etwa $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Nur in der Bohrung B38, wurde bei 5,5 m eine lokal höhere Permeabilität von $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ angetroffen, was auf eine lokale

Fehlstelle zurückgeführt wird (s. unten). Mit Lösung ergeben sich generell Werte kleiner 10^{-19} m^2 , was dem Ergebnisspektrum früherer Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens CARLA entspricht.

2. Allerdings zeigen die in den 6,0 m langen Bohrungen durchgeführten Messungen in der integralen Auswertung bei der ersten Lösungsdruckbeaufschlagung eine deutlich höhere Permeabilität: $k_{\text{integral}} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ (B38 – gesättigte NaCl-Lösung; Messstrecke 4,8 m) bzw. $k_{\text{integral}} \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ (B39 – NaCl-gesättigte, MgCl_2 -haltige Lösung; Messstrecke 4,5 m). Dieser Unterschied zu früheren bzw. zu den zuvor beschriebenen punktuellen Messungen resultiert vermutlich aus einem, eventuell auch mehreren nahe beisammen liegenden, wohl lokal begrenzten, stärker durchlässigen Bereich(en) zwischen verschiedenen Spritzbetonlagen, mutmaßlich im Bereich des Zahns. In den kürzeren Bohrungen B40 und B41 (Abschnitt 2.4) sind solche anfänglich stärker durchlässigen Bereiche nicht angetroffen worden.
3. Die Häufigkeit und räumliche Verteilung sowie Größe und Geometrie von durchlässigeren Bereichen im GV2 sind ebenso wie die lokale Permeabilität bisher nicht ausreichend bekannt. Geht man für die Bohrung B38 in einer groben Abschätzung für die hydraulische Wirkung einer flächigen Fehlstelle (anstelle eines homogenen 5 m-Bohrlochs) von einer Breite von 20 mm (senkrecht zu Bauwerksachse) im ansonsten dichten Bauwerk aus, kann nach den vorliegenden Abschätzungen für diesen Bereich eine lokale Permeabilität in der Größenordnung von $4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ abgeschätzt werden, d.h. 240-fach höher als $k_{\text{integral}} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ (B38).
4. Mit Blick auf die hydraulische Relevanz dieser Fehlstellen für die Funktion von Spritzbeton-Dämmen als Dichtbauwerk dokumentieren die Ergebnisse der Labormessungen, dass durch die Betonierabschnittsgrenzen die Permeabilität senkrecht zur Bauwerksachse lokal und temporär im Bereich des Zahns höher war als in Bauwerksachse. Radial zur Dammachse war die Anfangspermeabilität lokal bei etwa 10^{-13} m^2 bzw. 10^{-15} m^2 (siehe oben) und hat sich dann durch Selbstabdichtung auf kleiner 10^{-19} m^2 mit der Zeit reduziert. Die hohe Anfangspermeabilität war vermutlich nur durch zwei Betonierabschnittsgrenzen verursacht. Bei allen anderen Betonierabschnittsgrenzen war die Permeabilität auch bereits anfänglich ausreichend klein. In axialer Richtung parallel zur Fluidbelastung ist die Permeabilität wesentlich geringer (kleiner 10^{-20} m^2).
5. Die Bohrlochtests wurden über einen Zeitraum von mehr als 2,5 Jahren mit 8 Einzelmessungen fortgesetzt. Dabei nahm die Lösungspermeabilität in den beiden Bohrungen B38 und B39 stark ab - sowohl bei Beaufschlagung mit gesättigter NaCl-Lösung (Lösung 1) als auch bei Verwendung von NaCl-gesättigter, MgCl_2 -haltiger Lösung (Lösung 2). Insgesamt hat die Permeabilität um mehr als vier Größenordnungen abgenommen und liegt nach etwa 800 Tagen Lösungsbeaufschlagung im Bohrloch generell unter 10^{-19} m^2 (Annahme eines Abströmprozesses für das integrale Bohrloch), was den Ergebnissen aus dem Forschungsvorhaben CARLA für den kompakten MgO-Spritzbeton-Baustoff entspricht. Auffällig ist auch, dass die Permeabilität mit gesättigter NaCl-Lösung (Lösung 1) höher ist als bei Verwendung von NaCl-gesättigter, MgCl_2 -haltiger Lösung (Lösung 2), dass aber auch eine Selbstabdichtung stattfindet, wenn das Bauwerk mit gesättigter NaCl-Lösung beaufschlagt wird.
Dieses positive Ergebnis belegt somit auch im Feldversuch, dass in Wegsamkeiten im Baustoff bei Lösungskontakt die bereits im Labor nachgewiesenen Selbstabdichtungsreaktionen (z.B. Umwandlung von 5-1-8-Phase in die langzeitstabile 3-1-8-Phase) tatsächlich stattfinden. [AU1] [AU28]
6. Die durch die Lösung (Lösung 1 und 2) beeinflusste Saumzone der Bohrungen ist für den weit überwiegenden Teil in der Bohrlochkontur wegen der geringen Permeabilität vermutlich nur sehr klein (wenige Zentimeter). Dies gilt vermutlich auch für die Saumzone im Nahbereich des vermuteten lokal durchlässigeren Bereiches im Bereich des

Zahnes, weshalb eine exakte Ermittlung der Saumzonenbreite (= Eindringtiefe der Lösung) auch wegen der stattgefundenen Verheilungsreaktionen mit Phasenneubildungen vermutlich schwierig ist.

7. Ebenfalls wegen der bei Anwesenheit von Lösung instantan einsetzenden (und aktuell andauernden) Selbstabdichtung des MgO-Beton-Bauwerkes im eingespannten Zustand ist die genaue Identifizierung und Lokalisierung von Rissen oder Fehlstellen mit den hier angewendeten indirekten Verfahren Videokamera-Befahrung und Ultraschallmessung unsicher.

Es wird deshalb empfohlen, die Bohrlöcher zu überbohren, um die Eindringtiefe der eingedrungenen Lösung festzustellen und bei einem Rückbau von GV2 den Bereich des Zahnes sehr intensiv durch direkte Probennahme und geeignete Verfahren (z.B. mikroskopisch, phasenanalytisch oder über Permeabilitäts- oder Festigkeitstests) genauer zu untersuchen.

4.3.5 Zusammenfassung der Permeabilitätsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Langzeitbohrlochversuche in den Bohrungen B38, B39, B40 und B41 direkt im MgO-Beton zeigen eine Abnahme der Permeabilität mit der Zeit (siehe Abbildung 86). Im Detail verhält sich der Bauwerkskörper, je nach Lage der Bohrlöcher etwas unterschiedlich. Die Bohrlochwandungen der Bohrungen B40 und B41 haben von Anfang an eine sehr geringe Permeabilität von $< 10^{-19} \text{ m}^2$, die sich mit der Zeit weiter auf $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ verringert hat. Diese Werte sind für den Dammkörper innerhalb einer Spritzschicht typisch. Die Verringerung der Permeabilität in den Bohrungen B38 und B39 ist für beide Lösungszusammensetzung (B38 und B40: reine gesättigte NaCl-Lösung; B39 und B41: MgCl_2 -haltige gesättigte NaCl-Lösung) ähnlich.

Die Bohrungen B38 und B39 sind länger und schneiden nachweislich Bereiche mit lokal, jedoch nur temporär höherer Permeabilität an. Die Anfangspermeabilität beträgt bei beiden Bohrungen etwa 10^{-15} m^2 . In beiden Bohrungen hat sich aber infolge der Wechselwirkungen zwischen der jeweiligen Lösung und dem MgO-Beton die Lösungspemeabilität mit der Zeit auf einen Wert von ca. 10^{-19} m^2 verringert.

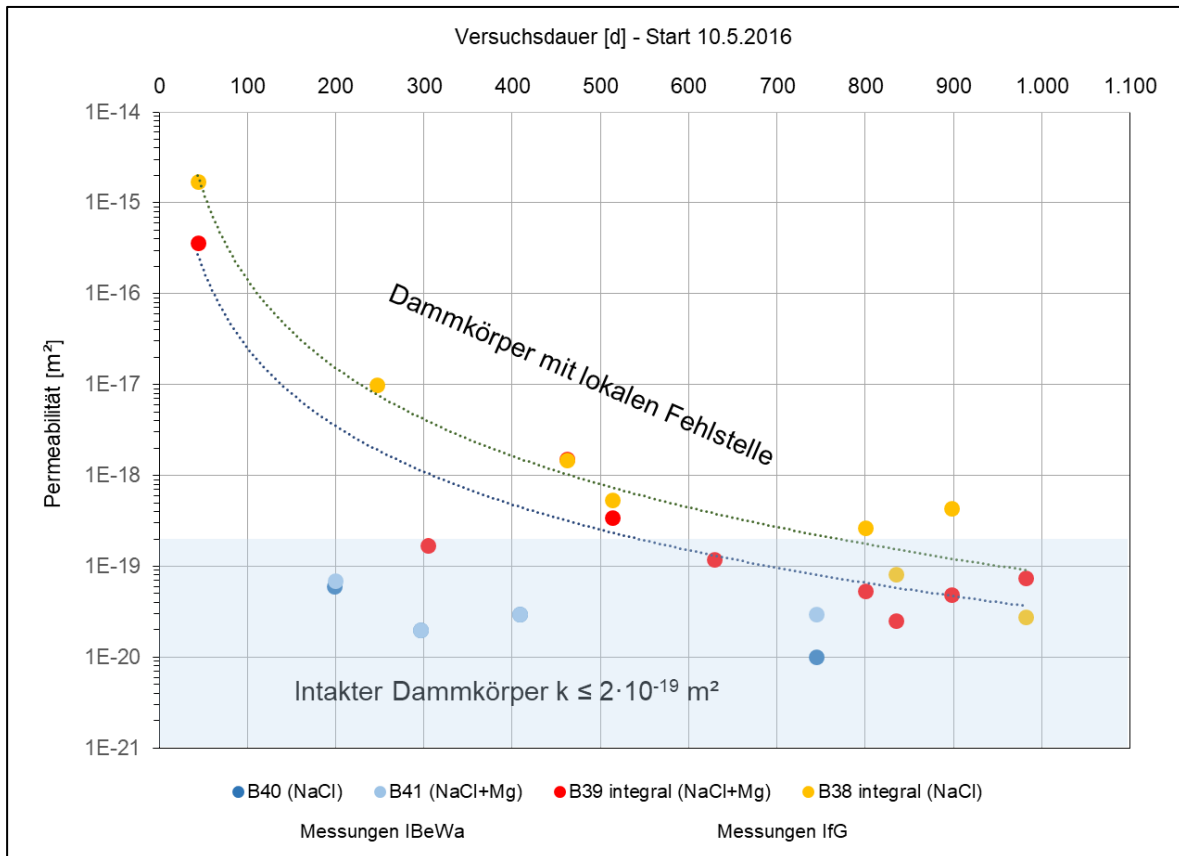


Abbildung 86: Ergebnisse der Langzeitbohrlochversuche: Permeabilität in Abhängigkeit der Zeit (Messungen von IBeWa und IfG)

Die Langzeitbohrlochversuche zeigen anschaulich, dass sich auch im Dammkörper in den Bereichen mit lokal geringfügig höher durchlässigen Bereichen durch die Einwirkung der Lösung und die nachfolgenden Wechselwirkungen zwischen Lösung und MgO-Spritzbeton eine so niedrige Permeabilität einstellt, wie sie für den intakten MgO-Beton charakteristisch ist.

Daraus wird abgeleitet, dass technisch bedingte „kleine“ Wegsamkeiten (Imperfektionen, Betonierabschnittsgrenzen, „Risse“ bei einer „kleinen“ Rissbreite) sich selbst abdichten können.

Aus dem injizierten Lösungsvolumen kann die mögliche Eindringtiefe der Lösung in den MgO-Beton abgeschätzt werden. Für die Bohrung B40 wurde eine theoretische radiale Eindringtiefe, integral über das Testintervall, von ca. 7,8 cm ermittelt (angenommene Porosität: 4,4 %). Für die Bohrung B41 beträgt dieser Wert 8,1 cm. Aufgrund eines Lösungsverbrauchs durch Phasenumwandlungen, eine ggf. inhomogene Verteilung der Permeabilität und/oder der Porosität im Testintervall, ist die reale, radiale Eindringtiefe lokal im intakten MgO-Beton geringer als dieser Mittelwert. Im Bereich der Betonierabschnittsgrenzen ist die Eindringtiefe dann höher als der Mittelwert. Die reale radiale Eindringtiefe der Lösung in den MgO-Beton soll ortsbezogen im Rahmen des Rückbaus durch Überbohren der Bohrlöcher bestimmt werden.

5 Lösungsdruckbeaufschlagung auf den MgO-Beton über die Druckkammer des GV2

5.1 Vorbereitungen

Das gesamte Bauwerk GV2 sollte über die Druckkammer mit $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung (Lösung 3) beaufschlagt werden, um festzustellen, wie sich die Permeabilität des Gesamtsystems im Laufe der Zeit entwickelt. Insbesondere sollte festgestellt werden, ob durch Phasenumwandlungen des MgO-Baustoffes eine Volumenvergrößerung stattfindet, die wiederum zu einer Art „Selbstabdichtung“ der Kontaktzone führt.

Da bei den pneumatischen Vortests an der Luftseite der Durchtritt von Tracergas detektiert wurde, konnte nicht ausgeschlossen werden, dass Lösung an der Luftseite bei der Druckbeaufschlagung austritt. Diese Lösungsmenge sollte quantifiziert werden. Dazu wurde im Mai 2016 an der Luftseite eine Auffangrinne (Abbildung 87) direkt vor dem Bauwerk über eine Breite von etwa 4,4 m (Streckenbreite mit je 40 cm Erweiterung um auch den Konturbereich vollständig zu erfassen) und eine Tiefe von ca. 60 cm hergestellt. Vor dieser Rinne befand sich ein Auffangbecken mit einer Länge und Breite von je 1 m und einer Tiefe von 1,6 m. In dem Becken befand sich ein Fass, das auf einer Waage stand.

Sollte Lösung durchtreten, würde diese in das Fass geleitet und mengenmäßig erfasst werden können. So hätte außerdem die Möglichkeit bestanden, Proben zu entnehmen und die Zusammensetzung der ausgetretenen Lösung zu bestimmen.

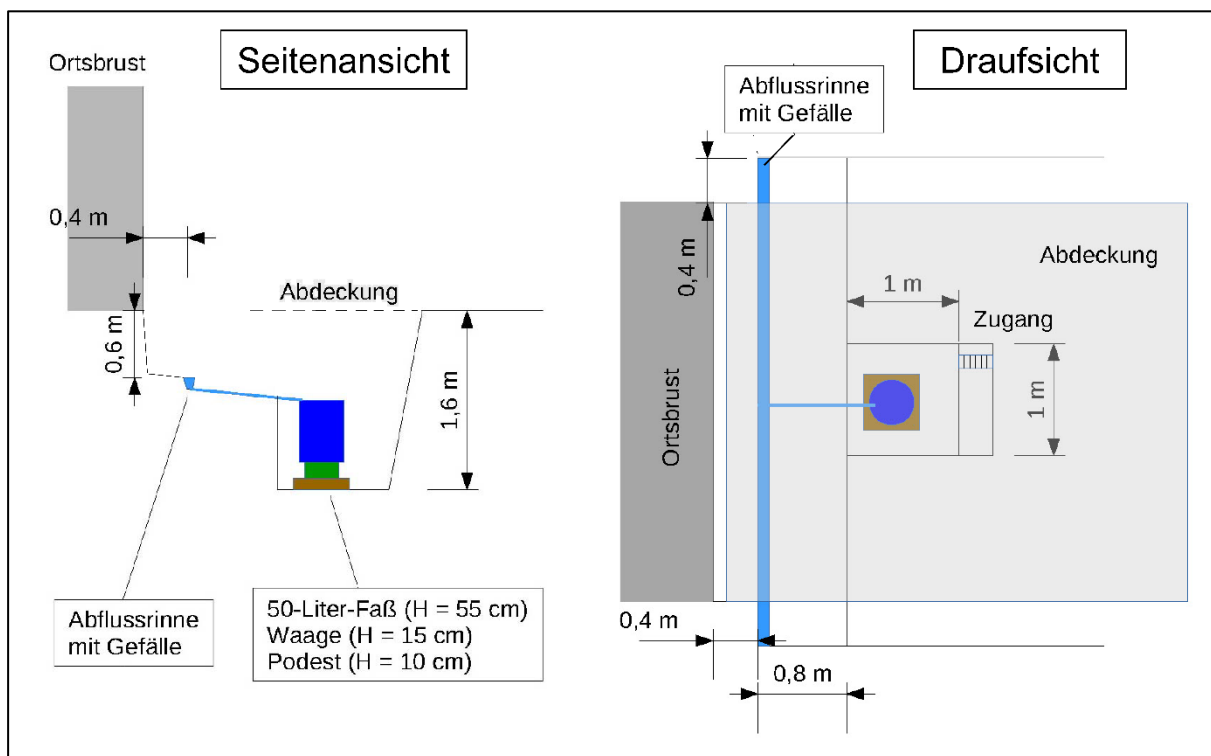


Abbildung 87: Darstellung der Abflussrinne an der luftseitigen Ortsbrust des GV2

Am Versuchsstand in der Begleitstrecke wurden die Pumpe, der Kompressor, die Druckaufnehmer und die notwendigen Zuleitungen angeschlossen. Der Versuchsstand ist schematisch in Abbildung 88 und auf Fotos in Anlage 1 dargestellt.

Vom Gebirgsstoß reichten die Befüllleitung und die Entlüftungsleitung ca. 25 m in den Carnallit bis in die Druckkammer hinein. Nahe der Befüll- und Entlüftungsleitung befand sich ein Luftdrucksensor. Die $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung (Lösung 3) befand sich in dem Fass auf der Wägeeinrichtung, welche an einem Gestell befestigt war. Mittels einer Kraftmessdose wurde

Entwicklung der Kontaktdrücke zu den Vorbereitungen am Versuchsort (01.01.2015 – 31.12.2016)

Die Kontaktdrücke in den Druckkissen GD55 und GD57 (Messquerschnitt 1) und GD59, GD60, GD61 und GD62 (Messquerschnitt 2) wurden seit der Fertigstellung des GV2 im Jahr 2008 erfasst. Mit dem Beginn der Arbeiten am GV2 im Rahmen des Projektes MgO-SEAL änderte sich die Charakteristik der Druckmesskurven, wobei offenbar eine Aktivierung mit z.T. diskontinuierlichen Sprüngen stattgefunden hat. Letztere sind zumindest teilweise auf geotechnische Arbeiten vor Ort zurückzuführen (Abbildung 89).

Mit der Erstellung der langen IfG-Bohrungen (bis in den Bereich des Zahns) im März 2016 kam es zunächst nur zu geringfügigen Veränderungen. Mit der Auffahrung der Rinne vor dem GV2-Bauwerk mit ausgedehnten Fräsarbeiten mittels Mini-Bagger im Mai 2016 nahmen vor allem die Kontaktspannungen in der Sohle (GD60: ME2) zunächst deutlich ab (von ca. 3,4 bar auf 2,6 bar), um danach stetig anzusteigen. Geringere Effekte zeigten im Messquerschnitt 2 (ME2) die Druckkissen auf halber Höhe (GD61 und GD59). In diesen stieg der Druck im Vergleich zum früheren Druck-Zeit-Regime deutlich stärker an. Der Druck im GD62 stieg im Betrachtungszeitraum nur minimal an. An dem Druckkissen GD55 zeigten sich keine Änderungen.

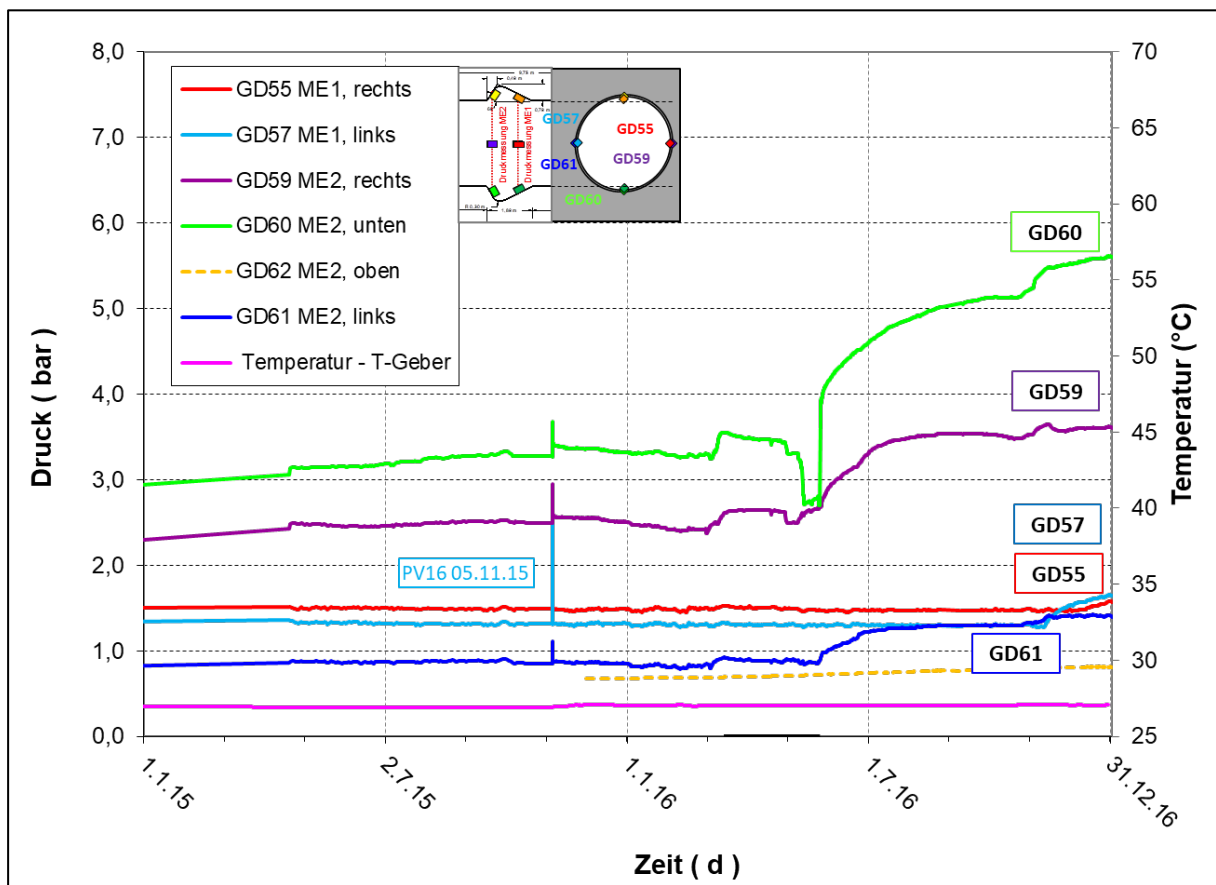


Abbildung 89: Entwicklung der Kontaktdrücke während der Vorbereitungen zu den Druckbeaufschlagungen (PV = Gasdrucktest).

Am 05.11.2015 wurde der 16. Gasdrucktest (PV16) durchgeführt, der in Abbildung 89 anhand der kurzzeitigen Erhöhung des Druckes in den Druckkissen zu erkennen ist.

5.2 Befüllung der Druckkammer

Für die Befüllung der Druckkammer musste das mit Flüssigkeit auffüllbare Porenvolumen der Druckkammer abgeschätzt werden. Besonderes Augenmerk lag bei der Berechnung des Porenvolumens der Druckkammer auf der Porosität der Korundsteine und den Zwischenräumen zwischen den einzelnen Steinen. Unter der Annahme einer Gesamtporosität von 0,64 ergibt sich ein Porenvolumen von 1,8 m³ (einschließlich des verbliebenen Raumes zwischen den unvermörtelten Korundsteinen). Dieses Volumen wurde als einzubringendes Fluidvolumen angesetzt. Ausgehend von einer Fluidichte von 1,46 g/cm³ und einer Druckkammerhöhe von 3,2 m muss sich bei gefüllter Druckkammer ein Flüssigkeitsdruck von 0,46 bar an der Sohle einstellen. Unberücksichtigt blieben jedoch die Benetzbarkeit der Korundsteine mit der Lösung und die Restgassättigung.

Es wurde geplant, die Druckkammer schrittweise bis zu einem jeweiligen Gesamtvolumen von 200 l, 600 l, 1200 l und 1800 l zu befüllen. In Tabelle 22 sind die vier Stufen der Druckkammerbefüllung mit dem jeweils eingebrachten Lösungsvolumen aufgelistet.

Die erste Befüllung (Stufe 1) fand am 06.10.2016 statt. Dabei wurden, wie geplant, etwa 200 l der Lösung eingebracht. Bei der zweiten Befüllstufe am 17.10.2016 wurden weitere 465 l in die Druckkammer hineingepumpt. Dies waren 65 l mehr als ursprünglich vorgesehen. Die dritte Befüllung wurde am 24.10.2016 durchgeführt. Es wurden weitere 442 l eingefüllt, sodass sich nun insgesamt 1100 l, 100 l weniger als geplant, in der Druckkammer befanden. Die dritte Stufe musste abgebrochen werden, da Lösung aus der Entlüftungsleitung tropfte. In der letzten Stufe (Stufe 4) sollte die Druckkammer mit weiteren 600 l bis insgesamt 1800 l befüllt werden, jedoch konnten nur 244 l eingebracht werden. Auch während dieser Befüllstufe floss am Ende Lösung aus der Entlüftungsleitung.

Zu jeder Befüllung wurde auch die Dichte der einzufüllenden Lösung mittels eines Aräometers bestimmt. Bei der ersten Befüllung betrug die gemessene Dichte 1,442 g/cm³, bei den folgenden 1,461 g/cm³ bzw. 1,462 g/cm³ (bei jeweils ca. 27°C).

Das eingebrachte Lösungsvolumen wurde mit der Menge, die das Fass auf der Wägeeinrichtung verlässt, gleichgesetzt und dem Volumen, das sich in der Druckkammer befindet gleichgesetzt. Jedoch wird sich die Lösungsmenge in der Druckkammer über die Zeit durch Abfluss über die Auflockerungs- und Kontaktzone und / oder in das Betonbauwerk verringert haben. Die in die Druckkammer eingebrachte Lösungsmenge blieb mit 1354 l deutlich hinter den Berechnungen von 1800 l zurück.

Tabelle 29: Stufen der Druckkammerbefüllung

Druckkammer- befüllung	Datum	Lösungsvolumen in der Druckkammer [L]			Dichte [g/cm ³]
		geplant je Stufe	eingebracht je Stufe	eingebracht kumuliert	
Stufe 1	06.10.2016	200	201,6	202	1,442
Stufe 2	17.10.2016	400	465,4	667	1,461
Stufe 3	24.10.2016	600	442,6	1110	1,461
Stufe 4	02.11.2016	600	244,2	1354	1,462

In Abbildung 90 bis Abbildung 93 sind der Druck am Befüllrohreingang und der Volumenstrom über die Zeit bei der jeweiligen Stufe der Druckkammerbefüllung dargestellt. Der Druck am Befüllrohreingang (gelbe Linie) wurde im Intervall von 2 Sekunden gemessen. Die zugehörige rote Linie beschreibt den gleitenden Mittelwert des Druckes über eine Minute. Das zugeführte Lösungsvolumen (blaue Linie) wurde über die Massenänderung der Lösung im Fass auf der

Wägeeinrichtung und der mittels Aräometer gemessenen Dichte bestimmt. Der mittlere Volumenstrom über drei Minuten (grüne Linie) wurde über das zugeführte Lösungsvolumen über die Zeit berechnet.

Die gemessenen Drücke unterliegen Luftdruckschwankungen. Bei der Auswertung der Druckkammerbefüllung wurden die Messwerte nicht luftdruckkompensiert, da diese nur wenige Stunden dauerte und nur stündliche Luftdruckmesswerte vorlagen.

Während der Zeit der Befüllung wurden die Daten (Druck an Befüll- und Entlüftungsleitung, Fassgewicht) alle 2 Sekunden aufgezeichnet.

Am 06.10.2016 gegen 16:43 Uhr begann die **erste Befüllung** (siehe Abbildung 90). Die Lösung aus dem Fass auf der Wägeeinrichtung wurde mit der Doppelmembranpumpe über die Zuleitungen in die Druckkammer eingepumpt. Dies zeigt der Anstieg des zugeführten Lösungsvolumens. Am Befüllrohringang wurde dabei der Druck aufgezeichnet. Dieser schwankte über den gesamten Zeitraum der Befüllung von etwa 45 Minuten zwischen 1,5 bar und 3 bar. Im Mittel lag der hier gemessene Druck bei knapp 2,5 bar. Der mittlere Volumenstrom, mit dem die Lösung eingeleitet wurde, betrug etwa 4,5 L/min. Gegen 17:00 Uhr zeigten sich recht starke Schwankungen. Zunächst stieg der Volumenstrom auf 5,5 L/min und sank danach auf 3,5 L/min. Diese Schwankung zeigt sich auch in einem Sprung beim zugeführten Lösungsvolumen während des sonst linearen Anstiegs des Lösungsvolumens.

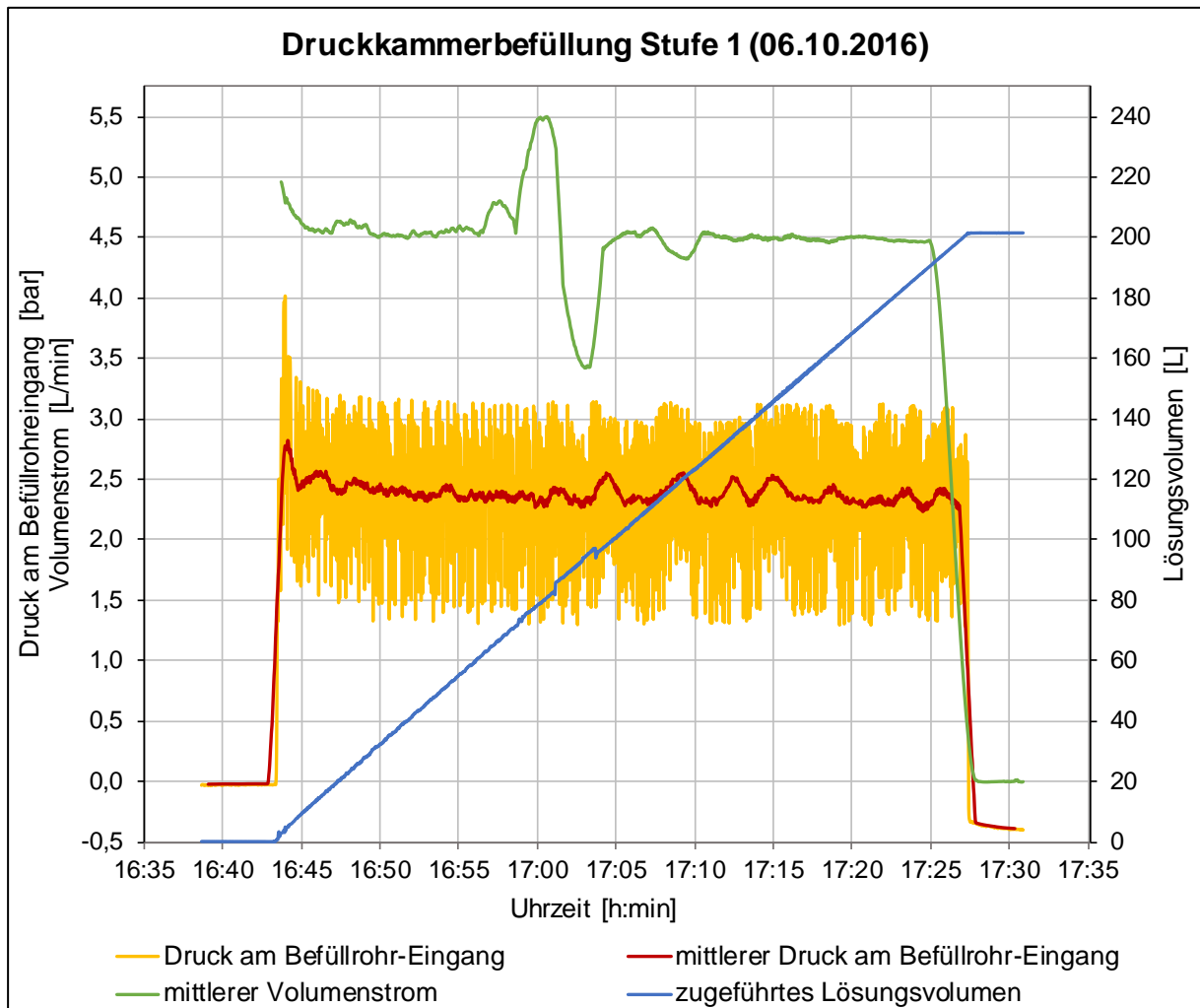


Abbildung 90: Druckkammerbefüllung Stufe 1 (06.10.2016)

Die **zweite Befüllung** der Druckkammer erfolgte am 17.10.2016 (siehe Abbildung 91). Ab ca. 17:00 Uhr wurde Lösung eingepumpt. Gegen 17:12 Uhr gab es eine 10-minütige Unterbrechung, in der Kondenswasser in der Pumpe abgelassen werden musste. Bis 18:20 Uhr wurden dann 275 L Lösung eingefüllt. Der mittlere Druck am Befüllrohringang lag bei 2,8 bar. Der mittlere Volumenstrom betrug in dieser Zeit 4 L/min. Bis 19:10 Uhr wurde das Pumpen unterbrochen, da das Fass auf der Wägeeinrichtung mit Lösung aus dem Vorratsbehälter aufgefüllt und mit Tracer versetzt werden musste. Bis 19:55 Uhr wurde zweimal kurzzeitig gepumpt und wieder unterbrochen. Die eingepumpte Lösung war nicht ausreichend gefärbt, sodass der Tracer nochmals untergemischt werden musste. In diesem Zeitraum wurden etwa 40 L Lösung eingefüllt. Der mittlere Druck am Befüllrohringang lag bei über 3 bar. Im weiteren Fortgang der Befüllung wurden nochmals 150 L in die Druckkammer eingepumpt. Der mittlere Volumenstrom war von 4 L/min auf 3,8 L/min abnehmend. Der mittlere Druck am Befüllrohringang lag bei 3 bar. In der zweiten Befüllstufe wurden 465 L eingefüllt. Insgesamt befanden sich somit 667 L in der Druckkammer. Während der Unterbrechungen wurden am Befüllrohringang jeweils geringe Unterdrücke gemessen. Dies kann auf den Rückfluss der Lösung im Schlauch in Richtung Fass zurückgeführt werden.

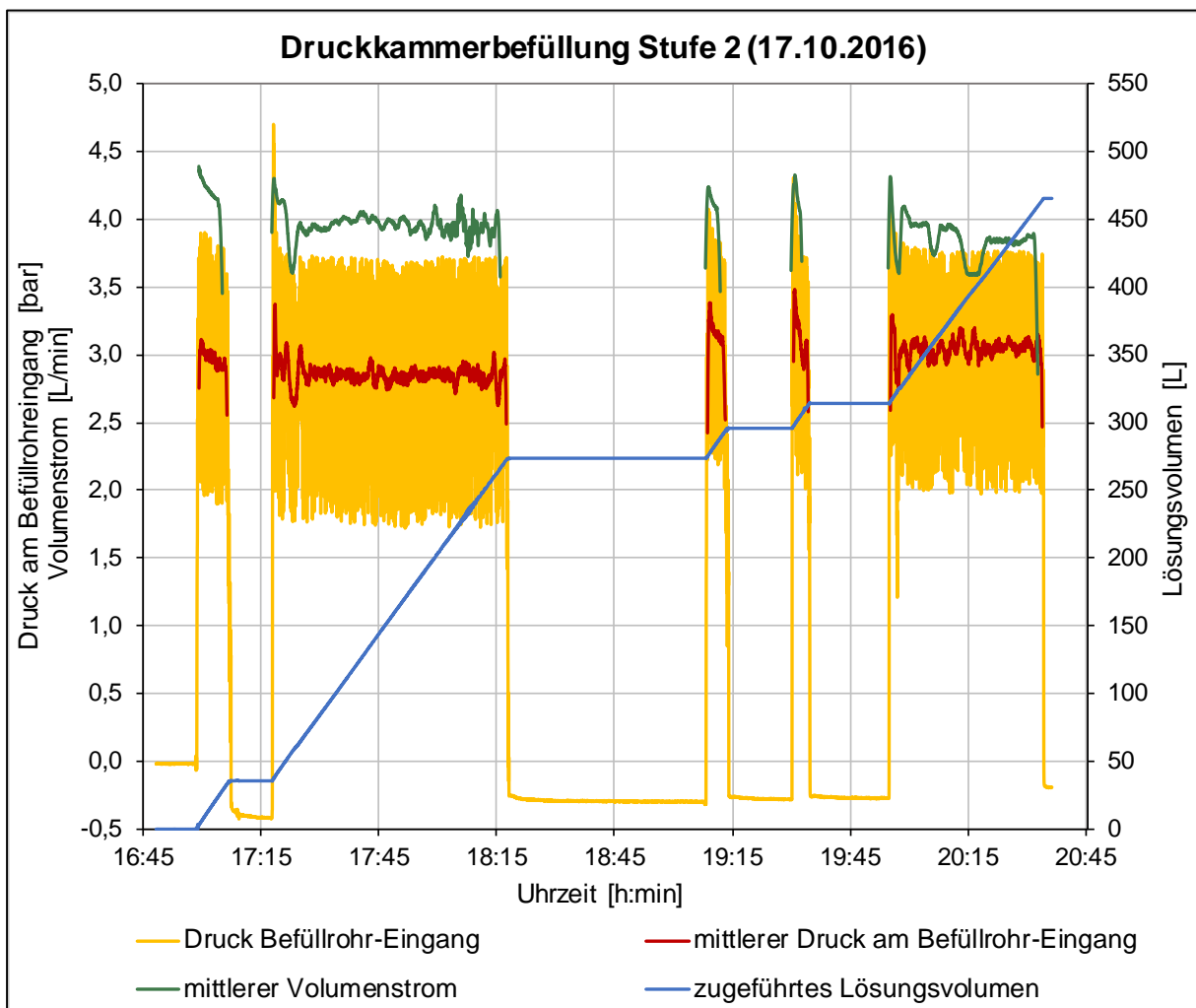


Abbildung 91: Druckkammerbefüllung Stufe 2 (17.10.2016)

Die **dritte Befüllung** erfolgte am 24.10.2016 (siehe Abbildung 92). Gegen 15:55 Uhr wurde mit dem Pumpen begonnen. Im ersten Schritt wurden bis 17:10 Uhr knapp 290 L Lösung in die Druckkammer eingefüllt. Der mittlere Druck am Befüllrohringang lag bei etwa 3 bar und nahm über die Zeit geringfügig ab. Der mittlere Volumenstrom betrug zu Beginn der Befüllung ca. 4 L/min, schwankte kurzzeitig zwischen 4,5 L/min und 3 L/min, lag dann bei 3,8 L/min, bevor er vor der Unterbrechung etwas abnahm. Während dieser Unterbrechung musste das Fass, aus dem Lösung in die Druckkammer gepumpt wurde, mit Lösung aus dem Vorratsbehälter aufgefüllt und mit Tracer versetzt werden. Nach kurzem Pumpen musste der Tracer nochmals untergemischt werden. Im zweiten Schritt der Befüllung wurden etwa 140 L in die Druckkammer gepumpt. Der mittlere Druck am Befüllrohringang lag bei etwa 3,1 bar. Kurzzeitig gab es eine starke Abnahme auf unter 2,5 bar. Der mittlere Volumenstrom betrug 3,7 L/min nach kurzen Schwankungen zwischen 4 L/min und 2,5 L/min.

Um 18:54 Uhr wurde die Befüllung beendet, da Lösung aus der Entlüftungsleitung tropfte. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich theoretisch insgesamt 1100 L Lösung in der Druckkammer (ohne Berücksichtigung von Abfluss in den Kontaktbereich). Die Entlüftungsleitung blieb bis zur nächsten Befüllung am 02.11.2016 geöffnet, es trat jedoch keine Lösung aus.

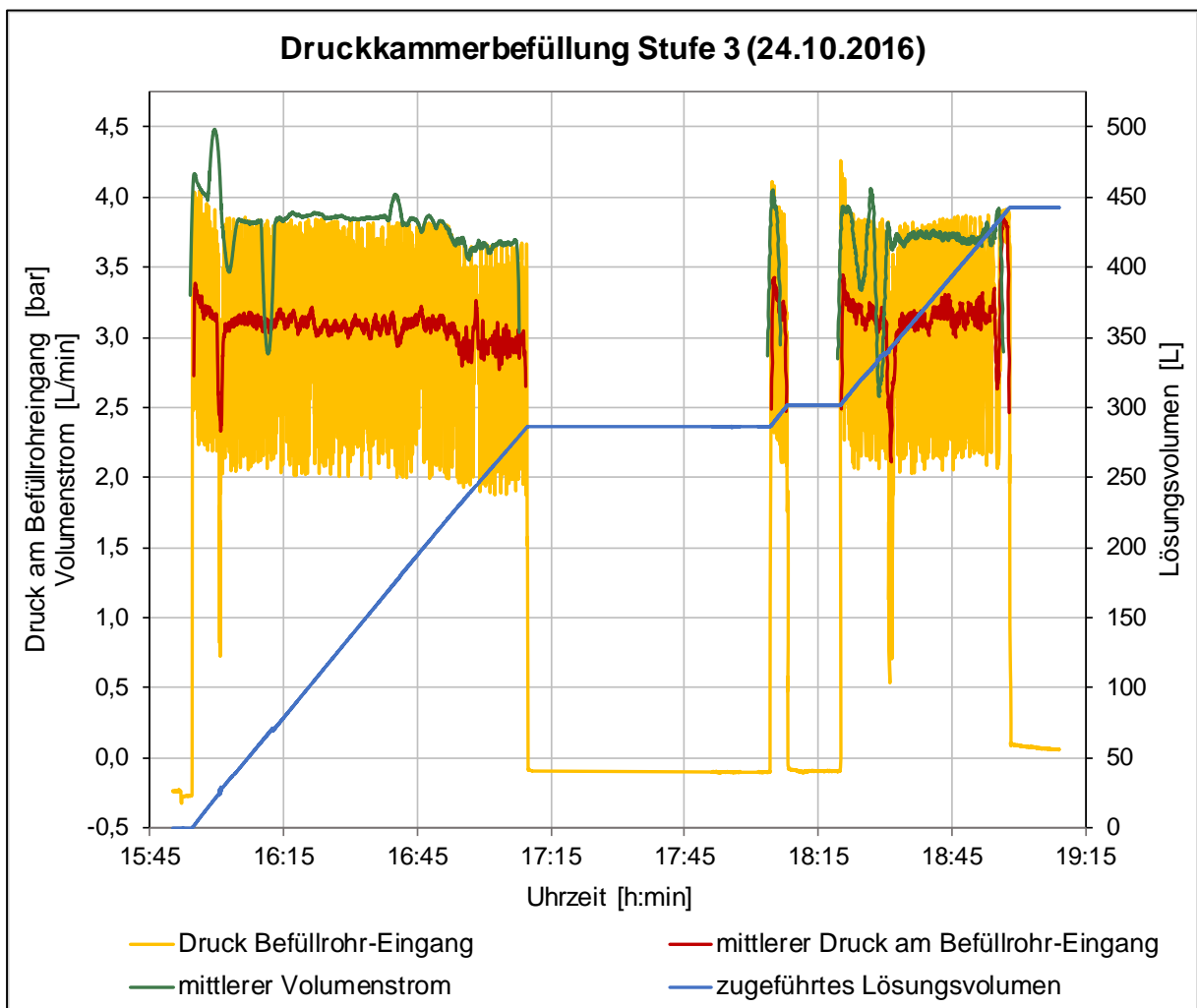


Abbildung 92: Druckkammerbefüllung Stufe 3 (24.10.2016)

Die **vierte Stufe** der Druckkammerbefüllung erfolgte am 02.11.2016 (siehe Abbildung 93). Die Lösung wurde ab 18:20 Uhr eingepumpt. Hierbei konnten weitere 244 L in die Druckkammer eingebracht werden. Der mittlere Druck am Befüllrohreingang lag in der ersten Hälfte bei 3,2 bar und stieg im weiteren Fortgang kontinuierlich bis auf 3,7 bar an. Der mittlere Volumenstrom begann bei knapp 4 L/min und nahm dann auf 3,3 L/min ab.

Während des gesamten Zeitraumes dieser Befüllstufe war die Entlüftungsleitung geöffnet. Die ausgetretene Lösung wurde aufgefangen und mengenmäßig erfasst. Es waren 32 L über die Entlüftungsleitung wieder aus der Druckkammer herausgeflossen. Diese Menge wurde bei der Bestimmung des zugeführten Fluidvolumens (in Abbildung 93) berücksichtigt. Es wurden somit ursprünglich 276 L Lösung in die Druckkammer eingeleitet.

Der Rückfluss der Lösung aus der Entlüftungsleitung der Druckkammer deutete an, dass diese bereits gefüllt ist, obwohl das Druckkammervolumen mit 1,8 m³ bestimmt wurde. Es wurde somit also bereits bei der Befüllung ein gewisser Fluiddruck aufgebracht. Die ausgetretene Lösung wurde beprobt und analysiert. Die Beprobung zeigte keine Abweichungen der ausgetretenen Lösung von der zugeführten Lösung.

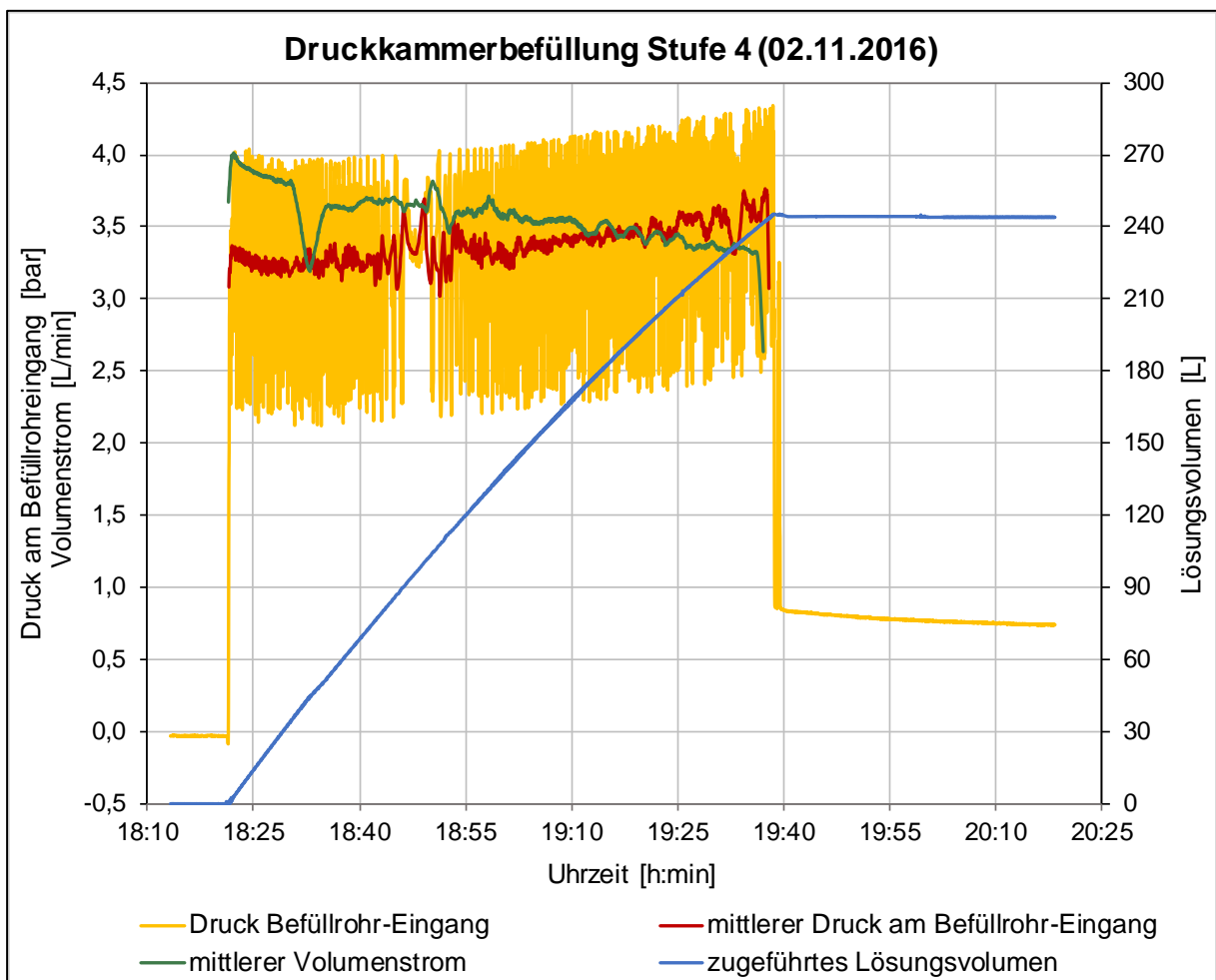


Abbildung 93: Druckkammerbefüllung Stufe 4 (02.11.2016)

Am Ende der Befüllungen befanden sich 1354 L Lösung in der Druckkammer. Diese Menge war mit knapp 450 L erheblich kleiner als das berechnete, theoretische Volumen der Druckkammer von 1800 L. Diese Differenz entspricht dem verbliebenen Restgasvolumen in der Druckkammer.

Aus dem Vergleich der einzelnen Befüllstufen ist ersichtlich, dass mit jeder Stufe der (mittlere) Druck am Befüllrohreingang von 2,5 bar bei Stufe 1 bis auf über 3,5 bar bei Stufe 4 zunimmt. Gleichzeitig verringert sich der mittlere Volumenstrom von 4,5 L/min bei Stufe 1 bis auf 3,3 L/min.

5.3 Druckbeaufschlagungen

5.3.1 Auswertung der Druckbeaufschlagungen

Die Druckbeaufschlagungen erfolgten, ebenso wie die Druckkammerbefüllung, stufenweise. Jede Stufe der Druckbeaufschlagung setzt sich aus der Druckerhöhung und der Haltephase zusammen. Zwischen November 2016 und September 2017 wurde zunächst in **acht Stufen** Flüssigkeitsdruck aufgebracht und zwischen den einzelnen Stufen der Druckabfall aufgezeichnet (siehe Tabelle 30). Die Daten zum Druckabfall nach den jeweiligen Druckstufen sind in Tabelle 31 zu finden. Der Druckabfall wurde über einige Tage bis zu mehreren Wochen gemessen. Die während der Druckbeaufschlagung und des Druckabfalles aufgezeichneten Daten wurden luftdruckkompensiert. Dafür wurden die Daten des in der Begleitstrecke installierten Luftdruckgebers verwendet.

Mit jeder Druckbeaufschlagung verringerte sich der mittlere Druckabfall nach dem Ende der Druckbeaufschlagung. Die Druckkammer und der dahinter befindliche Baustoff und das angrenzende Gebirge waren zunehmend mit der Lösung aufgesättigt. Durch den Lösungszutritt kann es durch Reaktion mit dem MgO-Baustoff zu Kristallisationen gekommen sein. Gleichzeitig wird so der Strömungswiderstand erhöht.

Bei den weiteren Druckbeaufschlagungen (Stufe DB 9 bis DB 15) wurde kein Druckabfall zwischen den einzelnen Stufen zugelassen. Diese sind in Tabelle 32 (Seite 138) zusammengefasst und nachfolgend erläutert.

Für eine vollständig gefüllte Druckkammer mit 1,8 m³ wurde ein Lösungsdruck (ohne zusätzliche Beaufschlagung) von 0,46 bar an der Sohle und 0 bar an der Firste berechnet.

Analog zur Druckkammerbefüllung ist auch bei der Druckbeaufschlagung zu beachten, dass das jeweils angegebene Lösungsvolumen dem eingepumpten Volumen entspricht, jedoch über die Zeit Lösung aus der Druckkammer in die Umgebung abgeflossen ist.

Während den Druckbeaufschlagungen wurden die Daten (Druck an Befüll- und Entlüftungsleitung, Luftdruck, Fassgewicht) alle 5 Sekunden aufgezeichnet. Während des Druckabfalls wurde das Messintervall auf 10 Minuten herabgesetzt.

Tabelle 30: Stufen der Druckbeaufschlagung mit Druckabfall (DB 1 bis D B8)

Druckbeaufschlagung (DB)	Datum	Lösungsvolumen in der Druckkammer [L]		Druck an Befüllung bei Druckbeaufschlagung [bar]	
		je DB	kumuliert	zu Beginn	am Ende
DB 1 (Stufe 4 der Befüllung)	02.11.2016	244,2	1354		0,82
DB 2	08.11.2016	12,8	1366	0,42	0,48
DB 3	09.11.2016	40,3	1407	0,45	0,67
DB 4	29.11.2016	51,4	1458	0,53	0,86
DB 5	04.01.2017	28,9	1487	0,72	0,98
DB 6	16.03.2017	33,2	1520	0,80	1,11
DB 7	24.07.2017	17,3	1537	0,92	1,10
DB 8	27.09.2017	28,3	1566	1,00	1,31

Tabelle 31: Druckabfall nach den jeweiligen Druckstufen

Druckstufe	Druckfall nach Druckstufe				
	Beginn	Ende	Dauer [d]	Gesamtdruckabfall [bar]	Mittlerer Druckabfall je Tag [mbar/d]
DB 1	02.11.2016	08.11.2016	5,6	0,31	52,6
DB 3	09.11.2016	29.11.2016	19,7	0,16	8,3
DB 4	29.11.2016	04.01.2017	35,9	0,13	3,7
DB 5	04.01.2017	16.03.2017	70,1	0,16	2,2
DB 6	16.03.2017	24.07.2017	129,5	0,18	1,4
DB 7	24.07.2017	27.09.2017	83,9	0,08	1,3
DB 8	27.09.2017	09.04.2018	193,7	0,18	0,9

Da bereits bei der letzten Stufe der Befüllung ein Lösungsdruck aufgebracht wurde, ist dies gleichzeitig die **erste Druckbeaufschlagung**. Diese fand am 02.11.2016 statt. Hierbei befanden sich 1354 L Lösung in der Druckkammer. Der Lösungsdruck, gemessen am Befüllrohreingang, betrug am Ende dieser Stufe (Stufe 4 der Befüllung und Stufe 1 der Druckbeaufschlagung) 0,82 bar. In Abbildung 94 ist die erste Stufe der Druckbeaufschlagung dargestellt.

Nach der ersten Druckbeaufschlagung fiel der Druck bis zur nächsten Druckbeaufschlagung am 08.11.2016 um 0,31 bar innerhalb von knapp 6 Tagen. Das Diagramm für den Druckabfall (02.11.2016 – 08.11.2016) befindet sich in Anlage 2 (Abbildung A-22).

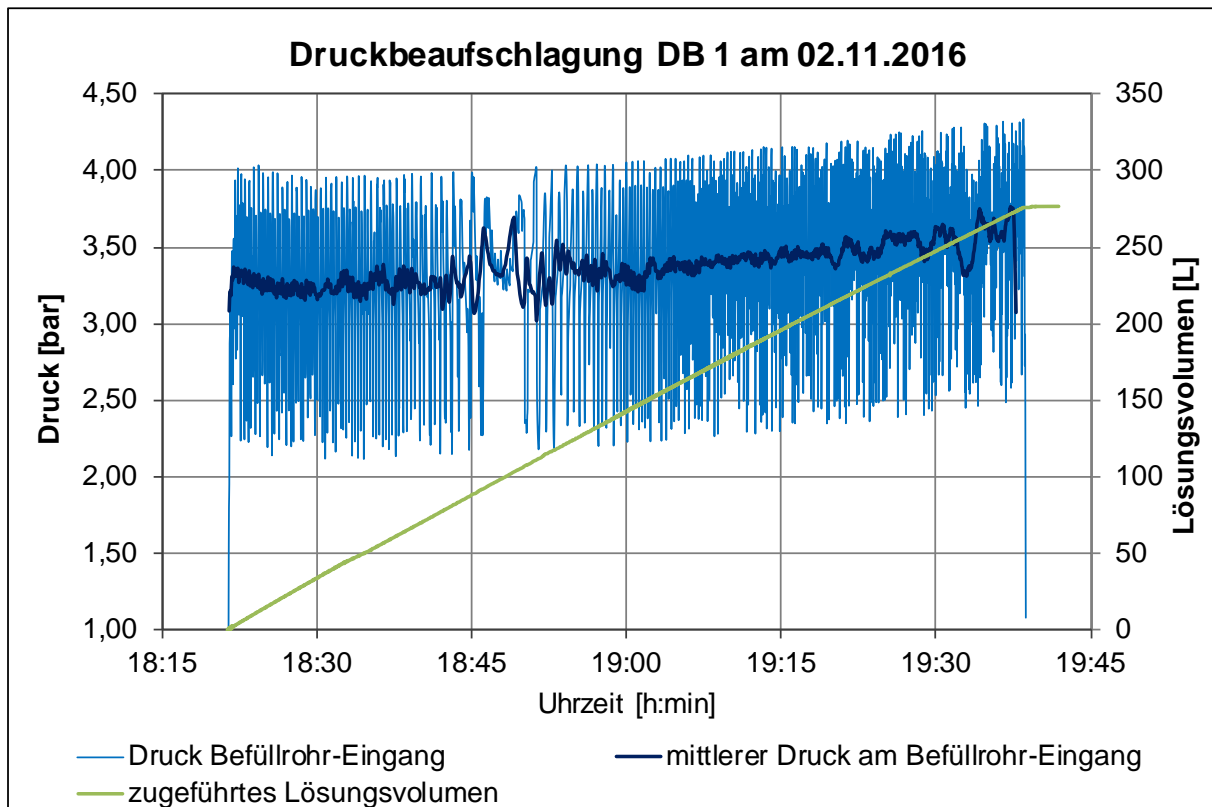


Abbildung 94: 1. Druckbeaufschlagung (DB 1) am 02.11.2016

Die **zweite Druckbeaufschlagung** (DB 2) wurde am 08.11.2016 durchgeführt. Zu Beginn war der Lösungsdruck auf 0,42 bar gefallen. Es wurden 12,8 L Lösung in die Druckkammer eingepumpt. Am Ende der Druckstufe herrschte ein Lösungsdruck von 0,48 bar. Bis zur nächsten, **dritten Stufe der Druckbeaufschlagung** (DB 3) am 09.11.2016 wurde ein nur geringer Druckabfall im Laufe eines Tages auf 0,45 bar verzeichnet. Während dieser dritten Druckstufe wurden weitere 40,3 L Lösung in die Druckkammer eingefüllt. Am Ende betrug Lösungsdruck 0,67 bar. Nach der dritten Druckstufe fiel der Druck im Mittel um 8,3 mbar/d ab. In Abbildung 95 sind die Druckbeaufschlagungen DB 2 und DB 3 dargestellt. Das Diagramm für den anschließenden Druckabfall (09.11.2016 – 29.11.2016) befindet sich in Anlage 2 (Abbildung A-23).

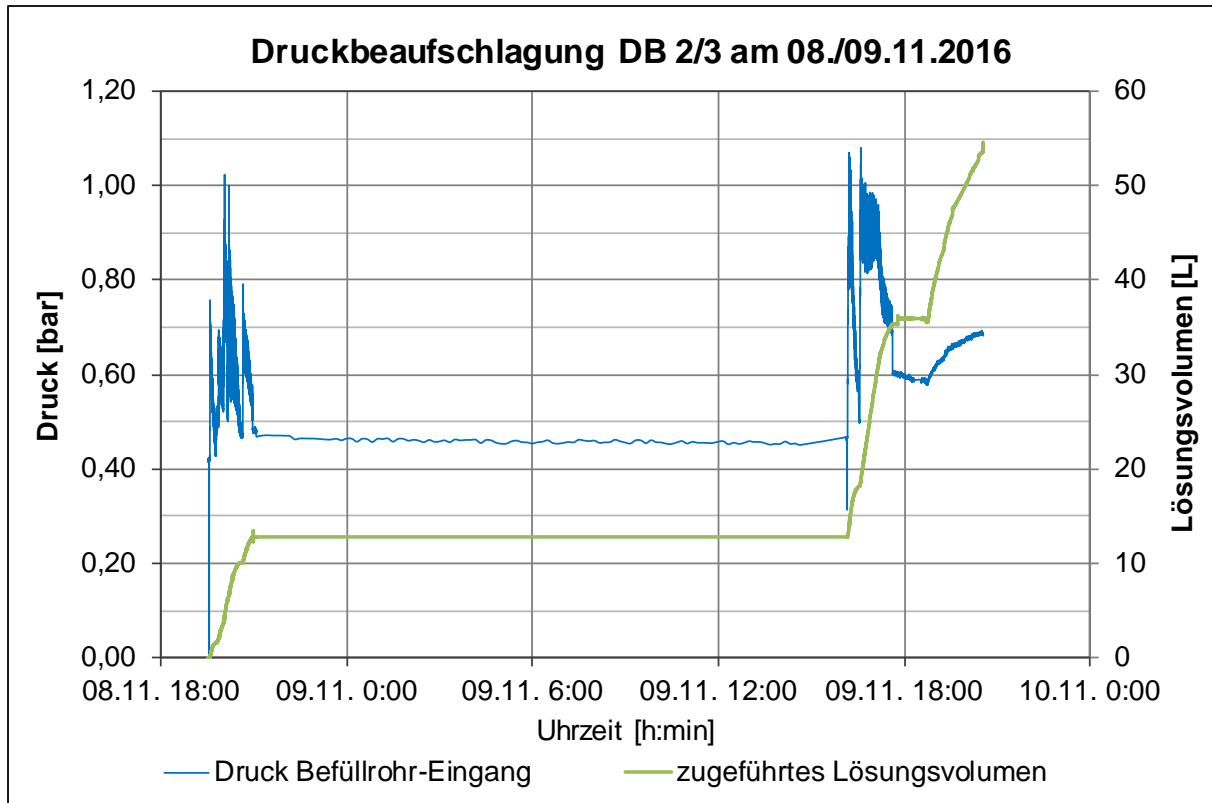


Abbildung 95: 2. und 3. Druckbeaufschlagung (DB 2, DB 3) am 08./09.11.2016

Zu Beginn der **vierten Druckstufe** hatte sich der Lösungsdruck auf 0,53 bar reduziert. Es wurden während der Druckbeaufschlagung 51,4 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. Danach herrschte ein Lösungsdruck von 0,86 bar. Nach dieser Druckbeaufschlagung fiel der Druck innerhalb von knapp 36 Tagen um 0,13 bar. Der mittlere Druckabfall betrug 3,7 mbar/d. In Abbildung 96 ist die vierte Stufe der Druckbeaufschlagung dargestellt. Das Diagramm für den anschließenden Druckabfall (29.11.2016 - 04.01.2017) befindet sich in Anlage 2 (Abbildung A-24).

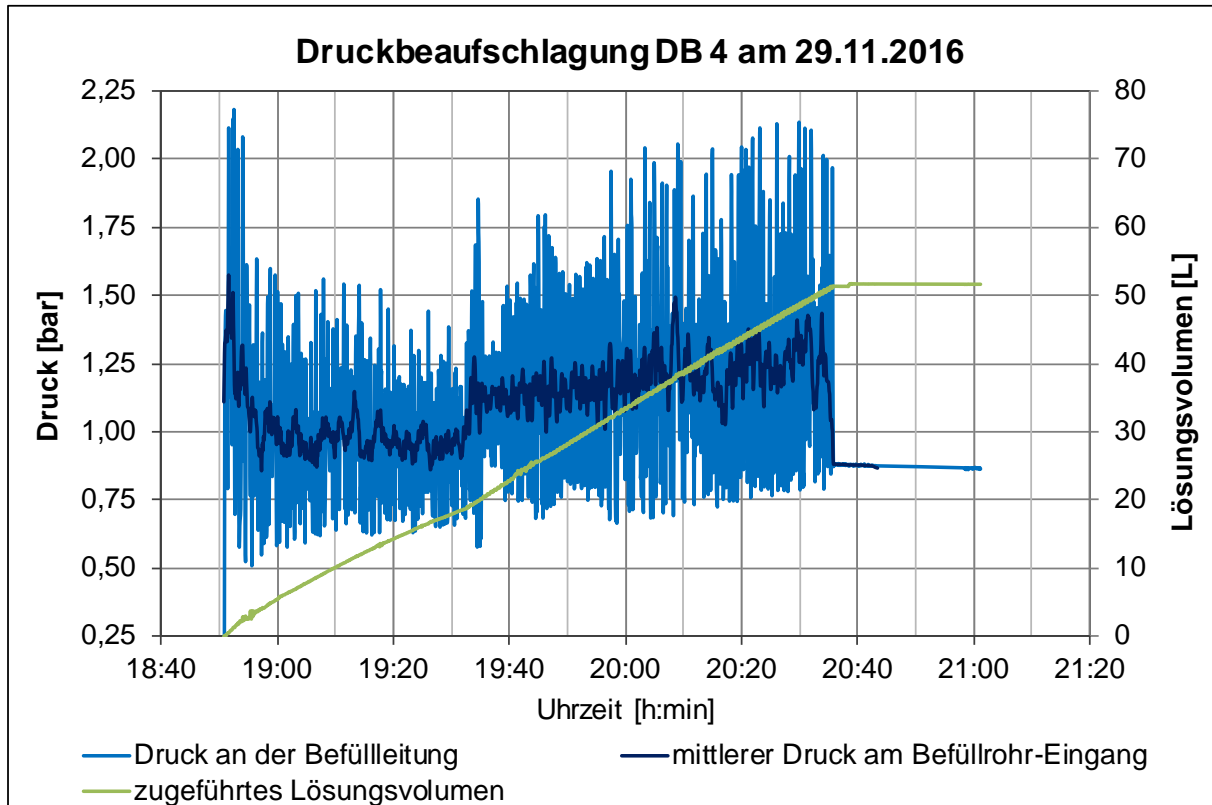


Abbildung 96: 4. Druckbeaufschlagung (DB 4) am 29.11.2016

Vor der **fünften Druckbeaufschlagung** am 04.01.2017 lag der Lösungsdruck bei 0,71 bar. Nach dem weiteren Einpumpen von 28,9 L Lösung während der Beaufschlagung wurden insgesamt 1487 L in die Druckkammer gepumpt und der Lösungsdruck lag bei knapp 1 bar. Anschließend fiel der Druck innerhalb von 70 Tagen um 0,16 bar mit etwa 2,2 mbar/d ab. In Abbildung 97 ist die fünfte Stufe der Druckbeaufschlagung dargestellt. Das Diagramm für den anschließenden Druckabfall (04.01.2017 – 16.03.2017) befindet sich in Anlage 2 (Abbildung A-25).

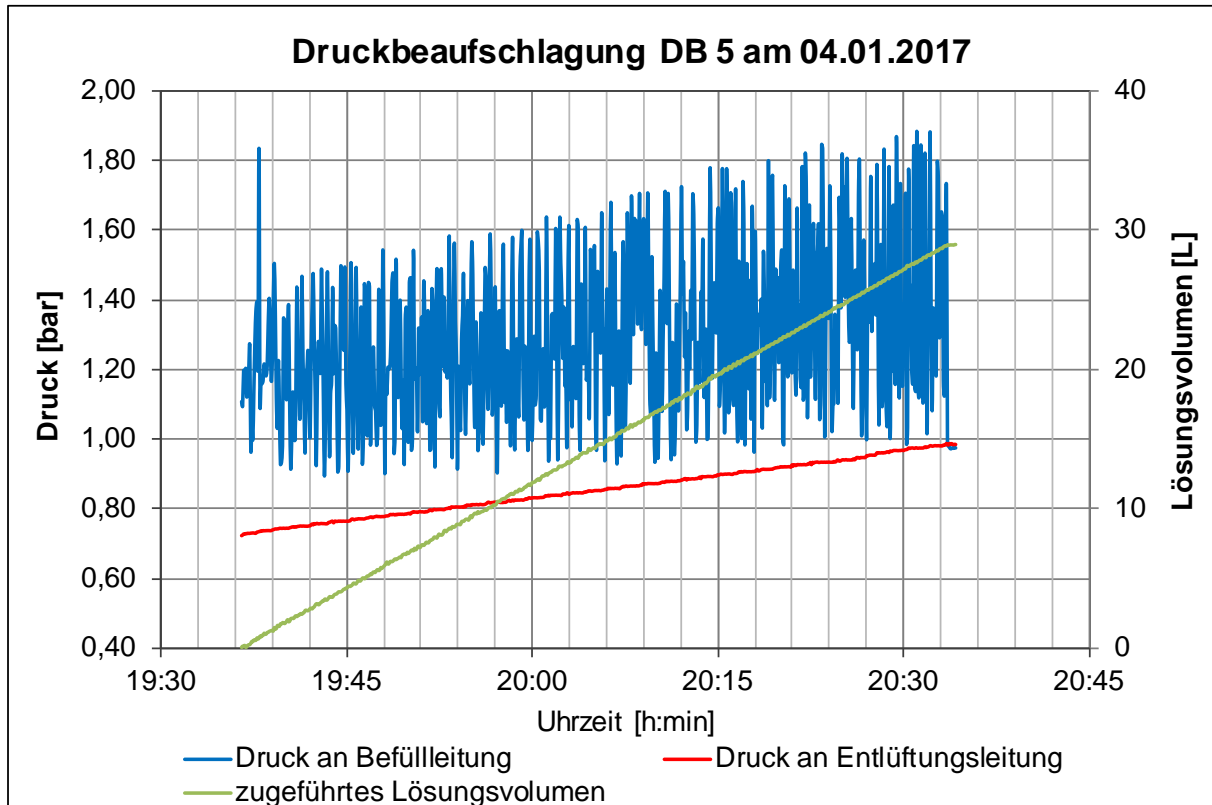


Abbildung 97: 5. Druckbeaufschlagung (DB 5) am 04.01.2017

Die **sechste Stufe der Druckbeaufschlagung** erfolgte am 16.03.2017. Der Druckverlauf ist in Abbildung 98 dargestellt. Zu Beginn herrschte ein Lösungsdruck von 0,80 bar. Während der Beaufschlagung wurden 33 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. Am Ende der Druckstufe betrug der Lösungsdruck 1,11 bar. Im Anschluss wurde der Druckabfall gemessen (Abbildung A-26 in Anlage 2). Der mittlere Druckabfall betrug 1,4 mbar/d. Insgesamt fiel der Druck um 0,18 bar innerhalb von über 129 Tagen.

Während dieser Druckstufe konnte der Druck für eine Stunde kurzzeitig konstant gehalten werden, indem laufend an der Pumpe nachgeregelt wurde. Dies war aufgrund der niedrigen Drücke bei den ersten Druckstufen nicht möglich. Der dabei gemessene Volumenstrom betrug etwa 0,8 L/min. Daraufhin wurde beschlossen, den Fluiddruck nach Möglichkeit über mehrere Stunden oder Tage hinweg konstant zu halten und den eindringenden Volumenstrom zu messen.

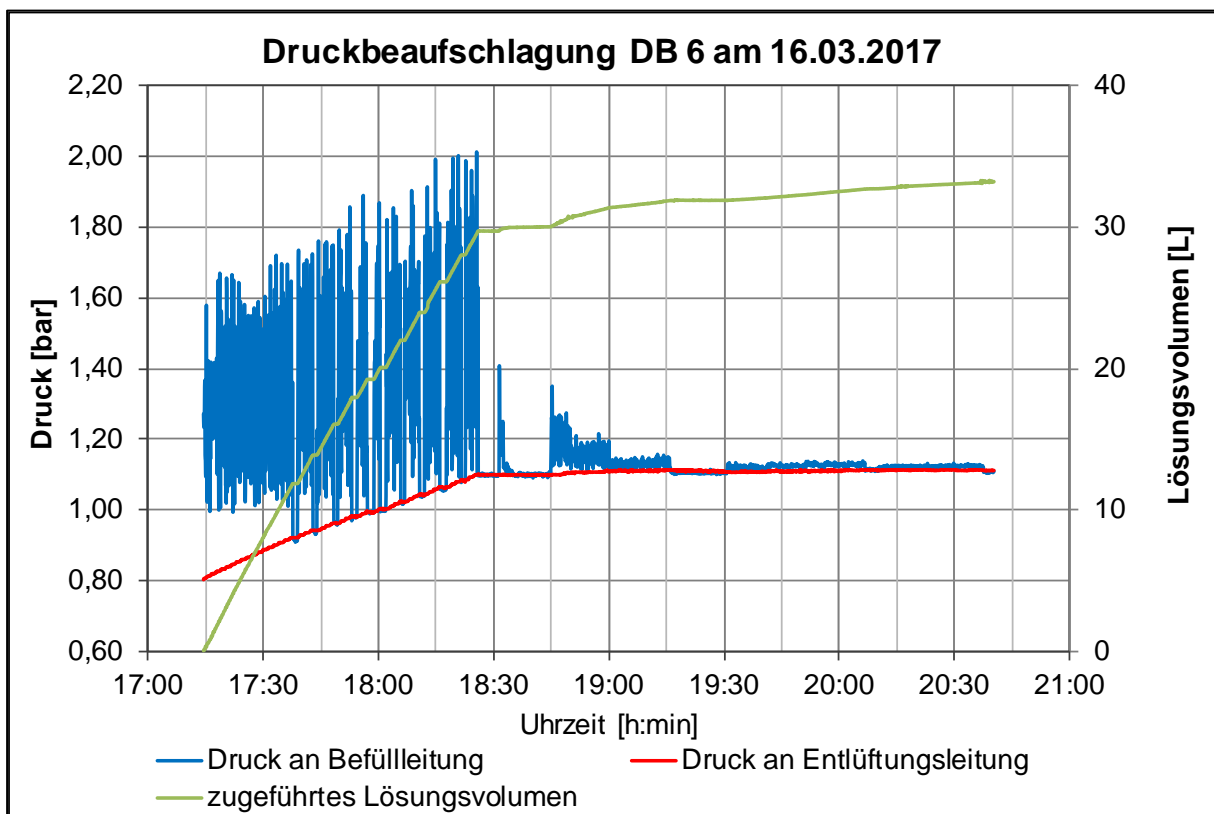


Abbildung 98: 6. Druckbeaufschlagung am 16.03.2017

Für die **siebte Druckbeaufschlagungsstufe (DB 7)** am 24.07.2017 wurde, wie bereits bei der Stufe DB 6, ein Lösungsdruck von 1,1 bar aufgebracht. Nach der letzten Druckbeaufschlagung war der Druck auf 0,92 bar gesunken. Der Druckverlauf ist in Abbildung 99 dargestellt. Es wurden insgesamt 17,34 L Lösung über die Druckkammer eingebracht, davon 15,1 L während der Druckerhöhung und 2,2 L während der Haltephase. Der Druck von 1,1 bar konnte für 4,7 Stunden konstant gehalten werden. Während dieser Zeit lag der mittlere Zustrom bei 0,46 L/h. Nach der Druckbeaufschlagung fiel der Druck innerhalb von 84 Tagen um 0,08 bar. Der mittlere Druckabfall betrug 1,3 mbar/d.

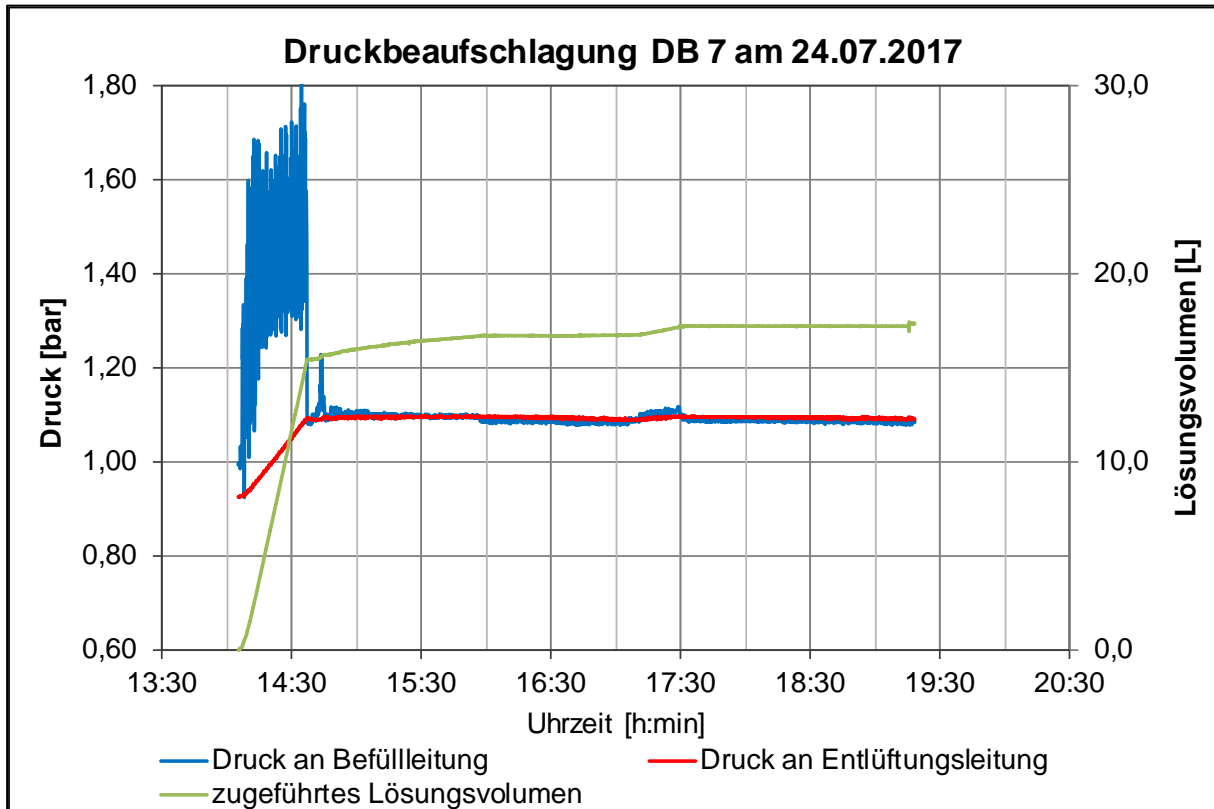


Abbildung 99: 7. Druckbeaufschlagung (DB 7) am 24.07.2017

In Abbildung 100 ist der Druckverlauf der **achten Druckbeaufschlagung (DB 8)** am 27.09.2017 dargestellt. Es wurden hier insgesamt 28,28 L Lösung eingepumpt, davon 24,0 L während der Druckerhöhung. Der aufgebrachte Lösungsdruck von 1,3 bar konnte für etwa 10 Stunden gehalten werden. Der mittlere Zustrom während der Haltephase betrug 0,42 L/h. Nach der Druckbeaufschlagung fiel der Druck innerhalb von 193 Tagen um 0,18 bar. Der mittlere Druckabfall betrug 0,9 mbar/d.

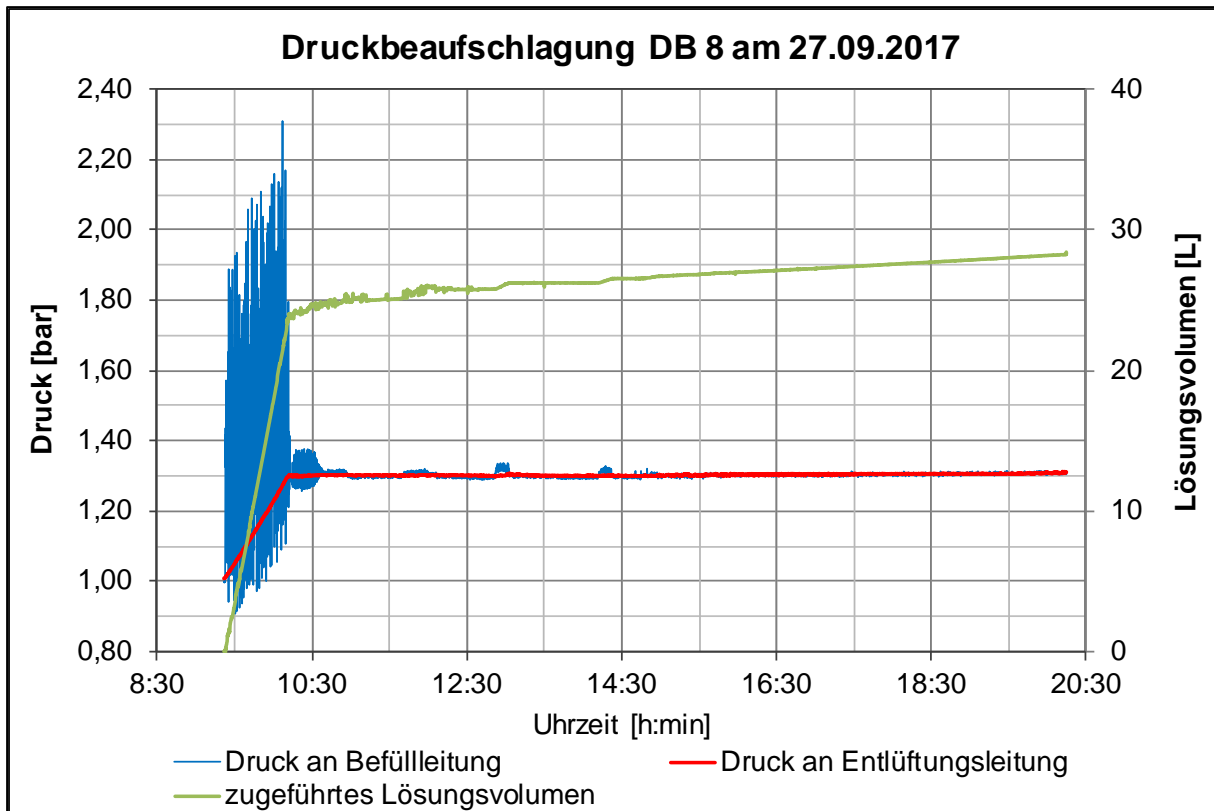


Abbildung 100: 8. Druckbeaufschlagung (DB 8) am 27.09.2017

Für die 7. und 8. Druckbeaufschlagung wurde der Pumpendruck manuell durch die Mitarbeiter der TU Bergakademie Freiberg nachgeregelt. Der aufgebrachte Lösungsdruck konnte so über einige Stunden konstant gehalten werden konnte. Für die weiteren Druckbeaufschlagungen wurde der Pumpenstand so angepasst bzw. umgebaut, dass der Lösungsdruck automatisch über mehrere Tage bis Wochen konstant gehalten werden konnte.

In den vorangegangenen Druckbeaufschlagungen hatte sich gezeigt, dass die instationären Druckabfallkurven (Pulstests) für eine Bestimmung der Permeabilität nicht geeignet waren, da nicht auszuschließende Restgasmengen im System (hauptsächlich in der Druckkammer) zu einer Verfälschung der Messergebnisse durch die Kompressibilität bzw. Expansion des Restgases führen. Um diesen Einfluss des Lösungsstromes aus der Druckkammer infolge der Gasexpansion zu verringern, wurden zwischen April 2018 und Mai 2019 9 weitere Druckbeaufschlagungen durchgeführt. Weiterhin wurde angestrebt, eine möglichst lange Phase mit konstantem Druck zu erreichen.

In Tabelle 32 sind die Stufen der Druckbeaufschlagung ohne Druckabfallmessung aufgeführt. In der Tabelle sind außerdem das (über die Druckkammer) eingebrachte Lösungsvolumen, sowohl je Druckbeaufschlagungsstufe als auch das kumulierte Lösungsvolumen enthalten. Weiterhin sind die Dauer der Druckstufe, in der der Druck konstant gehalten wurde, sowie der mittlere Zustrom an Lösung während der Haltephase aufgeführt. Für die Berechnung des mittleren Zustroms wurde die während der Haltephase in die Druckkammer eingebrachte Lösungsmenge über die Dauer der Haltephase gemittelt.

Tabelle 32: Stufen der Druckbeaufschlagung ohne Druckabfallmessung (DB 9 - DB 17)

Druckbeaufschlagung (DB)	Datum (Beginn DB)	in DK eingebrachtes Lösungsvolumen [L]		aufgebrachter Lösungsdruck [bar]	Dauer Haltephase [d]	mittlerer Zustrom während der Haltephase [l/h]
		je DB	kumuliert			
DB 9	09.04.2018	30,0	1596	1,4	14,1	0,010
DB 10	24.04.2018	71,5	1667	2,2	15,0	0,005
DB 11	17.05.2018	49,6	1717	3,0	63,1	0,004
DB 12	23.07.2018	50,1	1767	5,0	30,1	0,000
DB 13	30.08.2018	27,3	1794	6,1	19,5	0,006
DB 14	24.09.2018	48,1	1842	9,6	40,5	0,015
DB 15	27.11.2018	91,1	1952	12,6	137,7	0,022
DB 16	23.04.2019	44,5	1997	17,3	20,9	0,061
DB 17	14.05.2019	69,6	2067	28,0	1,0	2,030

Bei den meisten Druckbeaufschlagungen, insbesondere bei niedrigen Drücken, konnte der Druck nicht über einen langen Zeitraum konstant gehalten werden, sodass es zu Schwankungen oder auch zu einem Druckabfall kam. Dies wurde korrigiert, indem das eingebrachte Lösungsvolumen für einen konstanten Druck während der Haltephase berechnet wurde.

In Abbildung 102 bis Abbildung 116 zu den Druckbeaufschlagungen sind sowohl das gemessene eingebrachte als auch das für einen konstanten Druck korrigierte Lösungsvolumen eingetragen. Eine detaillierte Beschreibung und Berechnung zur Korrektur des Lösungsvolumens befindet sich unter Abschnitt 5.3.2.

Bei Druckänderungen ändert sich das Volumen des in der Druckkammer vorhandenen Gases. Bei zum Teil sprunghaften Änderungen des aufgebrachten Lösungsdruckes ergeben sich so zum Teil sprunghafte Änderungen beim eingebrachten Lösungsvolumen. Dies zeigt sich besonders gut bei der Druckbeaufschlagungsstufe von 3 bar (DB 11). Die Daten der Druckbeaufschlagung sind beispielhaft in Abbildung 101 dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei sprunghaft steigendem Druck (siehe rote Linie) sprunghaft Lösung in die Druckkammer (siehe hellgrüne Linie) eingebracht wird. Bei fallendem Druck hingegen (beispielsweise zwischen dem 24.06.2018 und dem 12.07.2018 in Abbildung 101) wird keine Lösung eingebracht, da sich das Gas in der Druckkammer durch den fallenden Druck ausdehnt. Damit wird keine Lösung in die Druckkammer eingebracht, aber das Volumen des expandierenden Gases führt trotzdem zu einer Strömung der Lösung aus der Druckkammer in die Druckkammer-Umgebung (z.B. Auflockerungszone, Bauwerk). Für eine genaue Auswertung wurde das eingebrachte Lösungsvolumen ab dem Maximaldruck zu Beginn der Haltephase (3,1 bar – siehe Pfeil in Abbildung 101) korrigiert.

Das korrigierte Lösungsvolumen ist in Abbildung 101 als dunkelgrüne Linie eingezeichnet und entspricht dem Lösungsvolumen, das aus der Druckkammer in die Umgebung strömt. So wurde für den fallenden Druck während der Haltephase (von 3,1 bar auf 2,9 bar) 5,3 L in die Druckkammer gepumpt. In Richtung Auflockerungszone bzw. Bauwerk haben hingegen 8,7 L

Lösung die Druckkammer verlassen (siehe Differenz zwischen hell- und dunkelgrüner Linie in Abbildung 101).

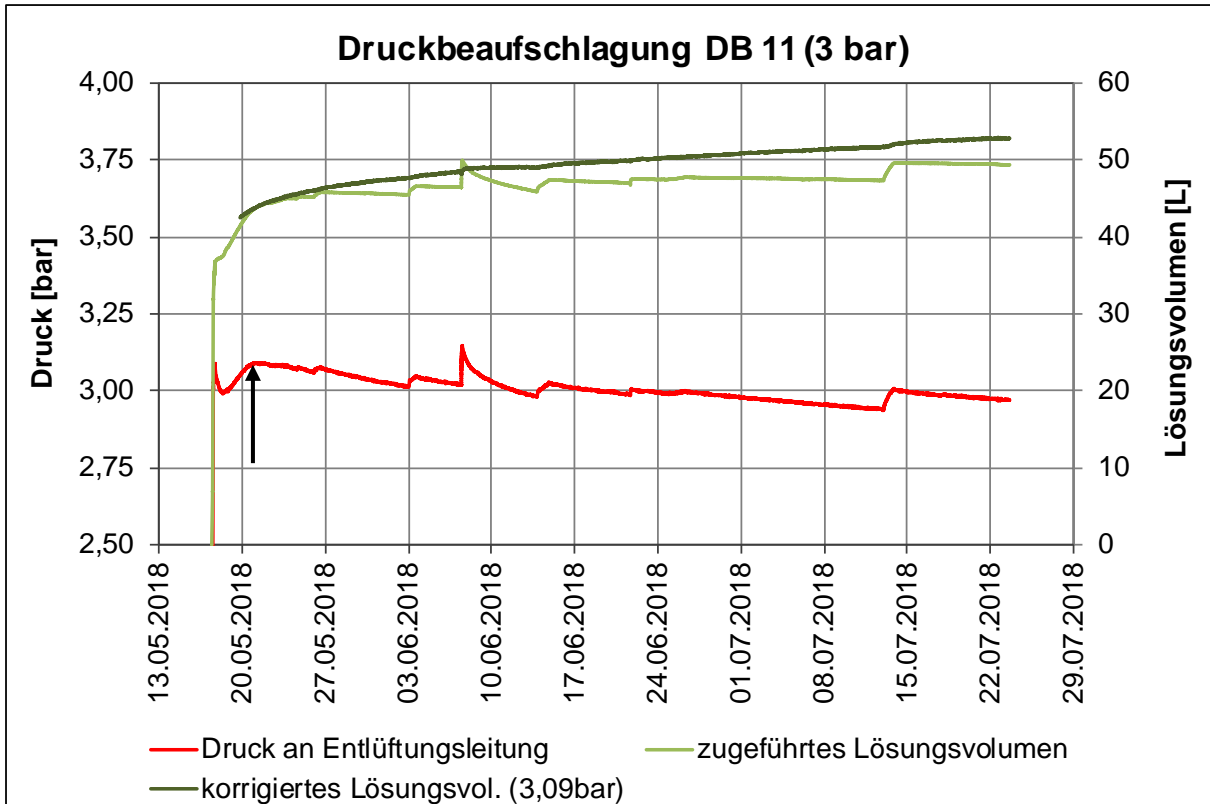


Abbildung 101: Druckbeaufschlagung bei 3 bar mit schwankendem bzw. leicht fallenden Druck

Die **neunte Druckbeaufschlagung (DB 9)** wurde ab dem 09.04.2018 durchgeführt. Der Druckverlauf und das eingebrachte Lösungsvolumen sind in Abbildung 102 dargestellt. Der aufgebrauchte Lösungsdruck betrug etwa 1,4 bar. Während der zweiwöchigen Haltephase fiel der Druck von 1,42 bar auf 1,37 bar. Zwischen dem 11.04.2018, 17 Uhr und dem 13.04.2018, 16 Uhr wurden keine Daten aufgezeichnet, sodass der Druck und das Lösungsvolumen für diesen Zeitraum interpoliert wurden. Das Lösungsvolumen wurde für einen konstanten Druck von 1,42 bar korrigiert. Während der gesamten Stufe wurden 30,0 L in die Druckkammer eingebracht, davon 26,5 L während der Druckerhöhung von 1,1 bar auf 1,4 bar und 3,5 L während der Haltephase. Ausgehend von einem konstanten Druck von 1,42 bar haben 6,9 L Lösung die Druckkammer während der Haltephase verlassen.

Der mittlere Zustrom während der Haltephase betrug 0,010 L/h. Die kumulierte Lösungsmenge, die in die Druckkammer eingeleitet wurde, betrug am Ende der Stufe knapp 1600 L.

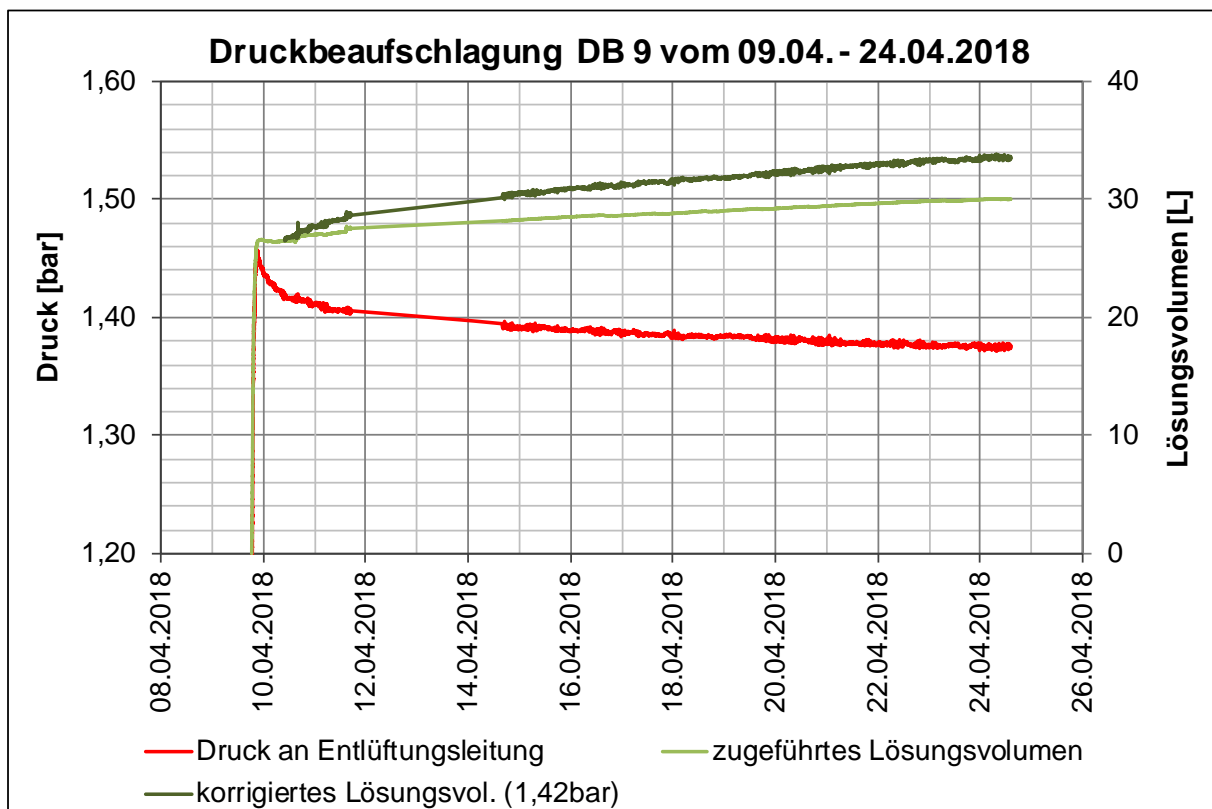


Abbildung 102: 9. Druckbeaufschlagung vom 09.04. bis 24.04.2018

Die **zehnte Druckbeaufschlagung** (DB 10) fand ab dem 24.04.2018 statt. Diese ist in Abbildung 103 dargestellt. Der aufgebrauchte Lösungsdruck lag bei 2,2 bar. Die Stufe konnte knapp drei Wochen gehalten werden, wobei die Haltephase erst ab dem 02.05.2018 beginnt, da zuvor Leckagen aufgetreten waren. Auch bei dieser Stufe ist der Druck während des Betrachtungszeitraumes von 2,23 bar auf 2,13 bar gesunken, sodass das eingebrachte Lösungsvolumen für einen konstanten Druck von 2,23 bar korrigiert wurde. Während dieser Druckbeaufschlagung wurden insgesamt 71,5 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. In der Phase der Druckerhöhung (bis 26.04.2018) wurden 58,4 L eingebracht und 1,7 L während der Haltephase (02.05.-17.05.2018). Der mittlere Zustrom betrug hier 0,005 L/h. Bei einem konstanten Druck von 2,23 bar sind während der Haltephase 5,6 L Lösung aus der Druckkammer in die Umgebung (Auflockerungszone, Bauwerk) geflossen.

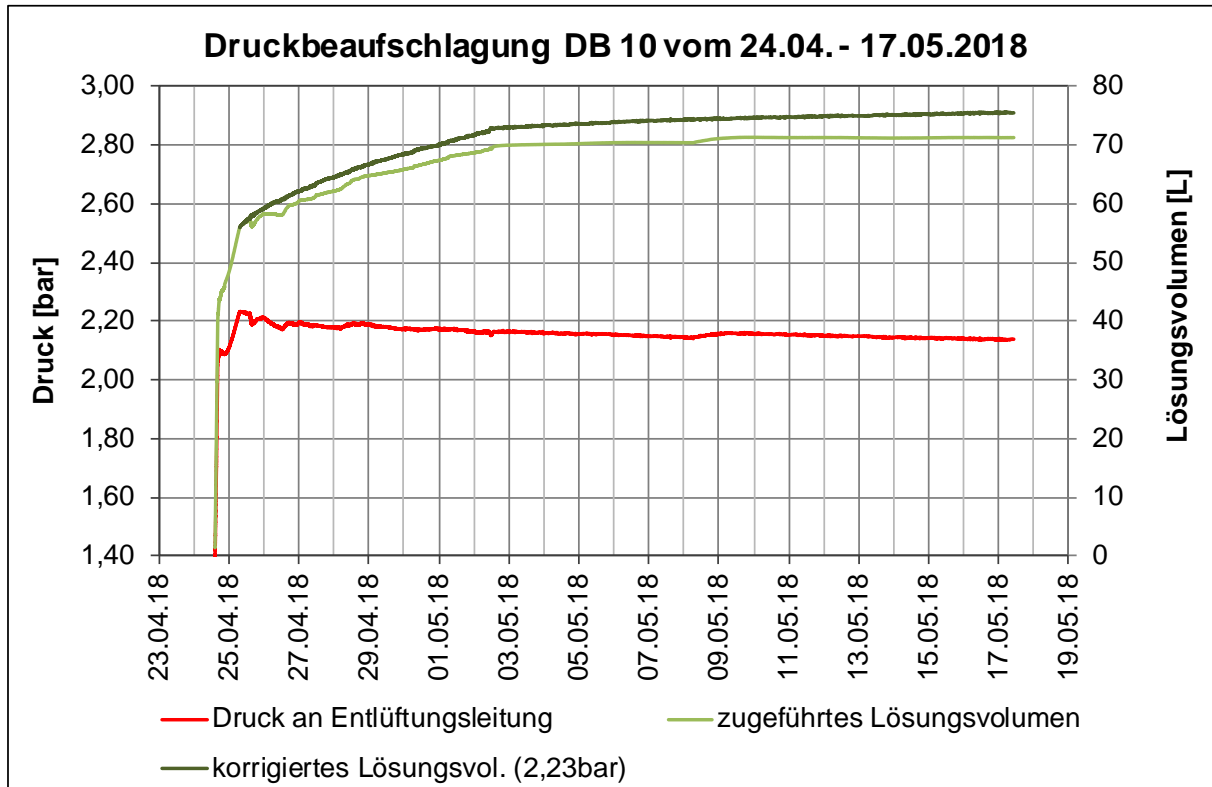


Abbildung 103: 10. Druckbeaufschlagung vom 24.04. bis 17.05.2018

Die **elfte Druckbeaufschlagung** (DB 11) hat am 17.05.2018 begonnen. Diese ist in Abbildung 104 dargestellt. Der aufgebrauchte Lösungsdruck betrug 3,0 bar. Diese Stufe wurde für etwa zehn Wochen gehalten. Bei der 3-bar-Stufe sinkt der Druck über die Haltephase ab. Jedoch gibt es mehrere sprunghafte Anstiege, die auf die Regelung der Pumpe zurückzuführen sind. Diese sprunghaften Anstiege des Druckes spiegeln sich auch beim zugeführten Lösungsvolumen (hellgrüne Linie in Abbildung 104) wider. Das Lösungsvolumen wurde für einen konstanten Druck von 3,09 bar korrigiert. Es wurden in dieser Druckstufe 49,6 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. Dabei wurden 44,3 L während der Druckerhöhung und 5,3 L während der Haltephase eingepumpt. Der mittlere Zustrom während der Haltephase betrug 0,004 L/h.

Bei einem konstanten Druck von 3,09 bar sind während der Haltephase 8,0 L Lösung aus der Druckkammer in die Umgebung (Auflockerungszone, Bauwerk) geflossen.

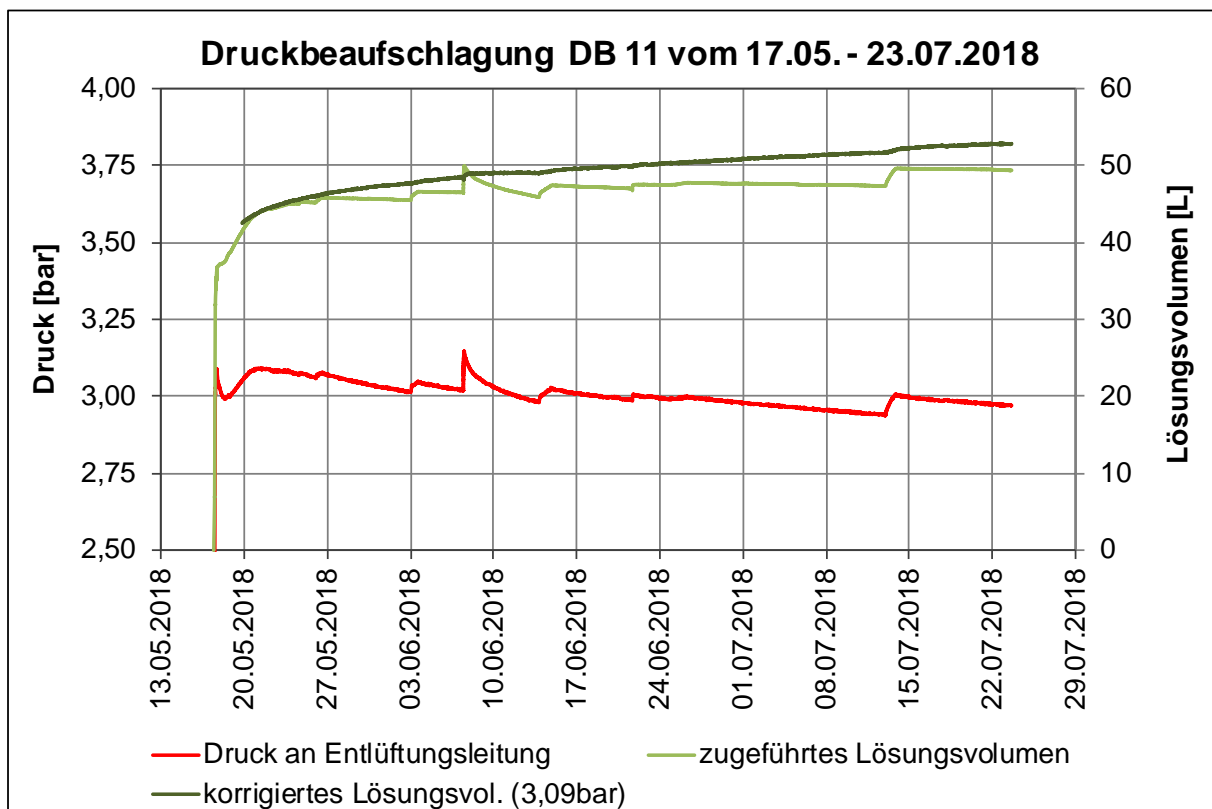


Abbildung 104: 11. Druckbeaufschlagung vom 17.05. bis 23.07.2018

Die **zwölfte Druckbeaufschlagung** (DB 12) begann am 23.07.2018. Diese ist in Abbildung 105 zu sehen. Es wurde dabei ein Lösungsdruck von 5,0 bar aufgebracht. Die Stufe wurde für etwa einen Monat gehalten. Über die gesamte Stufe ist der Druck von anfangs 5,0 bar auf 4,7 bar abgesunken, obwohl die Pumpe einen Tag nach Beginn der Druckbeaufschlagung nochmals nachgeregelt wurde. Das zugeführte Lösungsvolumen wurde für einen konstanten Druck von 5,09 bar korrigiert. Es wurden somit 50,1 L in die Druckkammer eingebracht. Diese Menge wurde ausschließlich während der Druckerhöhung eingebracht. Während der Haltephase wurde keine Lösung eingepumpt, sondern es ist Lösung zurückgeflossen. Erst kurz vor Ende der Druckbeaufschlagung hat die Pumpe selbstständig nachgeregelt und der Druck war nochmals kurzzeitig angestiegen. Der mittlere Zustrom während der Haltephase betrug somit 0,00 L/h.

Bei einem konstanten Druck von 5,09 bar sind während der Haltephase 5,5 L Lösung aus der Druckkammer in die Umgebung (Auflockerungszone, Bauwerk) geflossen.

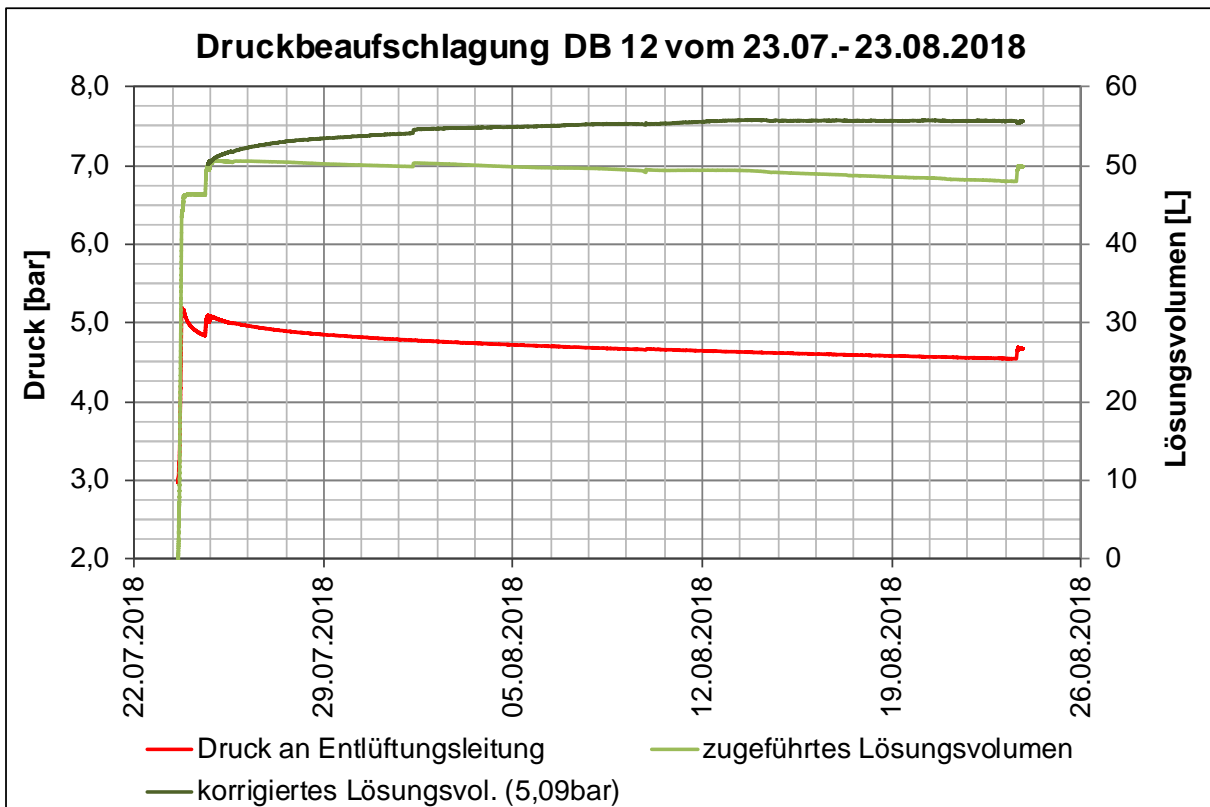


Abbildung 105: 12. Druckbeaufschlagung vom 23.07. bis 23.08.2018

Die **13. Druckbeaufschlagung** (DB 13) begann zwischen dem 24.08. und dem 30.08.2018. Diese ist in Abbildung 106 dargestellt. Der genaue Beginn der Druckerhöhung ist nicht bekannt, da es in dieser Zeit zu einem Stromausfall kam, sodass keine Daten aufgezeichnet wurden. In der Abbildung ist dieser Zeitraum gestrichelt eingezeichnet. Der ab dem 30.08.2019 aufgebrachte Lösungsdruck betrug 6,1 bar. Die Stufe wurde für knapp drei Wochen gehalten. Das zugeführte Lösungsvolumen wurde für einen konstanten Druck von 6,13 bar korrigiert. Während der Druckbeaufschlagung wurden 27,4 L Lösung in die Druckkammer eingebracht, davon 24,7 L während der Druckerhöhung und 2,7 L während der Haltephase. Der mittlere Zustrom während der Haltephase betrug nur 0,006 L/h. Insgesamt wurden bis zum Ende dieser Druckstufe 1794 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. Bei einem konstanten Druck von 6,13 bar sind während der Haltephase ebenfalls 2,7 L Lösung aus der Druckkammer in die Umgebung (Auflockerungszone, Bauwerk) geflossen.

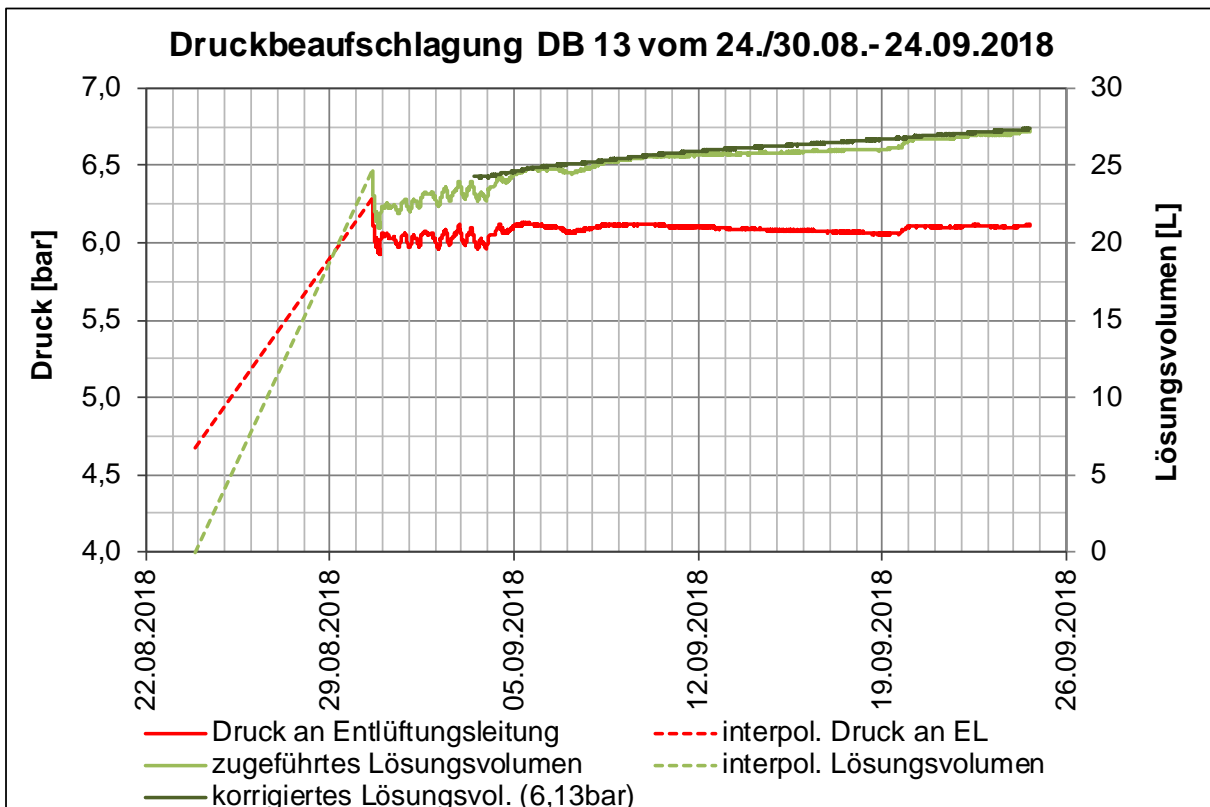


Abbildung 106: 13. Druckbeaufschlagung vom 24./30.08. bis 24.09.2018

Mit der **14. Druckbeaufschlagung (DB 14)** wurde am 24.09.2018 begonnen. Diese ist in Abbildung 107 dargestellt. Es wurde ein Lösungsdruck von 9,6 bar aufgebracht. Aufgrund der vergleichsweise großen Druckerhöhung wurde zunächst der Druck auf 8,0 bar gesteigert, für knapp drei Tage gehalten und dann auf 9,6 bar erhöht. Dieser konnte für etwa 40 Tage (27.09. - 07.11.2018) gehalten werden. Nach dem 07.11.2018 gab es technische Probleme an der Pumpe, sodass der Druck zunächst abgesunken ist. Nach der Installation einer neuen Pumpe (14.11.2018) konnte der Druck zunächst nur kurzzeitig wieder erhöht werden. Während der Druckstufe wurden bis zum 07.11.2018 44,9 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. Dabei wurden 30,5 L Lösung während der Druckerhöhung und 14,4 L während der Haltephase eingepumpt. Während der Haltephase betrug der mittlere Zustrom 0,015 L/h. Nach der Haltephase wurden zwischen dem 07.11.2018 und dem 27.11.2018 weitere 4,8 L Lösung eingebracht.

Das Lösungsvolumen wurde für einen konstanten Druck von 9,78 bar korrigiert. Insgesamt haben 19,1 L Lösung die Druckkammer während der Haltephase verlassen.

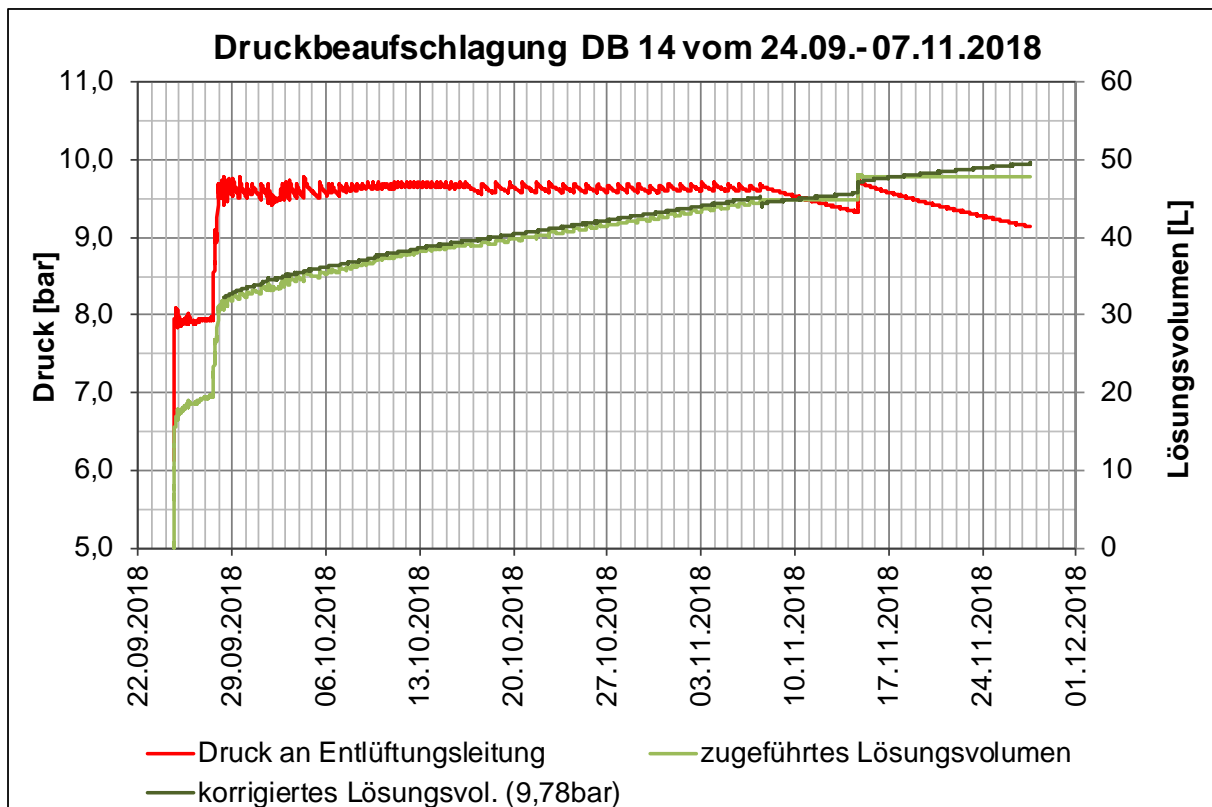


Abbildung 107: 14. Druckbeaufschlagung vom 24.09. bis 07.11.2018

Die **15. Druckbeaufschlagung** (DB 15) hat am 27.11.2018 begonnen. Diese ist in Abbildung 108 dargestellt. Es wurde ein Lösungsdruck von 12,6 bar aufgebracht. Dieser wurde für knapp 20 Wochen gehalten. Bei dieser Druckstufe war der Druck im Vergleich zu den vorherigen Stufen recht konstant, sodass sich zwischen dem gemessenen Lösungsvolumen (hellgrüne Linie) und dem korrigierten Volumen (dunkelgrüne Linie) nur eine geringe Differenz ergibt. Während der Druckstufe wurden 91,1 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. Dabei wurden 18,0 L Lösung während der Druckerhöhung und 73,1 L während der Haltephase eingepumpt. Während der Haltephase betrug der mittlere Zustrom 0,022 L/h. Der Zustrom war jedoch nicht für den gesamten Zeitraum konstant, sondern betrug im Januar 2019 etwa 0,030 L/h und ab Mitte Februar bis zum Ende der Stufe nur 0,016 L/h. Das Lösungsvolumen wurde für einen konstanten Druck von 12,84 bar korrigiert. Während der Haltephase sind 73,9 L Lösung aus der Druckkammer in die Umgebung ausgeflossen.

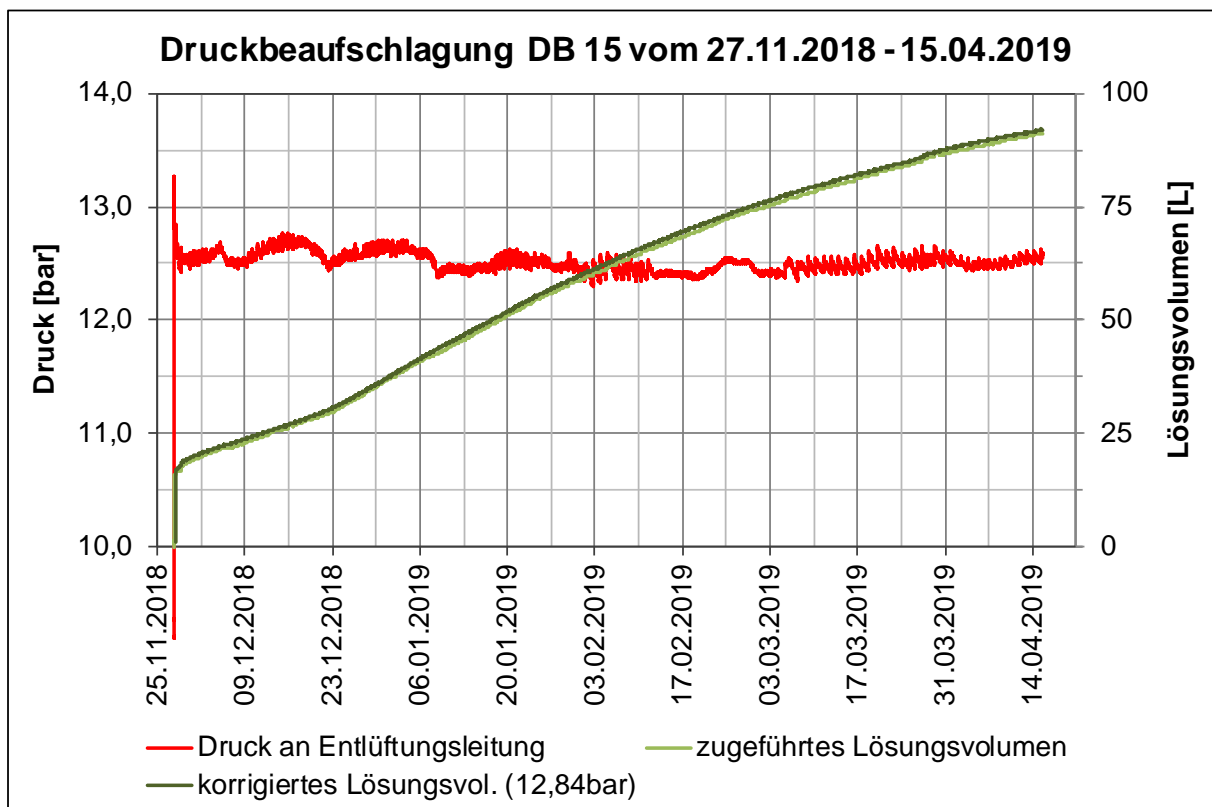


Abbildung 108: 15. Druckbeaufschlagung vom 27.11.2018 bis 15.04.2019

Am 12.02.2019 wurde erstmals eine geringe Menge durchgetretener Lösung in der Auffangrinne an der Ortsbrust festgestellt. Der genaue Zeitpunkt des Durchtrittes ist nicht bekannt. Bei der letzten Befahrung am 07.01.2019 war noch keine Lösung in der Auffangrinne vorhanden. Damit muss der Durchtritt zwischen dem 07.01. und dem 12.02.2019 erfolgt sein. Die Lösung hatte eine rosa Färbung.

Bei der nächsten Befahrung am 14.03.2019 wurde weitere durchgetretene Lösung im rechten Bereich in der Auffangrinne detektiert. Es war kein einzelner Durchtrittspunkt im Bereich der Ortsbrust feststellbar, sondern eher eine Vernässung des Gebirges unterhalb des Bauwerkes erkennbar. In Abbildung 109 ist ein Foto (a) von der Herstellung der Auffangrinne als Überblick zur Örtlichkeit des Lösungsdurchtrittes und ein Foto von der Vernässung (b) dargestellt. Weiterhin wurde für eine bessere Sichtbarkeit der Lösung dieser Bereich mit UV-Licht bestrahlt. Lösung, die in Kontakt zum MgO-Baustoff stand, hatte deutlich an der grünen Färbung durch den Tracer verloren.

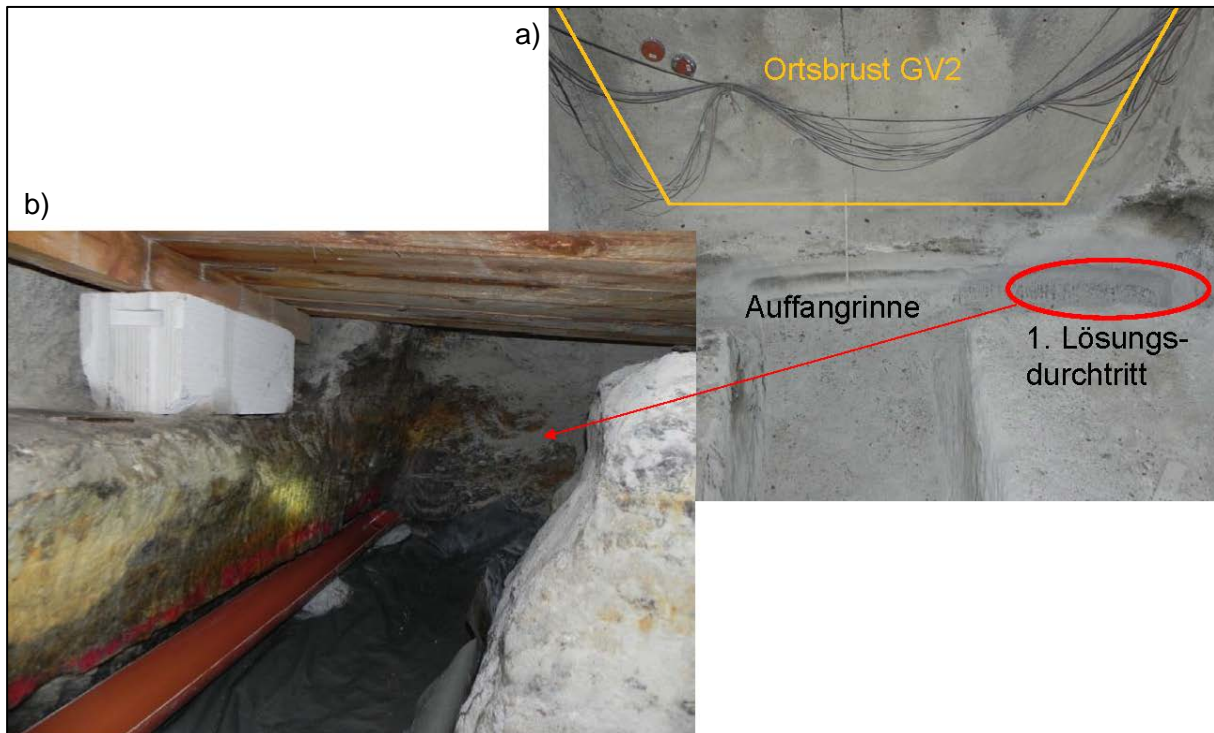


Abbildung 109: Lösungsdurchtritt und Vernässung an der Auffangrinne im rechten unteren Bereich vor dem Bauwerk. Bild a): Überblick zur Position des Durchtrittes. Bild b) Vernässungsbereich (Aufnahmedatum: 14.03.2019).

Die **16. Druckbeaufschlagung** (DB 16) hat am 23.04.2019 begonnen. Diese ist in Abbildung 110 dargestellt. Der hier aufgebrachte Lösungsdruck betrug 17,3 bar und wurde für knapp drei Wochen gehalten. Da der Druck über den gesamten Betrachtungszeitraum weitestgehend konstant gehalten werden konnte, war eine Druckkorrektur nicht notwendig.

Während der Druckstufe wurden 44,5 L Lösung in die Druckkammer eingebracht. Dabei wurden 13,6 L während der Druckerhöhung und 30,9 L während der Haltephase eingepumpt. Der mittlere Zustrom während der Haltephase betrug 0,061 L/h und war aufgrund des höheren Druckes deutlich höher als bei den vorherigen Druckstufen.

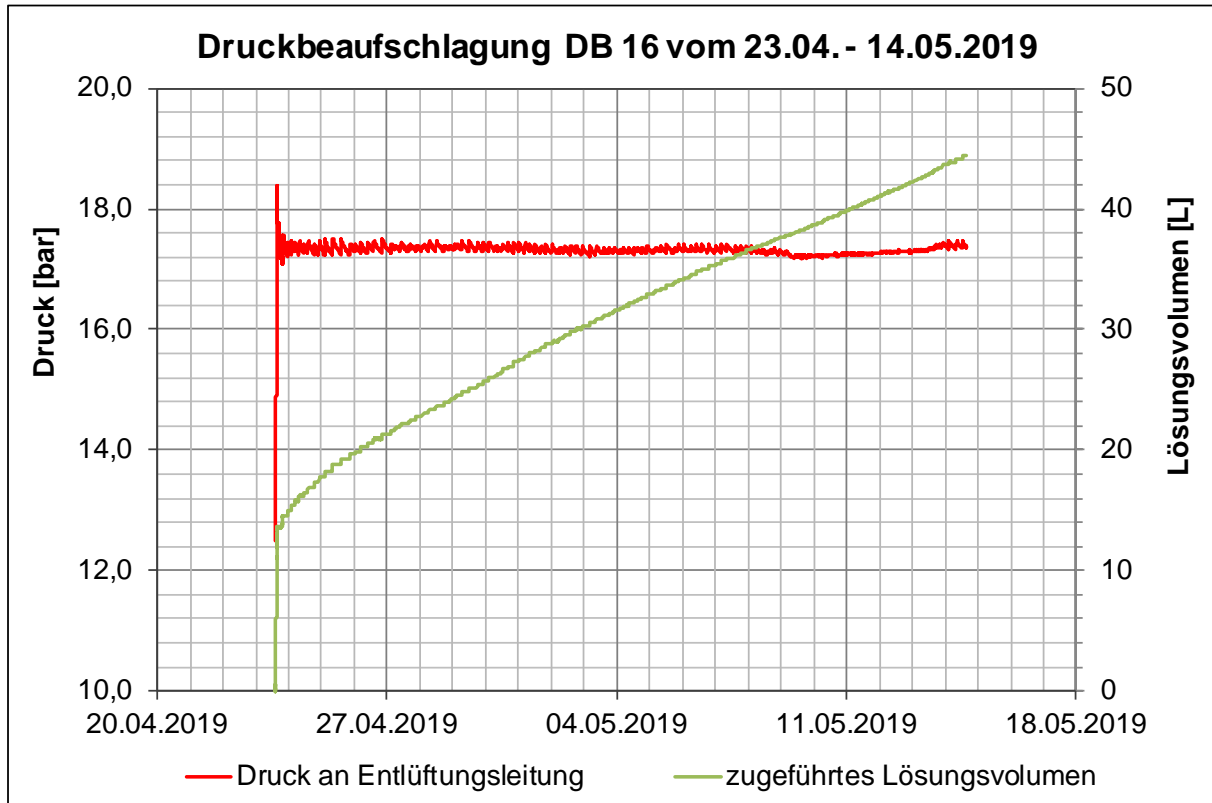


Abbildung 110: 16. Druckbeaufschlagung vom 23.04.2018 bis 14.05.2019

Nach der 16. Druckbeaufschlagung wurde am 15.05.2019 nochmals ein Flüssigkeitsdurchtritt an der Luftseite festgestellt. Dieses Mal trat die Lösung aus dem linken Stoß aus einem Bohrloch, das im Canallitgebirge senkrecht zum Bauwerk abgeteuft wurde, aus. Die Austrittsstelle befindet sich ca. 1,3 m vor der Ortsbrust in ca. 1,7 m Höhe. In Abbildung 111 und Abbildung 112 ist das Bohrloch am linken Stoß als Durchtrittsstelle für die Lösung zu sehen (roter Kreis in Abbildung 111 und Abbildung 112). Die Lösung hatte also das MgO-Bauwerk weiträumig im Gebirge umströmt.

Am 15.05.2019 wurde weiterhin festgestellt, dass aus dem Rohr des Packers, der noch in der Bohrung B38 verblieben war, ebenfalls Lösung austritt. Dies ist in Abbildung 113 zu erkennen. Außerdem wurde ein weiterer Lösungsdurchfluss am rechten Rand des Bauwerkes in ca. 60 cm Höhe detektiert. Hier war es ein punktueller Austritt von Lösung (Abbildung 114).

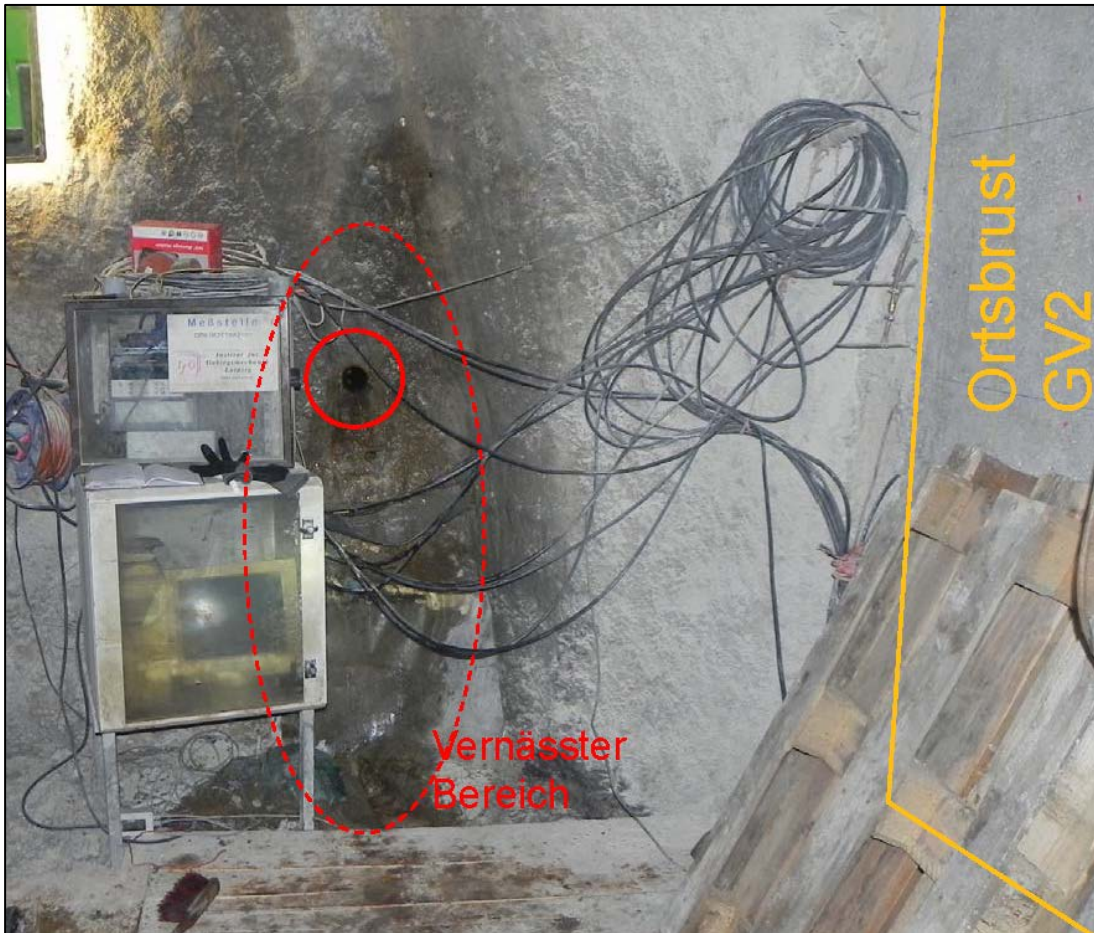


Abbildung 111: Durchtrittsstelle am linken Stoß (Aufnahmedatum: 15.05.2019)

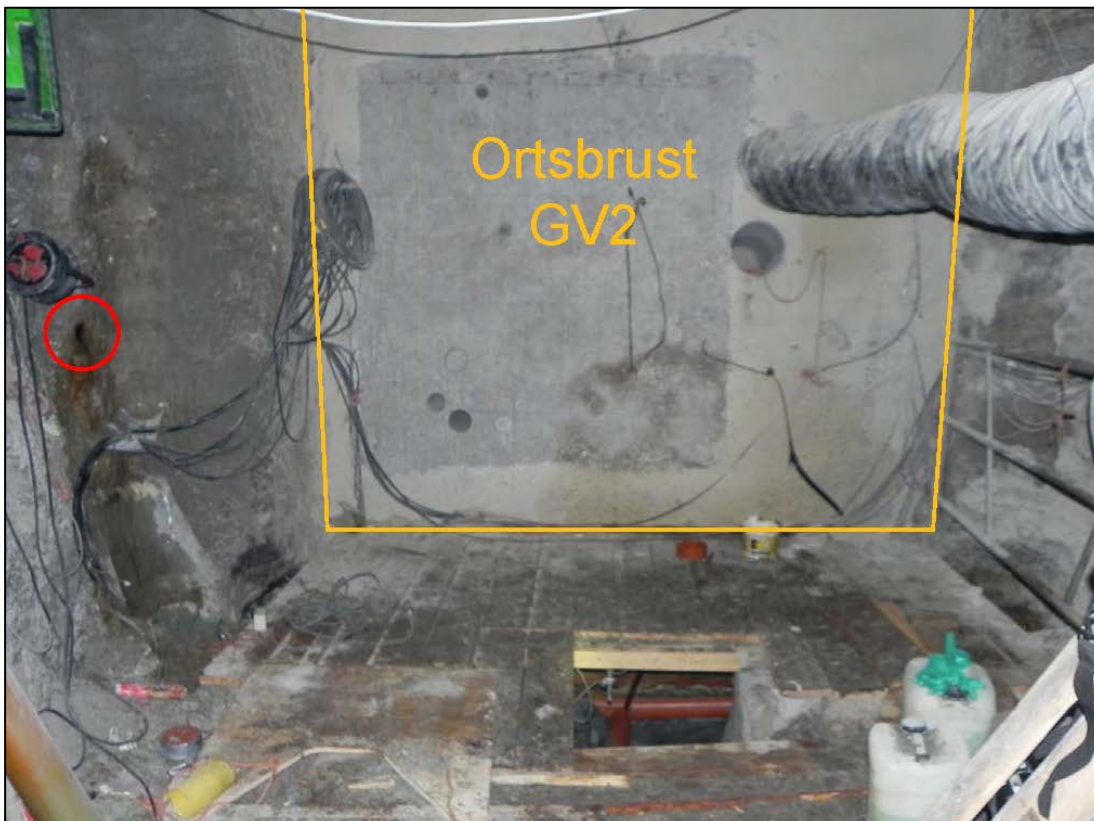


Abbildung 112: Durchtrittsstelle am linken Stoß (Aufnahmedatum: 13.06.2019)

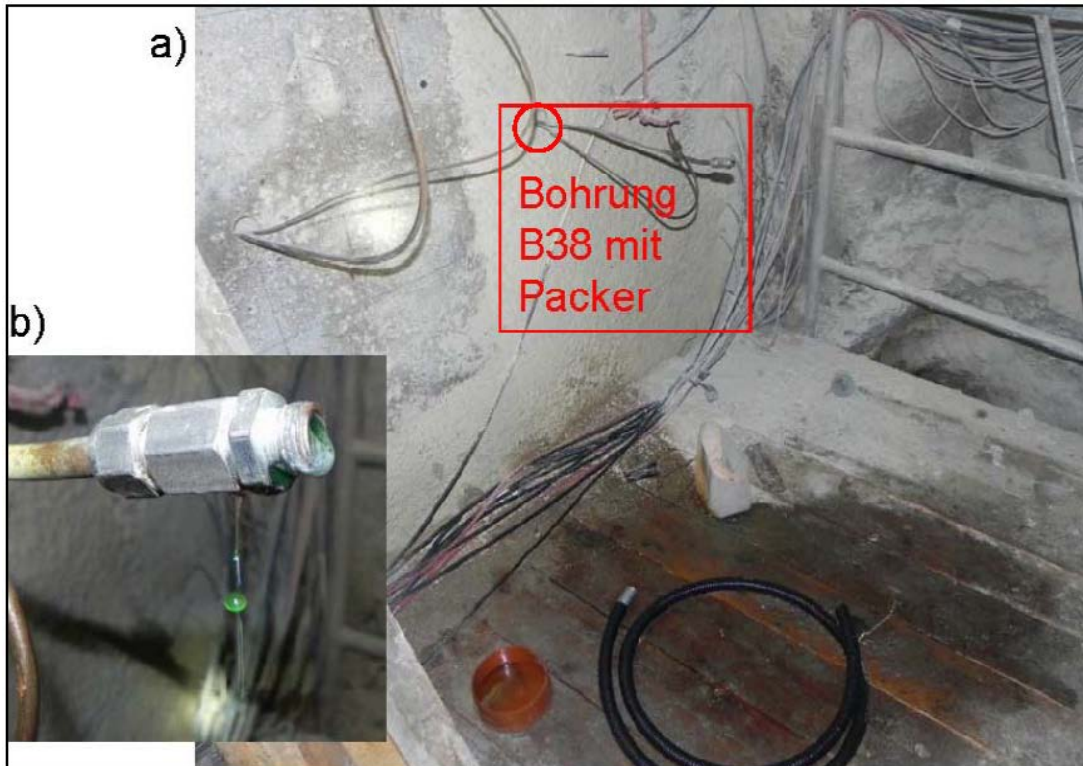


Abbildung 113: Lösungsaustritt an der Bohrung B38 (Aufnahmedatum: 15.05.2019)

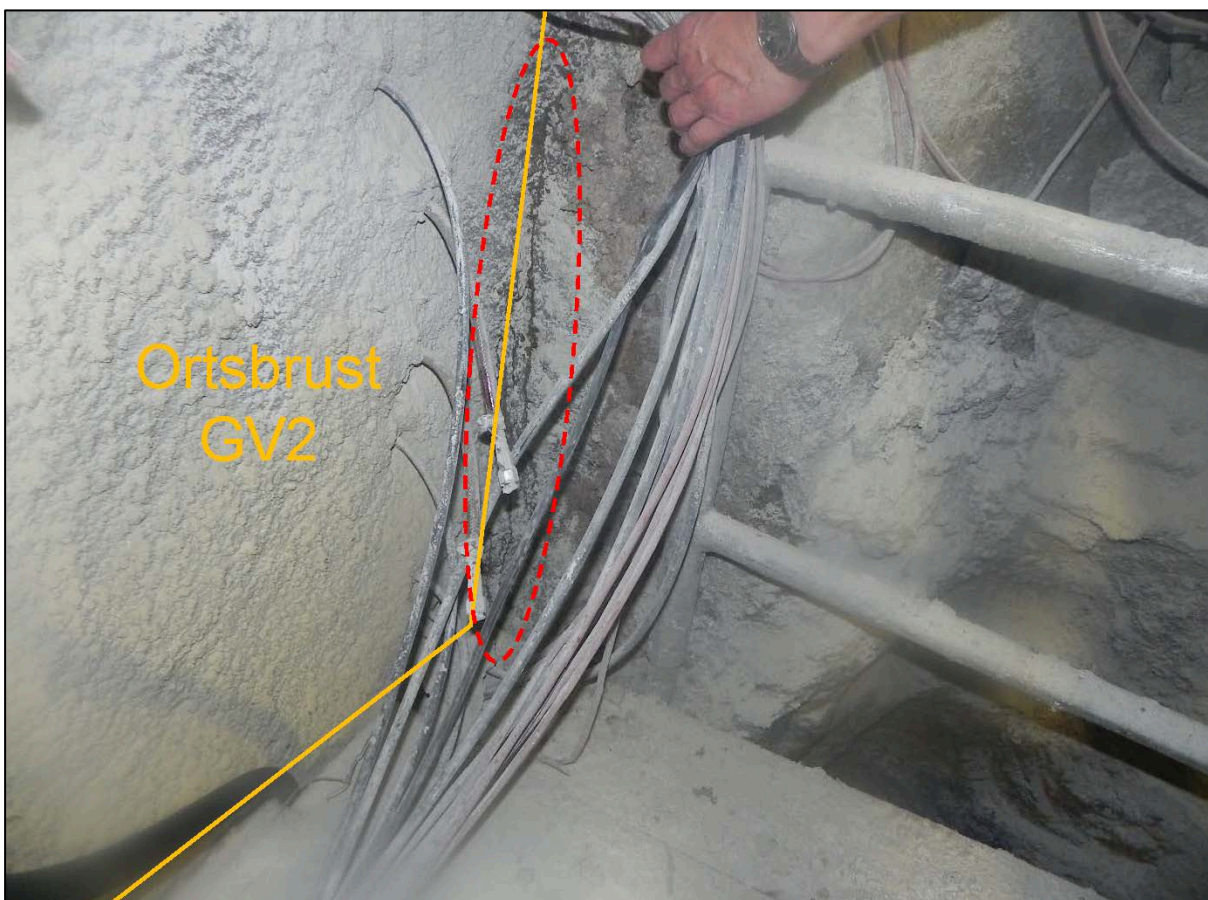


Abbildung 114: Lösungsaustritt am rechten Rand des GV2 (Aufnahmedatum: 15.05.2019)

Die durch das Bauwerk und insbesondere durch das Gebirge tretende Lösung sollte mengenmäßig erfasst und beprobt werden. In der dazu eingerichteten Auffangrinne und Wägeeinrichtung unterhalb des Bauwerkes (Abbildung 115) wurden jedoch nur geringe Mengen aufgefangen, da die Lösung größtenteils an anderen Stellen (siehe oben) ausgetreten war.



Abbildung 115: Auffangrinne und Wägeeinrichtung zum Erfassen der durchgetretenen Lösungsmenge

Die letzte und **17. Druckbeaufschlagung (DB 17)** begann am 14.05.2019. Diese ist in Abbildung 116 dargestellt. Es wurde der maximale Fluidruck von 28,4 bar aufgebracht. Dieser Druck ist erheblich höher als der Druck von 17,3 bar bei der 16. Druckbeaufschlagung. Der Druck von 28,4 bar wurde nur für einen Tag gehalten. Auch für diese Druckstufe wurde das Lösungsvolumen nicht korrigiert, weil der Druck konstant gehalten werden konnte und die Haltephase nur einen Tag dauerte.

Während der Druckstufe wurden insgesamt 69,6 L Lösung über die Druckkammer eingebracht, wobei 18,2 L während der Druckerhöhung und 51,4 L während der Haltephase eingepumpt wurden. Der mittlere Zustrom während der Haltephase betrug 2,030 L/h. Aufgrund dieses hohen Volumenstroms und da an der Ortsbrust bereits Lösung durchgetreten war, wurde die Druckstufe nach kurzer Zeit beendet und die Druckkammer in zwei Schritten entlastet. Zunächst wurde der Druck auf 20 bar reduziert und nach etwa 18 Stunden komplett entlastet. Die dabei ausgetretene Lösung wurde aufgefangen und beprobt. Es sind während der Druckentlastung insgesamt 410 L Lösung aus der Druckkammer wieder in das Fass zurückgeflossen.

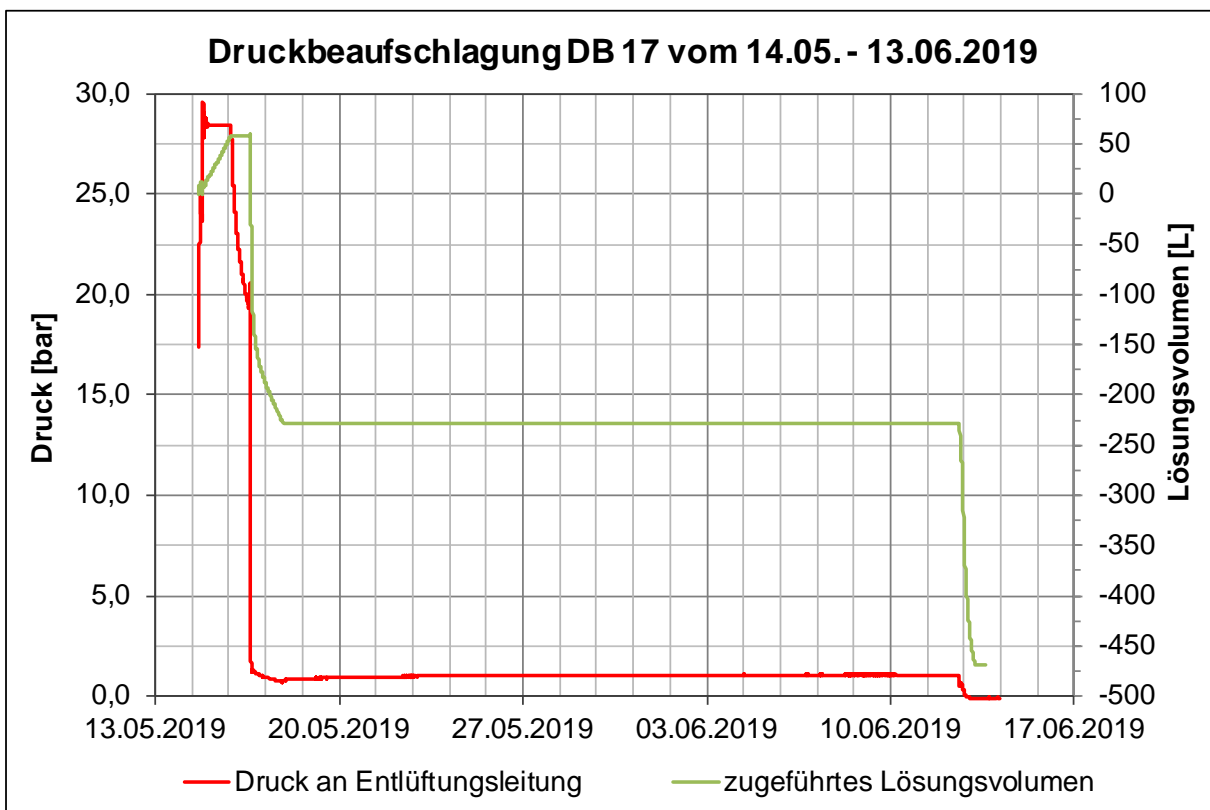


Abbildung 116: 17. Druckbeaufschlagung vom 14.05.2018 bis 13.06.2019

Betrachtung der Kontaktdrücke während der ersten 15 Druckbeaufschlagungen

In Abbildung 117 sind die im Widerlagerzahn gemessenen Kontaktdrücke, die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit am Versuchsort sowie die Druckbeaufschlagungszeitpunkte (Tag der Druckerhöhung) seit Anfang 2017 dargestellt. In diesem Betrachtungszeitraum liegen die Druckbeaufschlagungen DB 5 (1,0 bar) bis DB 15 (12,6 bar).

Seit Beginn des Betrachtungszeitraumes ist der Kontaktdruck bei allen Druckkissen über die Zeit angestiegen.

Während der ersten Stufen der Druckbeaufschlagungen stieg insbesondere der Druck am Geber GD57 in der Messebene 1 am linken Stoß bis Mitte 2018 an. Die anderen Geber zeigten

nur einen geringen Druckanstieg. Mit der Druckerhöhung auf die 6. Druckstufe (2,2 bar) in der Druckkammer (09.04.2018) stieg der Druck an den Gebern GD59 und GD60 deutlich an.

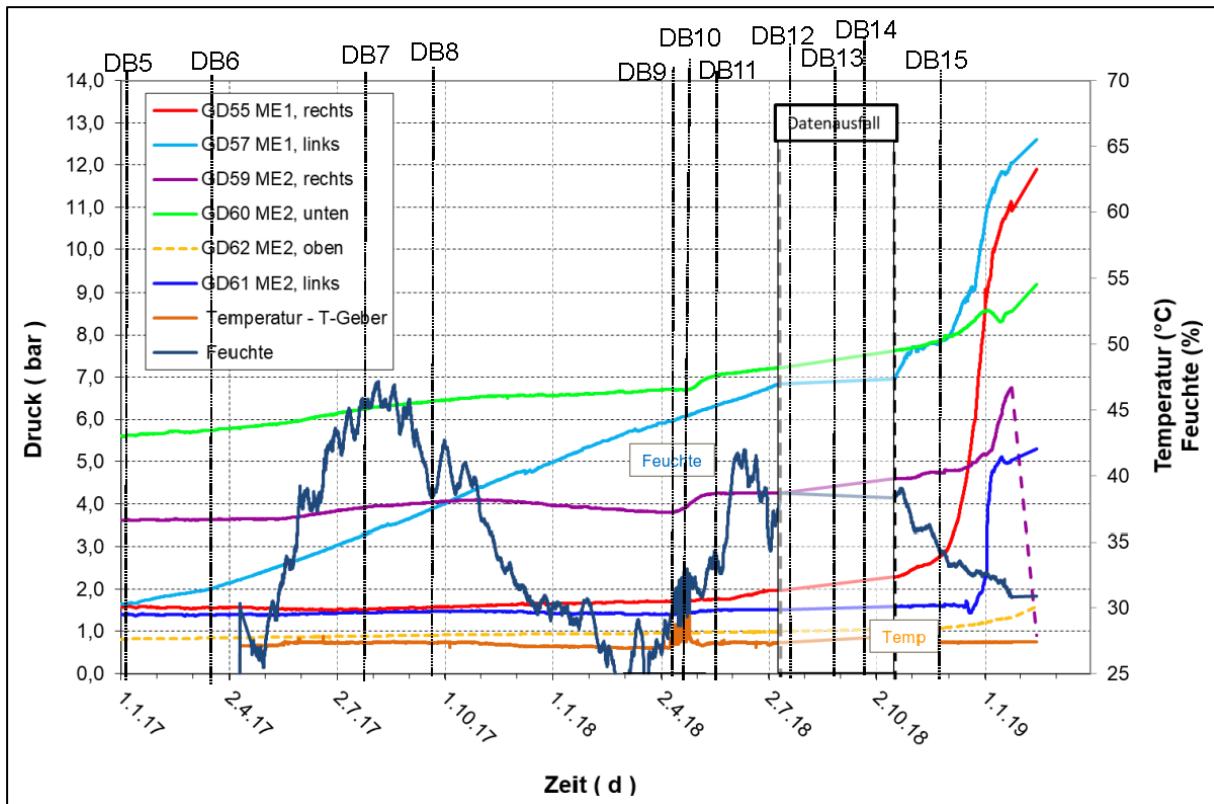


Abbildung 117: Gemessener Kontaktdruck 2017 bis 2019

In Abbildung 118 sind die Kontaktdrücke zwischen dem April 2018 und Februar 2019 im Vergleich zum über die Druckkammer aufgebrachten Druck dargestellt. Während der geringen Druckstufen (bis 6 bar Druck in der Druckkammer) wurden an den Druckkissen nur geringe Anstiege verzeichnet. Während der 9,6 bar-Stufe (DB 14) zeigten die Druckkissen GD56 und GD57 ab Mitte November 2018 einen stärkeren Anstieg.

Auf die folgende Druckerhöhung auf 12,6 bar reagierten die Geber GD55 und GD57 sofort. Am Geber GD56 wurde bereits vor der Druckerhöhung ein Druckanstieg gemessen. An diesen drei Gebern stieg der Druck auf etwa 12,6 bar an. Dies bedeutet, dass am Zahn der gleiche Druck, der auch in der Druckkammer wirkt, anliegt. Damit findet kein Potentialabbau auf der Strecke zwischen Druckkammer und Zahn statt. Die weiteren Geber reagierten um mehrere Tage bis Wochen zeitverzögert.

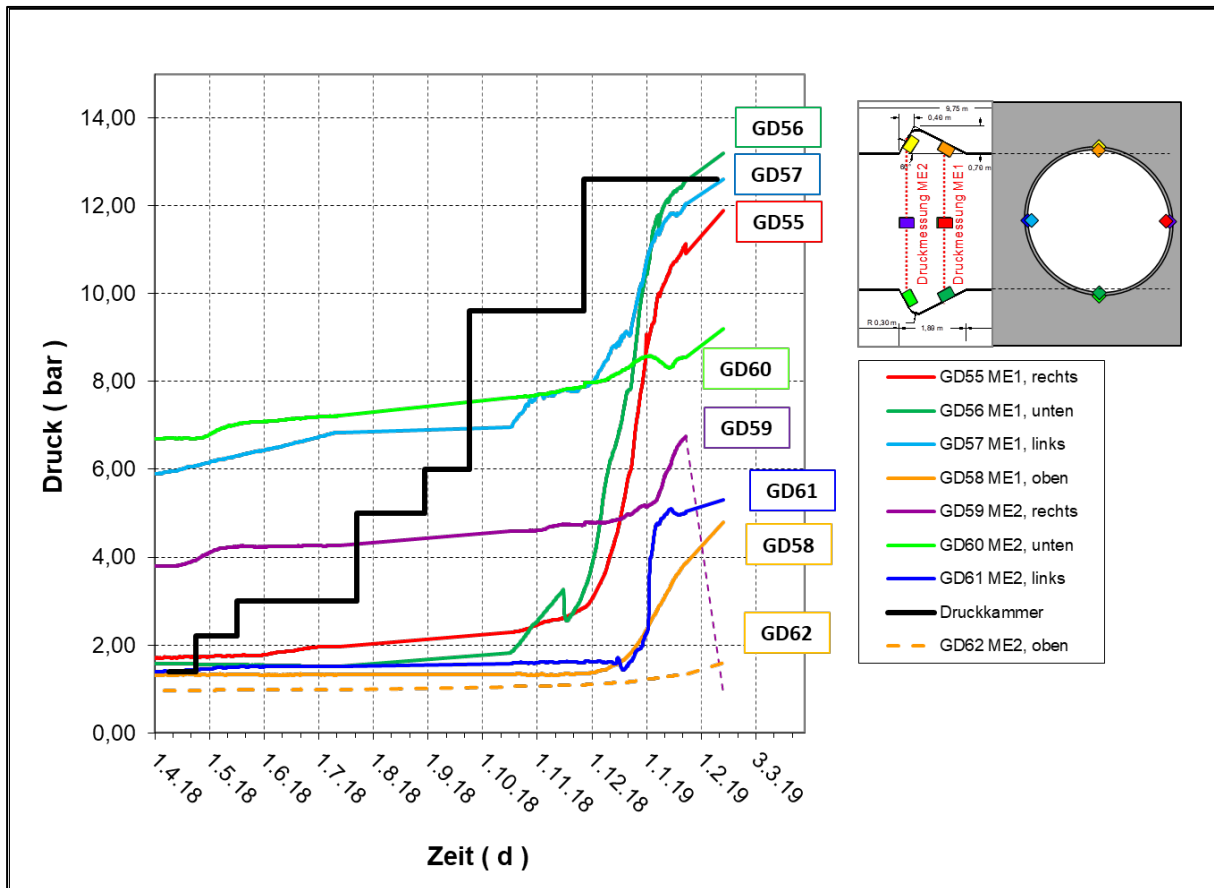


Abbildung 118: Gemessener Kontaktdruck während der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung der Druckkammer

Insgesamt sind die realen Spannungsverhältnisse in der Kontaktfuge des GV2-Bauwerkes unklar. Hilfreich ist es deshalb, die minimale Hauptspannung im umgebenden Gebirge radial zum Dammkörper zu bestimmen. Hierzu sollen Hydrofracmessungen durchgeführt werden. Diese Messungen werden voraussichtlich im Rahmen des Nachfolgevorhabens vor dem vorgesehenen partiellen Rückbau des Bauwerkes GV2 durchgeführt.

Die gemessenen Druckanstiege in den Messgebern der Messebenen 1 und 2 infolge der Druckerhöhungen sind hauptsächlich auf die zugetretene, im Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge eingedrungene Lösung zurückzuführen. Eine Volumenzunahme des Betons aufgrund Phasenumbildung (siehe auch Abschnitt 9.2 und 9.3) findet eher nur untergeordnet statt.

Entwicklung der Kontaktdrücke bei den Druckbeaufschlagungen DB 16 und DB 17

In Abbildung 119 sind die Druckänderungen der Flächendruckgeber bei den Druckbeaufschlagungen DB 16 und DB 17 dargestellt. Während der Druck in der Druckkammer am 23.04.2019 von 12,5 bar auf ca. 17,0 bar erhöht wurde, reagierten alle Flächendruckgeber mit einem Druckanstieg. Insbesondere in der Messebene 1, die näher an der Druckkammer liegt, stieg der Druck ebenfalls auf 17 bar bis 18 bar an. Während der gesamten Druckhaltephase stiegen die Drücke in der Messebene 1 sogar minimal an. Dies belegt die hydraulische Verbindung von der Druckkammer bis zum Zahn. Die Druckgeber in der Messebene 2 reagierten ebenfalls alle, jedoch mit geringeren Druckanstiegen und zeitversetzt. Nur der Geber am linken Stoß (GD-61) reagierte zeitnah. Auffällig ist, dass an dem Geber am rechten Stoß (GD-59) nach der Druckerhöhung über die Druckkammer zunächst ein Druckanstieg und dann ein Druckabfall auf etwa 8,2 bar gemessen wurde. Dieser Druckabbau kann eventuell auf eine erhöhte Fließgeschwindigkeit infolge neu entstandener Fließwege zurückgeführt werden.

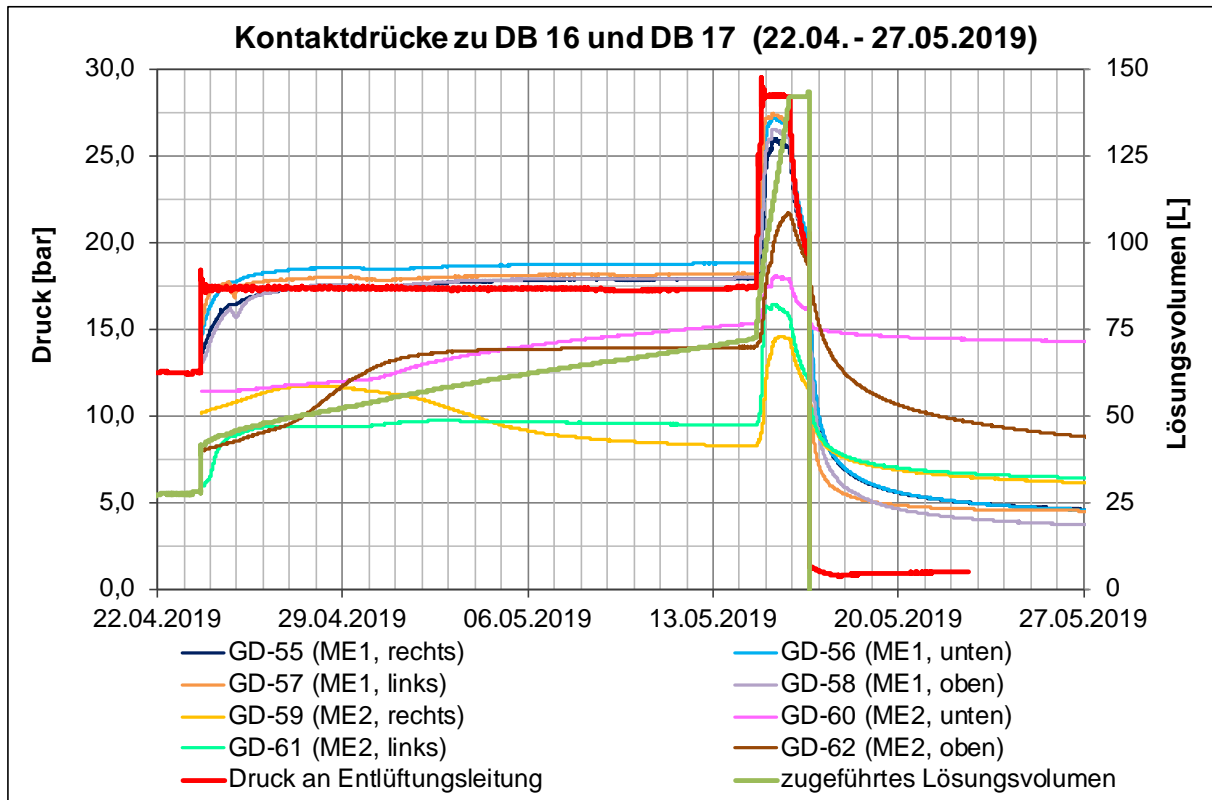


Abbildung 119: Gemessener Kontakt druck bei den Druckbeaufschlagungen DB 16 und DB 17

Auch bei der weiteren Druckerhöhung auf den Maximalwert von 28,4 bar am 14.05.2019 reagierten alle Flächendruckgeber sofort. Die Kontakt drücke während der Druckbeaufschlagung mit 28,4 bar sind in Abbildung 120 dargestellt.

In Tabelle 33 sind zu verschiedenen Zeitpunkten die Drücke in der **Messebene 1** angegeben und in Tabelle 34 die Drücke in Messebene 2. Die Drücke an den Gebern in der Messebene 1 stiegen auf maximal 25,9 bar bis 27,4 bar. Diese wurden ca. 13 bis 16 Stunden nach der Druckerhöhung erreicht. In Tabelle 33 und Tabelle 34 ist die Zeit zwischen Druckerhöhung und Erreichen des Maximaldruckes als Δt angegeben. Die Geber an der Sohle (GD-56) und am linken Stoß (GD-57) zeigten einen höheren Druck und reagierten etwas schneller. Zwischen der Druckkammer und der Messebene 1 baute sich der Druck kaum ab. Der hydraulische Gradient beträgt nur zwischen 2,0 (linker Stoß) und 4,8 (rechter Stoß). Für die Berechnung des hydraulischen Gradienten wird angenommen, dass es sich um reine Fluid drücke handelt.

In der **Messebene 2** stiegen die Maximal drücke auf 14,6 bar bis 21,7 bar, wobei hier die Geber oben (GD-62) und unten (GD-60) die höheren Drücke zeigten. Diese Maximalwerte wurden zwischen 15,5 Stunden (linker Stoß) und knapp 29 Stunden (an der Firste) nach Beginn der Druckerhöhung gemessen. Zwischen den zwei Messebenen betragen die hydraulischen Gradienten des Druckabbaus zwischen 56 (an der Firste) und 131 (am rechten Stoß). Während der Druckstufe verringert sich der an den Flächendruckgebern gemessene Druck um 1,1 bar bis 1,6 bar in der Messebene 1 und 0,1 bar bis 0,9 bar in der Messebene 2 bis zum Ende der Druckstufe.

Nach dem Beginn der Druckentlastung am 15.05.2019 (ca. 21 Uhr) auf zunächst 20 bar reagierten erneut alle Geber sofort mit einer Druckabnahme. Als in der Druckkammer der Druck auf ca. 20 bar gesunken war, herrschte in der Messebene 1 ein Druck zwischen 14,3 bar (GD-57) und 18,4 bar (GD-56). An den Gebern der Messebene 2 wurde ein Druck zwischen 11,0 bar (GD-59) und 18,1 bar (GD-62) gemessen. Nach der kompletten Druckentlastung am 16.05.2019 (ca. 15 Uhr) zeigten 7 der 8 Geber einen deutlichen Rückgang. Bis zum Ende des

Betrachtungszeitraumes am 27.05.2019 ging der in Messebene 1 gemessene Druck auf 3,7 bar bis 5,6 bar zurück, in der Messebene 2 auf 6,1 bar bis 8,8 bar, mit Ausnahme des GD-60, bei dem nur eine geringfügige Druckabnahme auf 14,3 bar auftrat.

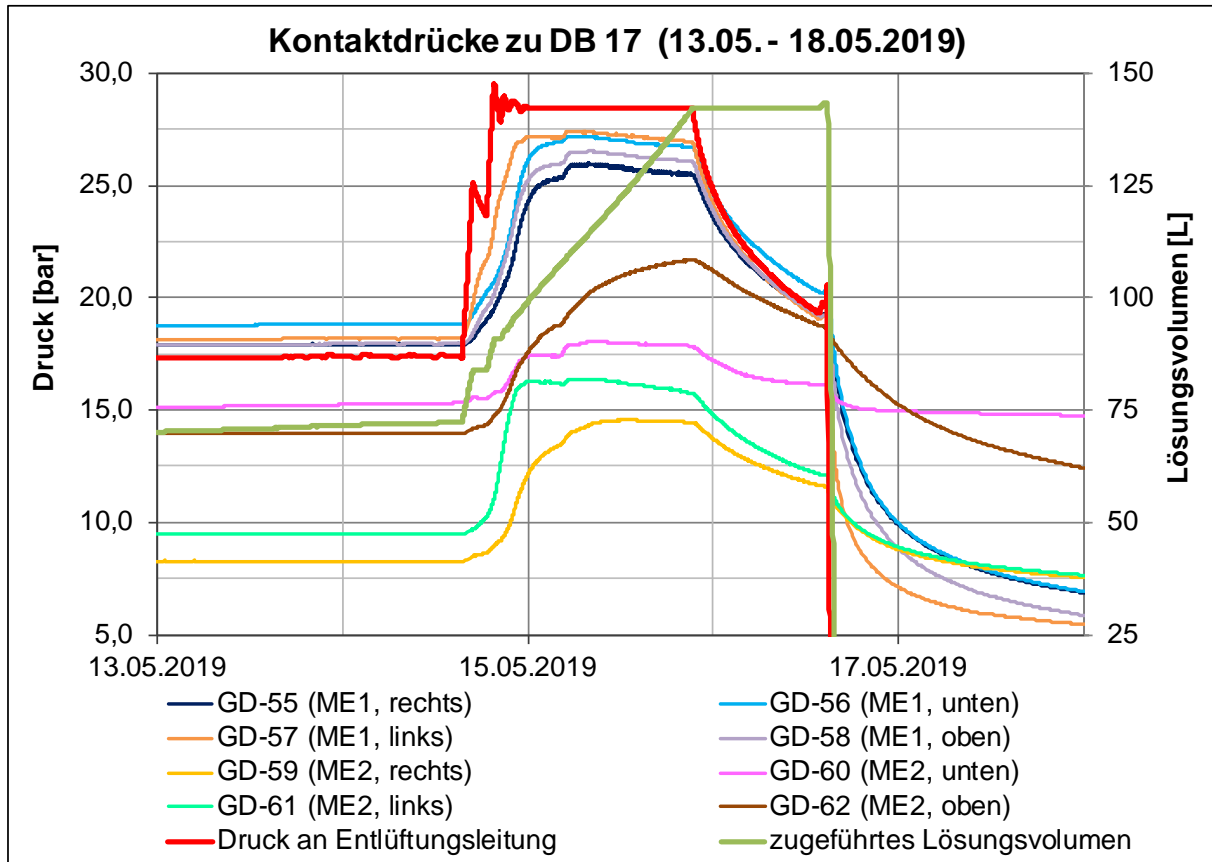


Abbildung 120: Entwicklung der Kontaktldrücke zu Druckbeaufschlagung DB 17 (maximaler Lösungsdruck von 28,4 bar)

Tabelle 33: Druck an den Druckkissen in Messebene 1 zu verschiedenen Zeitpunkten während DB 17

Ereignis		Druck an Druckkissen [bar]			
		GD-55	GD-56	GD-57	GD-58
24 h vor Druck- erhöhung zu DB 17	13.05.2019, 15:30 Uhr	17,9	18,8	18,1	17,9
Maximaler Druck (bei 28,4 bar in DK)	15.05.2019, 04:17 Uhr - 07:17 Uhr	25,9 ($\Delta t = 15,3$ h)	27,2 ($\Delta t = 13,2$ h)	27,4 ($\Delta t = 12,8$ h)	26,5 ($\Delta t = 15,8$ h)
Ende DB 17	15.05.2019, 21:20 Uhr	24,8	25,9	25,7	25,2
Ende 20 bar- Stufe	16.05.2019, 14:26 Uhr	17,8	18,4	14,3	17,1
10 Tage nach Druckentlas- tung	27.05.2019, 00:05 Uhr	4,6	4,6	4,5	3,7

Tabelle 34: Druck an den Druckkissen in Messebene 2 zu verschiedenen Zeitpunkten während DB 17

Ereignis		Druck an Druckkissen [bar]			
		GD-59	GD-60	GD-61	GD-62
24 h vor Druck- erhöhung zu DB 17	13.05.2019, 15:30 Uhr	8,3	15,2	9,5	13,9
Maximaler Druck (bei 28,4 bar in DK)	15.05.2019, 06:50 Uhr - 20:10 Uhr	14,6 ($\Delta t = 20,5$ h)	18,1 ($\Delta t = 14,4$ h)	16,4 ($\Delta t = 15,3$ h)	21,7 ($\Delta t = 28,7$ h)
Ende DB 17	15.05.2019, 21:20 Uhr	14,2	17,6	15,4	21,5
Ende 20 bar-Stufe	16.05.2019, 14:26 Uhr	11,0	15,7	11,3	18,1
10 Tage nach Druckentlas- tung	27.05.2019, 00:05 Uhr	6,1	14,3	6,4	8,8

Gesamtbewertung der Druckbeaufschlagung

Bei einer Druckbeaufschlagung eines Verschlussbauwerkes soll der Flüssigkeitsdruck in der Kontaktfläche die kleinste Hauptspannung nicht überschreiten (Fluiddruckkriterium). Um dies annähernd zu überprüfen, sollte der Druck in der Kontaktfuge aus dem Gebirgsdruck bekannt sein. Der Gebirgsdruck in der Kontaktfläche wurde beim GV2 auch durch mehrere Druckkissen in zwei Messebenen gemessen. Allerdings zeigten die Messergebnisse von Anfang an nur einen sehr geringen Kontaktdruck an, der im Laufe von 8 Jahren auch nur an wenigen Druckkissen wenig angestiegen ist. Als Ursache wird die fortlaufende Verwitterung des Tachyhydrit-haltigen und Kieserit-haltigen Carnallit in der Kontaktfläche/Auflockerungszone vermutet, „die schneller verlief als das Gebirge auflaufen konnte“. Aus diesem Grund war es nicht möglich den Flüssigkeitsdruck in der Druckkammer sinnvoll entsprechend dem Druck in der Kontaktfläche festzulegen. Das Fluiddruckkriterium wurde bei der Druckbeaufschlagung deshalb bewusst nicht herangezogen, um den Druck in der Druckkammer festzulegen.

Trotzdem wurde das Bauwerk mit Flüssigkeitsdruck aus der Druckkammer beaufschlagt, um den MgO-Beton ringsherum zu benetzen und zu bewirken, dass Lösung in den MgO-Beton eindringt.

Bei der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung bis 6 bar stieg der Druck in den Druckkissen nur geringfügig an. Bei einem Flüssigkeitsdruck bis 12,6 bar (15. Druckstufe) stieg der Druck in den Druckkissen GD55 und GD57 innerhalb kurzer Zeit bis ebenfalls 12,6 bar an, so dass davon ausgegangen wird, dass mindestens ein Strömungskanal von der Druckkammer bis zur ersten Messebene mit den Druckkissen GD55 und GD57 aufgetreten ist. Die letzte Druckbeaufschlagung bis 28 bar diente ausschließlich dazu, um mit hohem Druck nochmals ein gewisses Eindringen der Lösung in den MgO-Beton zu bewirken. Wie weit die Lösung in den MgO-Beton (und an den Betonierabschnittsgrenzen) eingedrungen ist, soll im Zuge des Rückbaus festgestellt werden.

5.3.2 Einfluss-/ Korrekturfaktoren für die Auswertung der Druckbeaufschlagungen

Für eine genaue Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse muss der gemessene Druck an der Entlüftungsleitung, sowie die in das Gebirge bzw. in das Bauwerk abgeströmte Lösung korrigiert werden. Es konnten drei Fehlerquellen bzw. Einflussfaktoren identifiziert werden:

- Kompression/Expansion des Gasvolumens in der Druckkammer (und im Bauwerk bzw. der Auflockerungszone),
- Schwankung des Fluiddrucks um etwa $\pm 0,1$ bar bzw. Abnahme des Fluiddrucks über die Zeit und
- Wasseraufnahme der Lösung aus der Luftfeuchte, die im Jahresgang schwankt.

Diese Faktoren wurden nur für die Druckbeaufschlagungen ohne Druckabfallmessungen berücksichtigt, da hier die Haltephasen derart lang waren, dass diese Faktoren einen Einfluss haben konnten.

Zur Bestimmung des Gasvolumens in der Druckkammer:

Bei den einzelnen Befüllungen der Druckkammer wurden insgesamt etwa 1350 L Lösung eingebracht. Das abgeschätzte Druckkammervolumen betrug etwa 1800 L, sodass sich ein verbliebenes Gasvolumen von etwa 450 L ergibt. Während einer Druckerhöhung zu Beginn der Druckstufen oder auch bei Drucksprüngen innerhalb einer Druckstufe kann über den Druckunterschied und das während dieser Zeit eingebrachte Fluidvolumen über das Gesetz von Boyle-Mariotte (Gleichung (11) bzw. (12)) das entsprechende Gasvolumen in der Druckkammer berechnet werden. Der Abstand zwischen den beiden Zeitpunkten sollte möglichst gering sein, sodass Strömungsprozesse vernachlässigt werden können.

$$(p_1 + LD) \cdot V_1 = (p_2 + LD) \cdot V_2 \quad (11)$$

bzw.

$$V_1 = \frac{\Delta V_{Lsg} \cdot (p_2 + LD)}{\Delta p} \quad (12)$$

p_1	-	Druck an Entlüftungsleitung zum Zeitpunkt t_1	[bar]
V_1	-	Gasvolumen in der Druckkammer zum Zeitpunkt t_1	[L]
p_2	-	Druck an Entlüftungsleitung zum Zeitpunkt t_2	[bar]
V_2	-	Gasvolumen in der Druckkammer zum Zeitpunkt t_2	[L]
LD	-	Luftdruck am Versuchsort, entspricht 1,1 bar	[bar]
ΔV_{Lsg}	-	Lösungsvolumendifferenz zwischen t_1 und t_2	[L]

Weiterhin kann das Anfangsgasvolumen V_0 in der Druckkammer vor Beginn der jeweiligen Druckbeaufschlagungen zum Zeitpunkt t_0 nach Gleichung (13) berechnet werden.

$$V_0 = \frac{(p_1 + LD) \cdot V_1}{p_0 + LD} \quad (13)$$

V_0	-	Anfangsgasvolumen in der Druckkammer zum Zeitpunkt t_0	[L]
p_0	-	Druck an Entlüftungsleitung zum Zeitpunkt t_0	[bar]
V_1	-	Gasvolumen in der Druckkammer zum Zeitpunkt t_1	[L]
p_1	-	Druck an Entlüftungsleitung zum Zeitpunkt t_1	[bar]
LD	-	Luftdruck am Versuchsort, entspricht 1,1 bar	[bar]

In Tabelle 35 sind die berechneten Gasvolumina in der Druckkammer für verschiedene Druckstufen und kurzzeitige Drucksprünge aufgeführt. Die Anfangsgasvolumina in der Druckkammer V_0 betragen zwischen 375 L und 531 L, wobei diese tendenziell mit dem höher aufgebrachten Fluiddruck ansteigen. Für die ersten vier Druckerhöhungen ist das Anfangsgasvolumen eher gering. Dies könnte auf Unschärfen in der Berechnung durch die geringen

Druckunterschiede zurückzuführen sein. Auffällig ist das hohe Anfangsgasvolumen von 474 L bei der Druckerhöhung von 2,14 bar auf 3,06 bar. Gleichzeitig ist hier der Betrachtungszeitraum mit über 5 Stunden sehr hoch. Aufgrund dieser hohen Zeitdifferenz wurde das Anfangsgasvolumen vermutlich überschätzt, da es wahrscheinlich zur Strömung der Lösung z.B. in den Kontaktbereich Bauwerk / Gebirge gekommen ist. Auch bei den vier letzten Druckerhöhungen ist das berechnete Anfangsgasvolumen vergleichsweise hoch. Auch hier wurde das Gasvolumen wahrscheinlich überschätzt, da durch das insgesamt hohe Druckniveau Strömungen begünstigt werden und so in der Umgebung der Druckkammer weitere gaserfüllte Poren/ Hohlräume erfasst werden, die so in die Berechnung des Druckkammervolumens eingehen. In der Tabelle 35 sind die zwei Extremwerte grau geschrieben und gehen nicht in die Mittelwertbildung ein. Aus den neun verbliebenen Berechnungen ergibt sich ein mittleres Anfangsgasvolumen in der Druckkammer von 433 L. Der Median beträgt 432 L.

Tabelle 35: berechnete Anfangsgasvolumina V_0 in der Druckkammer aus Druckerhöhungen

Druck p_1 [bar]	Druck p_2 [bar]	Eingebrachtes Fluidvolumen während Druckerhöhung ΔV [l]	Zeitdifferenz Δt [h:mm]	Gasvolumen in DK vor Druckerhöhung V_1 [l]	Anfangsgasvolumen in DK V_0 [l]
0,80	1,10	29,2	1:11	218	378
0,94	1,09	15,2	0:26	202	375
1,01	1,30	24,0	0:50	196	375
1,13	1,46	25,8	2:06	201	407
1,38	2,09	42,8	2:38	193	434
2,14	3,06	35,6	5:31	161	474
3,02	3,15	3,5	1:51	115	432
2,96	5,19	44,3	3:09	125	462
6,12	8,08	16,8	2:46	78	513
7,96	9,10	7,0	1:28	63	515
9,20	13,26	16,0	1:30	57	531
Mittelwert Anfangsgasvolumen					433

Zur Validierung des rückgerechneten Anfangsgasvolumens in der Druckkammer wurde am Ende der Druckbeaufschlagung bei 12,6 bar (DB 15) die Druckkammer kurzzeitig entlastet. Zwischen dem 15.04.2019 und dem 18.04.2019 wurde der Druck auf etwa 7,0 bar abgesenkt. Dies ist in Abbildung 121 dargestellt. Es waren alle Ventile an Befüll- und Entlüftungsleitung geschlossen und der Druck in der Druckkammer stieg bis auf etwa 8 bar wieder an. Dabei wurde freies Gas und Lösung aus der Druckkammer aufgefangen und gemessen. Nach dieser Druckentlastung wurde der Druck zunächst wieder auf 12,5 bar gebracht, bevor mit der nächsten Druckbeaufschlagungsstufe (DB 16: 17,3 bar) begonnen wurde.

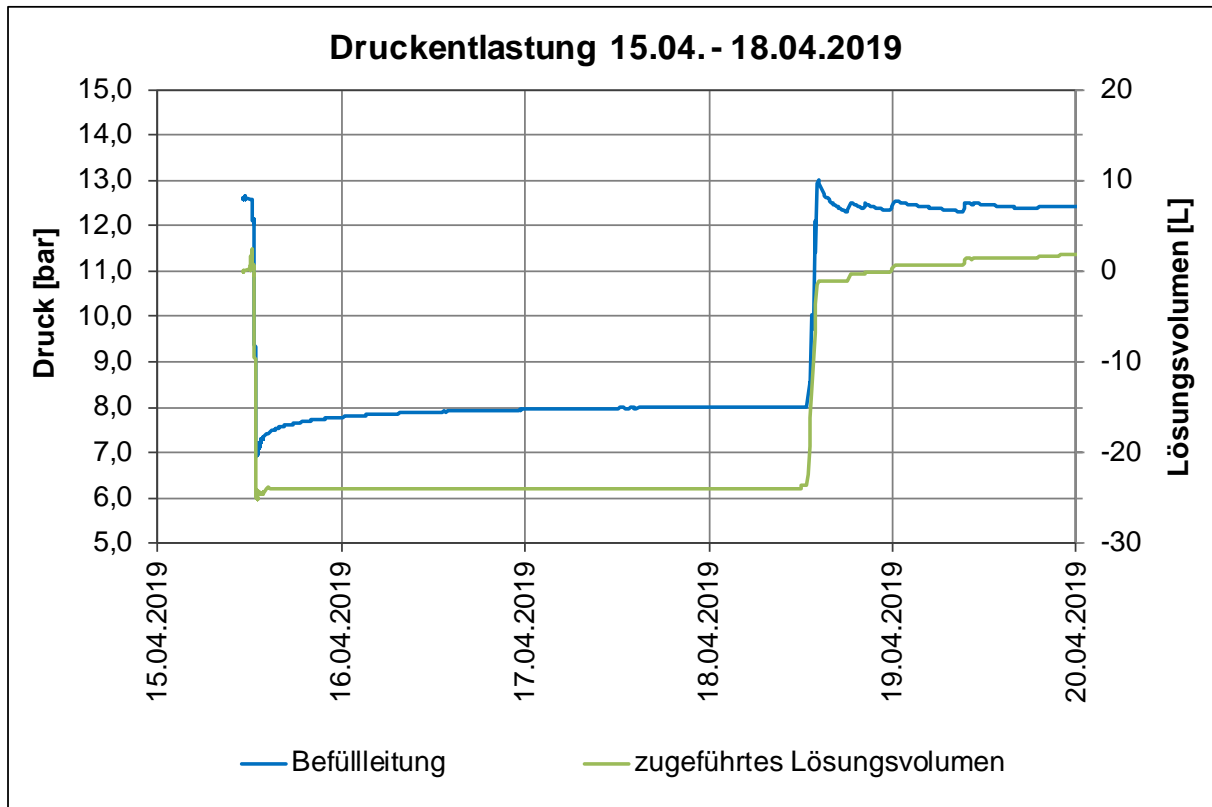


Abbildung 121: kurzzeitige Druckentlastung von 12,6 bar auf 7,0 bar

Genauso wie bei den Druckerhöhungen (Tabelle 35) wurde über den Druckunterschied und die Volumendifferenz (der ausfließenden Lösung) das Anfangsgasvolumen in der Druckkammer vor Beginn der Druckbeaufschlagungen berechnet (Tabelle 36). Das über die Druckentlastung bestimmte Anfangsgasvolumen beträgt 447 L.

Tabelle 36: berechnetes Anfangsgasvolumen V_0 in der Druckkammer aus Druckentlastung

Druck p_1 [bar]	Druck p_2 [bar]	Ausgetretenes Fluidvolumen während Druckentlastung ΔV [l]	Zeitdifferenz Δt [h:mm]	Gasvolumen in DK vor Druckentlastung V_1 [l]	Anfangsgasvolumen in DK V_0 [l]
12,55	6,66	27,28	0:46	36	447

Die drei berechneten Anfangsgasvolumina aus der Druckkammerbefüllung (ca. 450 L), aus den Druckerhöhungen (im Mittel 433 L) und aus der Druckentlastung (447 L) liegen sehr dicht beieinander, sodass von einem **Anfangsgasvolumen in der Druckkammer von $443 \text{ L} \pm 7,4 \text{ L}$** ausgegangen werden kann.

Zur Korrektur des zugeführten Lösungsvolumens aufgrund des schwankenden bzw. leicht fallenden Druckes:

Mit den vorhandenen Pumpen und dem Steuerungssystem war es prinzipiell möglich, den Druck in einer gewissen Bandbreite konstant zu halten. Allerdings müssen aufgrund des Einflusses des Gasvolumens auch kleine Druckschwankungen korrigiert werden. Das über die

Wägezelle gemessene Lösungsvolumen beschreibt den Zufluss in die Druckkammer und wird daher mit $V_{DK,in}$ bezeichnet. Das druckkompensierte Lösungsvolumen beschreibt das Volumen, das aus der Druckkammer in die Umgebung, d.h. in die Auflockerungszone und/oder das Bauwerk und/oder das Gebirge, strömt und wird daher mit $V_{DK,out}$ bezeichnet. Bei konstantem Druck sind beide Volumina gleich, sodass das gesamte über die Druckkammer eingebrachte Lösungsvolumen in die Druckkammer-Umgebung geleitet wird.

Bei abnehmendem Druck stagniert somit das über die Wägezelle eingebrachte Lösungsvolumen $V_{DK,in}$ (oder wird bei einem Rückfluss der Lösung aus der Druckkammer in den Wägebehälter sogar „negativ“), da sich das in der Druckkammer vorhandene Gas ausdehnt. Die Differenz aus $V_{DK,in}$ und dem korrigierten Volumen $V_{DK,out}$ beschreibt den zusätzlichen Zufluss aus der Druckkammer in die Druckkammer-Umgebung (in die Auflockerungszone, das Bauwerk oder das Gebirge). Das hier fließende Lösungsvolumen entspricht dem Volumen des expandierten Gases in der Druckkammer.

Dagegen wird bei steigendem Druck mehr Lösung in die Druckkammer eingebracht als in die Umgebung abströmt, da Gas komprimiert wird.

Für die Berechnung des druckkompensierten eingebrachten Lösungsvolumens ist zunächst die Berechnung des Gasvolumens in der Druckkammer für jeden Zeitpunkt notwendig. Dieses Volumen V_1 kann nach Gleichung (14) berechnet werden.

$$V_1 = \frac{V_0 \cdot p_0}{p_1 + p_0} \quad (14)$$

V_1	-	Gasvolumen in der Druckkammer zum Zeitpunkt t_1	[L]
V_0	-	Gasvolumen in der Druckkammer vor Beginn der ersten DB zum Zeitpunkt t_0	[L]
p_0	-	Luftdruck am Versuchsort zum Zeitpunkt t_0 (Annahme: entspricht $\approx 1,1$ bar)	[bar]
p_1	-	Druck an Entlüftungsleitung zum Zeitpunkt t_1	[bar]

Anschließend wird das in die Druckkammer eingebrachte, über die Wägezelle gemessene Lösungsvolumen $V_{DK,in}$ für einen konstanten Druck nach Gleichung (15) korrigiert. Entsprechend der jeweiligen Druckstufe wird der Zeitpunkt bestimmt, bei dem zu Beginn der Haltephase der höchste Druck (an der Entlüftungsleitung) herrscht. Der zu diesem Zeitpunkt $t_{p=max}$ zugehörige Druck (an der Entlüftungsleitung) ist das Druckniveau, auf das sich die Korrektur bezieht. Zu diesem Zeitpunkt ist das momentane Gasvolumen in der Druckkammer $V_{p=max}$.

$$V_{DK,out} = V_{DK,in} + V_1 - V_{p=max} \quad (15)$$

$V_{DK,out}$	-	druckkompensiertes Lösungsvolumen zum Zeitpunkt t_1	[L]
$V_{DK,in}$	-	gemessenes, eingebrachtes Lösungsvolumen zum Zeitpunkt t_1	[L]
V_1	-	Gasvolumen in der Druckkammer zum Zeitpunkt t_1	[L]
$V_{p=max}$	-	Gasvolumen in der Druckkammer zum Zeitpunkt $t_{p=max}$	[L]

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme der Lösung aufgrund schwankender Luftfeuchtigkeit:

Bei der Berechnung des in die Druckkammer einfließenden Lösungsvolumens $V_{DK,in}$ wurde die Volumenzufuhr über die Massenänderung der Lösung im Fass bestimmt. Während der Druckbeaufschlagungen wurde jedoch nicht nur Lösung entnommen, sondern gleichzeitig hat die Lösung Wasser aus der Luftfeuchtigkeit aufgenommen.

Am Versuchsort stand das Fass mit der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung offen und somit im Austausch mit der umgebenden Luft bzw. Luftfeuchtigkeit. Diese schwankte deutlich im Jahresgang, während die Temperatur konstant $27^\circ C$ beträgt. So ist im Sommer die Luftfeuchtigkeit hoch und im Winter und Frühjahr niedrig. Seit Beginn der Aufzeichnungen im April 2017 wurde eine maximale Luftfeuchtigkeit von 47,1 % am 06.08.2017 und eine minimale Luftfeuchtigkeit von 19,9 % am 03.03.2018 registriert (siehe Abbildung 10).

Für jede Salzlösung existiert in Abhängigkeit der Temperatur eine „Gleichgewichtsluftfeuchtigkeit“, bei der die Lösung mit der umgebenden Luftfeuchtigkeit im Gleichgewicht steht. Oberhalb dieser Gleichgewichtsfeuchtigkeit nimmt die Lösung Wasser aus der Umgebung auf, während unterhalb der Gleichgewichtsfeuchtigkeit Wasser aus der Lösung verdunstet. Die Gleichgewichtsfeuchtigkeit der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung liegt bei etwa 20 % bei 27° C. Bei den am Versuchsort herrschenden Bedingungen nimmt die gesättigte $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung somit stets Wasser auf.

Um diesen Prozess zu verifizieren und die Wasseraufnahme der Lösung abschätzen zu können, wurde dies in einem Laborversuch überprüft. Dazu wurde $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung in einem Behälter (mit einer Oberfläche von 14,3 cm²) im Klimaschrank bei konstant 27°C und $F_R = 47\%$ (als Maximalwert in situ) über 30 Tage gelagert und regelmäßig gewogen. Die Massezunahme der Lösung ist in Abbildung 122 dargestellt. In den ersten Tagen nimmt die Lösung schnell Wasser auf, nach etwa 15 Tagen ist die Zunahme deutlich geringer und geht gegen Null. Das aufgenommene Wasser verbleibt aufgrund der geringeren Dichte in den oberen Zentimetern der Lösung.

Für den gesamten betrachteten Zeitraum beträgt die mittlere Wasseraufnahme 0,1 g/h für die verwendete Oberfläche von knapp 15 cm². Hochgerechnet für einen Quadratmeter beträgt die Wasseraufnahme somit 1,59 g/h/m². Es ist hier jedoch zu beachten, dass die Lösung nicht mehr vollständig gesättigt ist, wobei die genaue Konzentration unbekannt ist.

Für eine Maximalabschätzung der Wasseraufnahme ist von einer konstant vollgesättigten Lösung auszugehen, sodass nur die ersten Stunden betrachtet werden. So hat die Lösung in den ersten 6 Stunden 0,81 g/h Wasser aufgenommen. Dieser Wert gilt nur für die Probe im Klimaschrank. Hochgerechnet auf die Fläche des Fasses am Versuchsort, ergibt sich eine Wasseraufnahme von 0,023 L/h bzw. 16,4 L/Monat.

Dieser im Vergleich zu den Volumenströmen hohe Wert ist sehr konservativ und unter den ungünstigsten Bedingungen berechnet. Am Versuchsort herrscht nicht durchgängig eine Luftfeuchtigkeit von 47 % und es stellt sich nach gewisser Zeit ein Gleichgewicht zwischen der Lösung und der umgebenden Luftfeuchtigkeit ein. Aufgrund der veränderlichen Lösungskonzentration und Luftfeuchtigkeit kann nicht für jeden einzelnen Zeitpunkt bzw. Zeitraum eine zugehörige Wasseraufnahme angegeben werden, sodass nur diese konservative **Maximalabschätzung von 0,023 L/h Wasseraufnahme** bestimmt werden konnte. Die tatsächliche Wasseraufnahme in situ war mit hoher Wahrscheinlichkeit deutlich geringer.

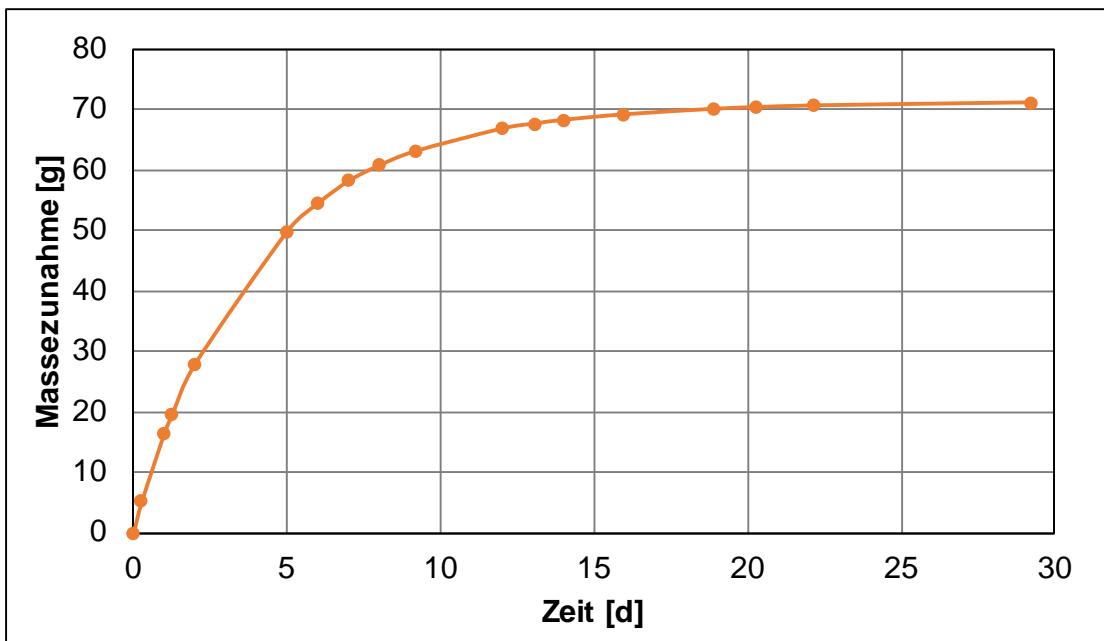


Abbildung 122: Massezunahme der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung im Klimaschrank bei 27°C und 47 % Luftfeuchtigkeit

Der bei den Druckbeaufschlagungen (Haltephasen) angegebene Volumenstrom wurde zu gering bestimmt, da mehr Lösung als gemessen das Fass verlassen hat, da die Lösung während der Entnahme gleichzeitig Wasser aufgenommen hat. Der Volumenstrom muss folglich um die Wasseraufnahme korrigiert werden. Der während der Druckhaltephasen bestimmte Volumenstrom beträgt zwischen 0,0 L/h und 2,03 L/h. Bei den Druckstufen mit geringerem Druck (DB 9 [1,4 bar] bis DB 14 [9,6 bar]) mit einem Volumenstrom von maximal 0,015 L/h überschreitet die Wasseraufnahme den Abfluss aus dem Fass in die Druckkammer. Damit kann ein Volumenstrom von maximal 0,023 L/h (meist sind es weniger) als maximal möglicher „Fehler“ bei der Messung des Volumenstroms angesehen werden. Dieser Wert ist sehr gering.

5.4 Ergebnisse der Feuchtesensoren

Durch die *Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar* wurden während der Errichtung des Bauwerks GV2 in einer Messebene TDR-Feuchtesensoren verlegt. Mit den TDR-Sensoren sollte die im Kontaktbereich durchtretende Lösung detektiert werden. Die TDR-Sensoren wurden am 23.07.2008 eingebaut. Die Position der Messebene befindet sich in 3,15 m Entfernung zur luftseitigen Ortsbrust und in 7,1 m Entfernung zur Druckkammer (Abbildung 123).

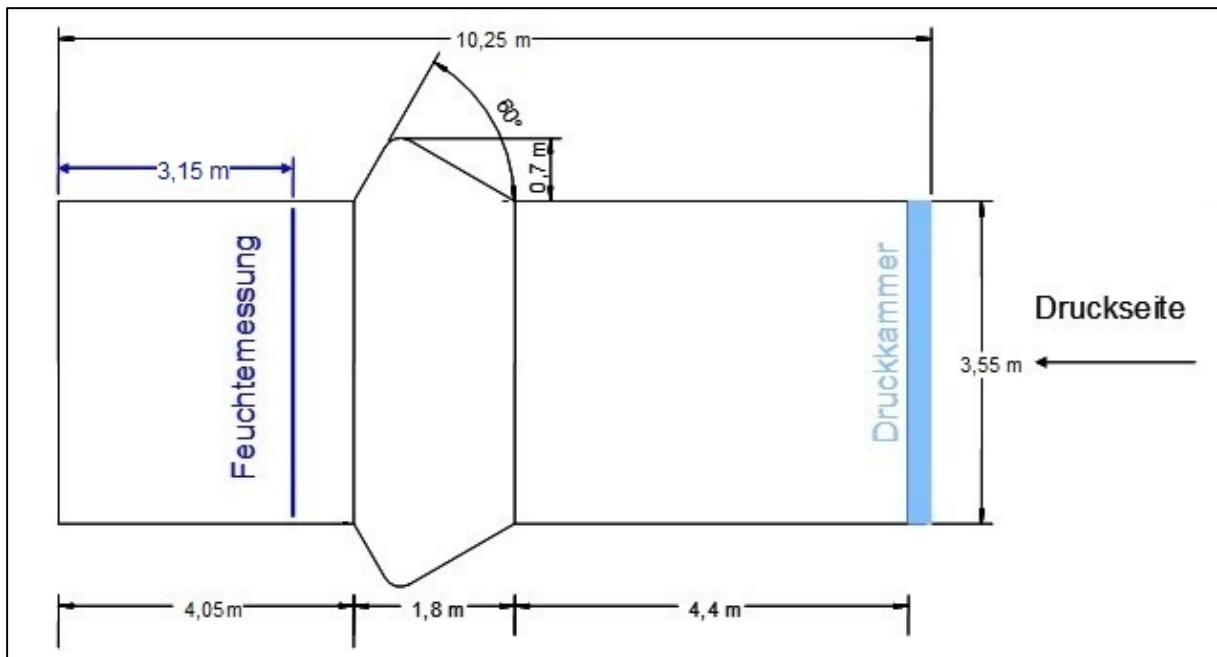


Abbildung 123: Position der TDR-Feuchtesensoren im Bauwerk GV2

In Abbildung 124 ist die Messebene von der Ortsbrust betrachtet mit der Anordnung der einzelnen Sensoren dargestellt. Es befindet sich der Sensor 1 am linken Stoß, der Sensor 2 an der Firste, der Sensor 3 am rechten Stoß und der Sensor 4 an der Sohle. Die Abbildung 125 enthält Fotos der Sensoren während des Einbaus im Jahr 2008. Es ist hier auch zu erkennen, dass die etwa 18 cm breiten Bänder einige Zentimeter versetzt angeordnet sind. So liegen die TDR-Bänder am linken und rechten Stoß etwas dichter zur Druckkammer und die Bänder an Sohle und Firste etwas näher zur Luftseite.

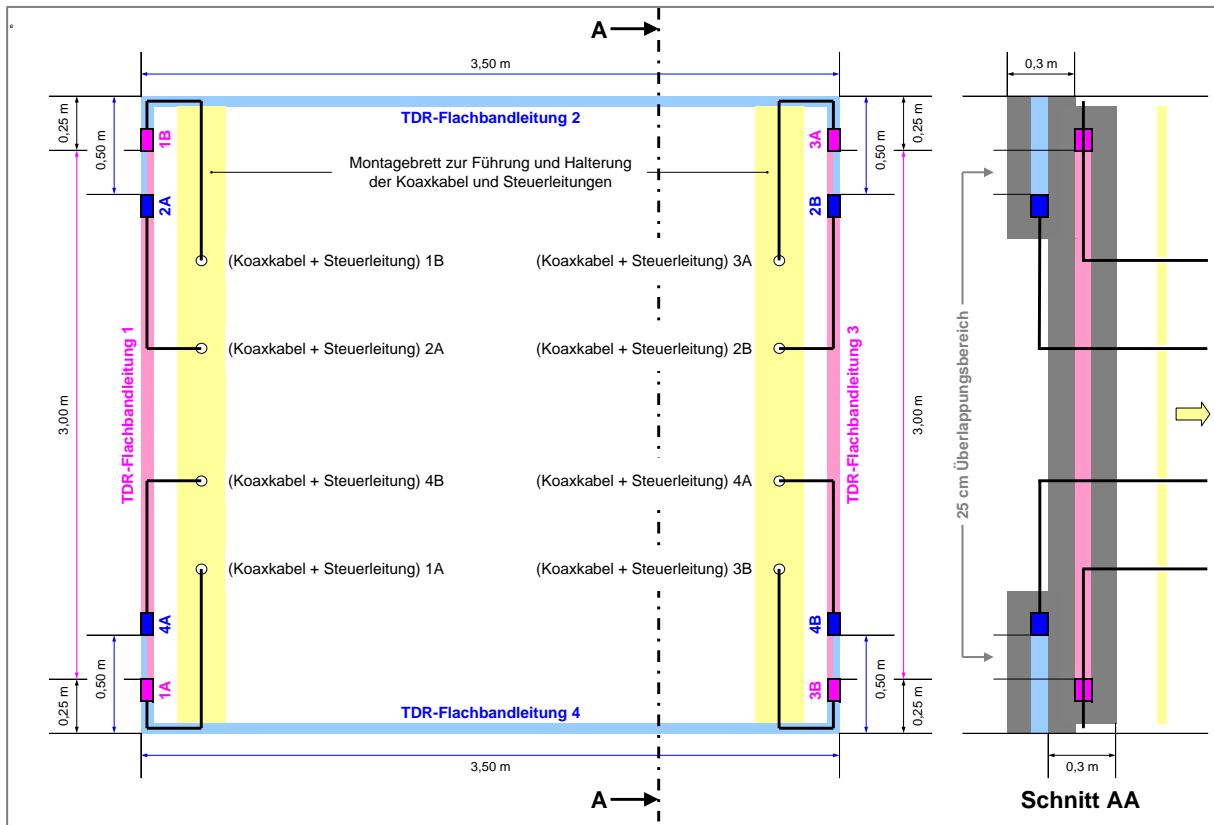


Abbildung 124: Anordnung der TDR-Sensoren in der Messebene; Blick auf die Messebene von der luftseitigen Ortsbrust



Abbildung 125: Blick auf die Messebene mit Sensor 1 (linker Stoß), Sensor 2 (Mitte oben), Sensor 3 (rechter Stoß)

Messprinzip des TDR-Verfahrens:

Das TDR-Verfahren (Time Domain Reflectometry bzw. Zeitbereichsreflektometrie) basiert auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auf Leitungen. In Abbildung 126 ist die Wirkungsweise dargestellt: Das Zeitbereichsreflektometer generiert einen Spannungssprung und überträgt diesen über ein Koaxialkabel auf die Sensorleitung, welche eine andere Impedanz als das Koaxialkabel besitzt. An der Schnittstelle zwischen beiden Kabeln kommt es somit zur Reflexion (2 zu 3). Das reflektierte Signal wird gemessen. Die Sensorleitung ist nicht abgeschirmt, so dass sich die dielektrischen Eigenschaften des umgebenden Materials auf die Wellenausbreitung auswirken. Ändert sich die Feuchte entlang des Sensors und somit auch

die Dielektrizitätszahl, kommt es zu einem anderen Reflexionsverhalten. Über die Laufzeit entlang des Sensors können Rückschlüsse auf den Ort der Feuchteänderung gezogen werden. Die Ortsauflösung kann über zusätzliche Messungen und Rekonstruktionsverfahren verbessert werden.

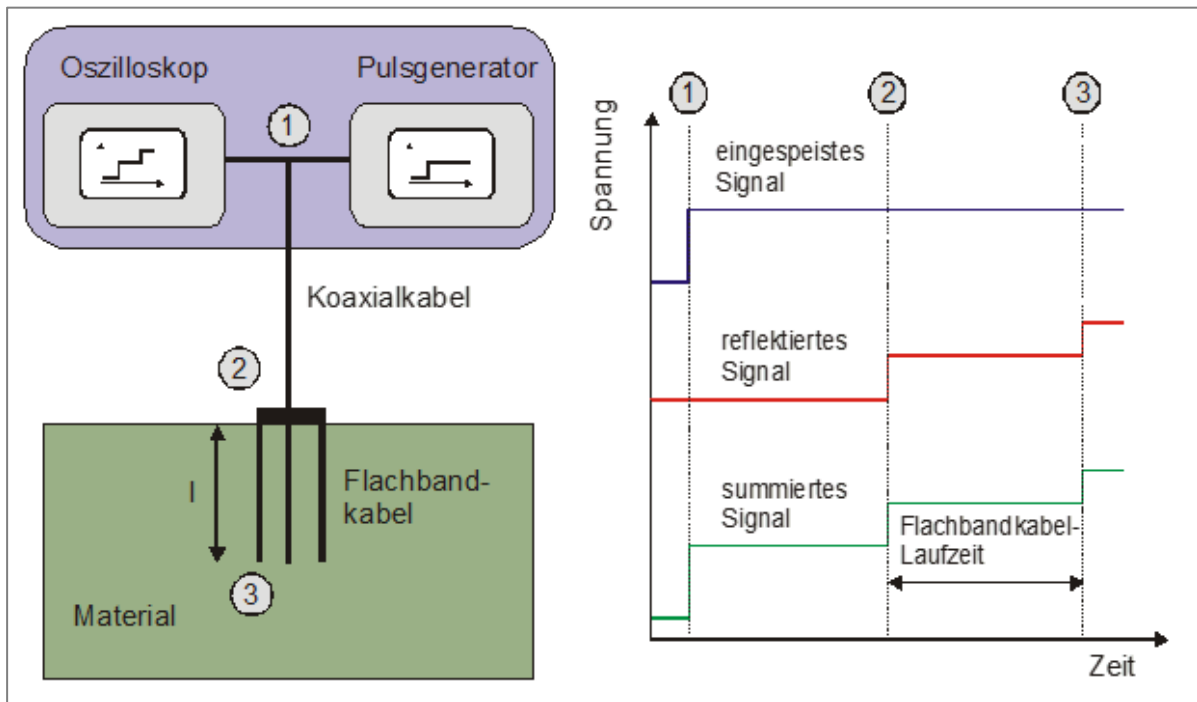


Abbildung 126: Messprinzip des TDR-Verfahrens und entsprechende Signalverläufe [AU30]

Die TDR-Messungen haben folgenden Messaufbau (Abbildung 127):

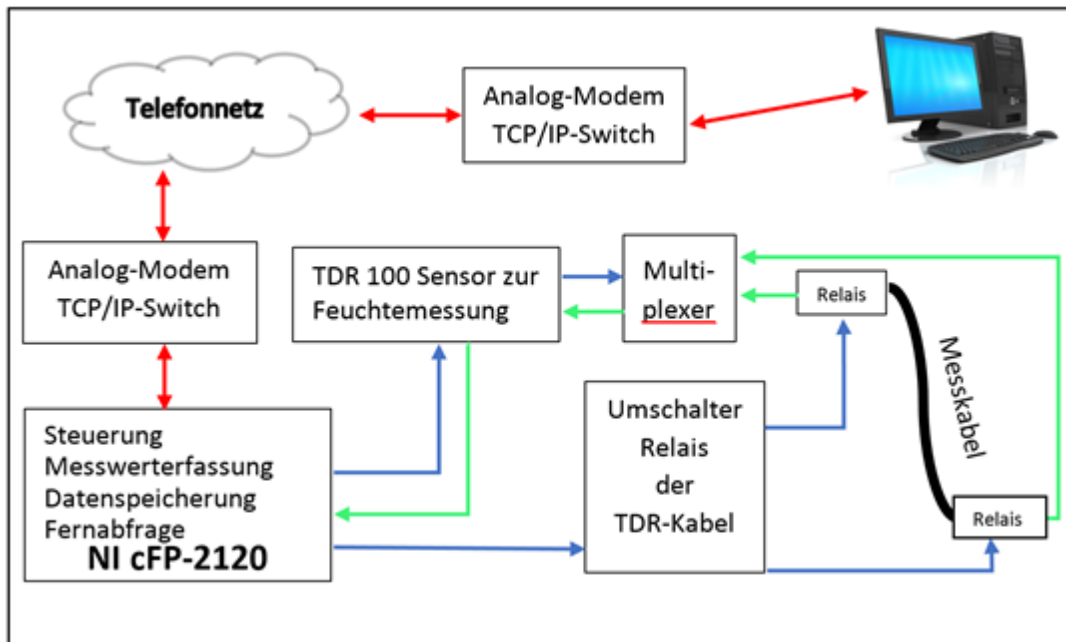


Abbildung 127: Schematische Darstellung des Messaufbaus zu TDR-Messungen

Nachdem das TDR-Messsystem (Abbildung 128), welches seit 17.12.2008 in Betrieb ist und vom GV2 seitdem alle 12 Stunden Messwerte liefert, einer Prüfung unterzogen wurde, ist es auf die neuen Anforderungen für die Füllung der Druckkammer mit Flüssigkeit und der darauffolgenden Druckbeaufschlagung angepasst worden. Diesbezüglich wurde das Messsystem an das Telefonnetz der Grube angeschlossen und die Software aktualisiert, um eine Begleitung der Messung durch die MFPA direkt aus Weimar zu ermöglichen.



Abbildung 128: TDR-Messkasten am 18.10.2016

Ergebnisse der Feuchtemessungen:

Vor Beginn der Druckkammerbefüllung (05.10.2016) wurden die Messungen an allen 4 Sensoren vom Oktober 2008 mit den Messungen vom Oktober 2016 verglichen. Innerhalb dieses Zeitraumes wurden keine Feuchtigkeitsänderungen festgestellt.

Für die Zeit der Druckkammerbefüllung und -beaufschlagung wurde das Messintervall am 06.10.2016 auf 30 Minuten angepasst.

Für die Auswertung der Feuchteverteilung und -entwicklung wurden die Messsignale von zwei Zeitpunkten betrachtet und verglichen. In den folgenden Abbildungen sind für die jeweiligen Beobachtungszeiträume jeweils die 2 Messsignale eines Sensors übereinander dargestellt. Die Beobachtungszeiträume betragen wenige Wochen bis mehrere Monate und richten sich nach den Zeitpunkten der Druckerhöhungen. Liegen die Messsignale genau übereinander, gab es an den Sensoren keine Feuchtigkeitsänderung. Unterscheiden sich die Linien, fand eine Feuchteänderung statt.

Für den **Sensor 1** (am linken Stoß) wurde in Abbildung 129 die erste Messung vom 06.10.2016, 20:08 Uhr (schwarz) mit der Messung vom 05.07.2017, 23:15 Uhr (rot) überlagert dargestellt. Es sind keine Änderungen zwischen den beiden Messungen zu erkennen. Während dieser Zeit wurde die Druckkammer befüllt und das Bauwerk mit einem Druck bis 1,1 bar beaufschlagt.

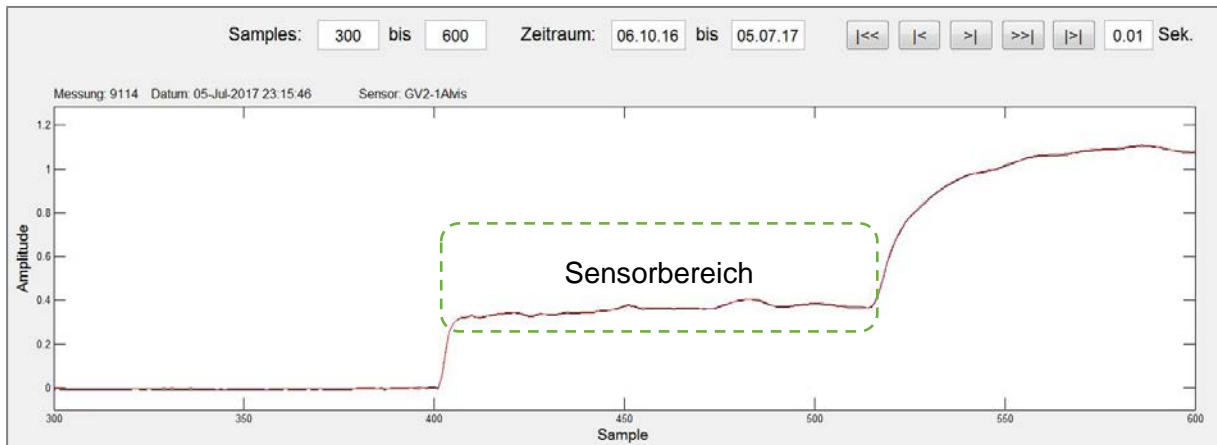


Abbildung 129: Messsignale am Sensor 1A zwischen dem 06.10.2016 und dem 05.07.2017

Für den **Sensor 2** (an der Firste) ist in Abbildung 130 die erste Messung vom 06.10.2016, 20:11 Uhr (schwarz) mit der Messung vom 05.07.2017, 23:18 Uhr (rot) überlagert dargestellt. Es sind ebenfalls keine Änderungen zwischen den beiden Messungen zu erkennen.

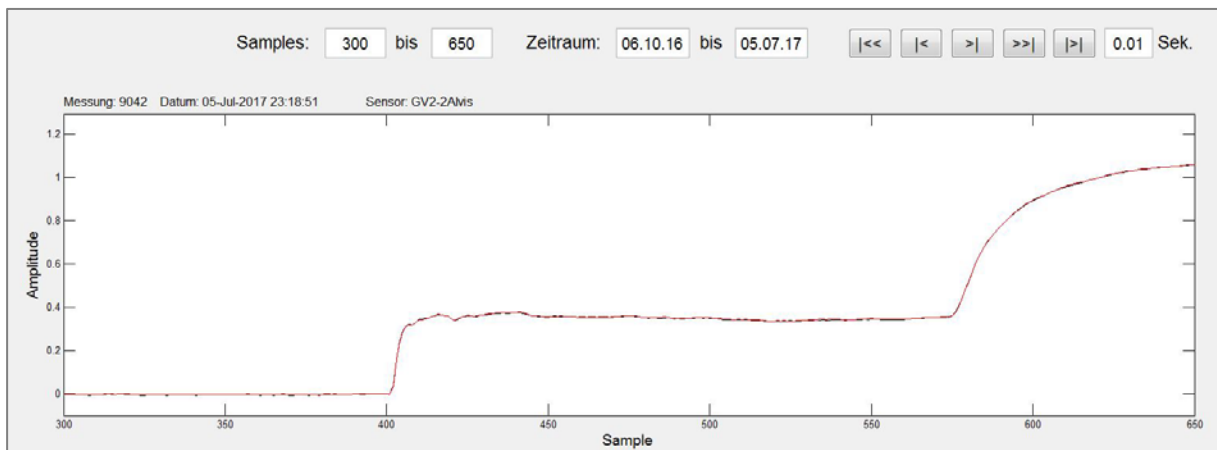


Abbildung 130: Messsignale am Sensor 2A am 06.10.2016 und am 05.07.2017

Für den **Sensor 3** (am rechten Stoß) wurden der obere Bereich 3A und der untere Bereich 3B separat betrachtet.

Im Zuge einer Befahrung unter Tage am 18.10.2016 wegen Wartung und Datensicherung wurde festgestellt, dass es bei den Messungen am Sensor 3A zu zeitweisen Störungen kommt. Daraus resultierend wurde entschieden, für die Begleitung der Untertagemessungen von Weimar aus, den Sensor 3B zusätzlich einzubeziehen.

Für den Sensor 3B ist in Abbildung 131 die Messung am 18.10.2016, 14:54 Uhr (schwarz) und die Messung am 16.11.2016, 23:32 Uhr (rot) dargestellt. Beide Messkurven liegen übereinander. Innerhalb des genannten Zeitraumes sind keine Änderungen zu erkennen.

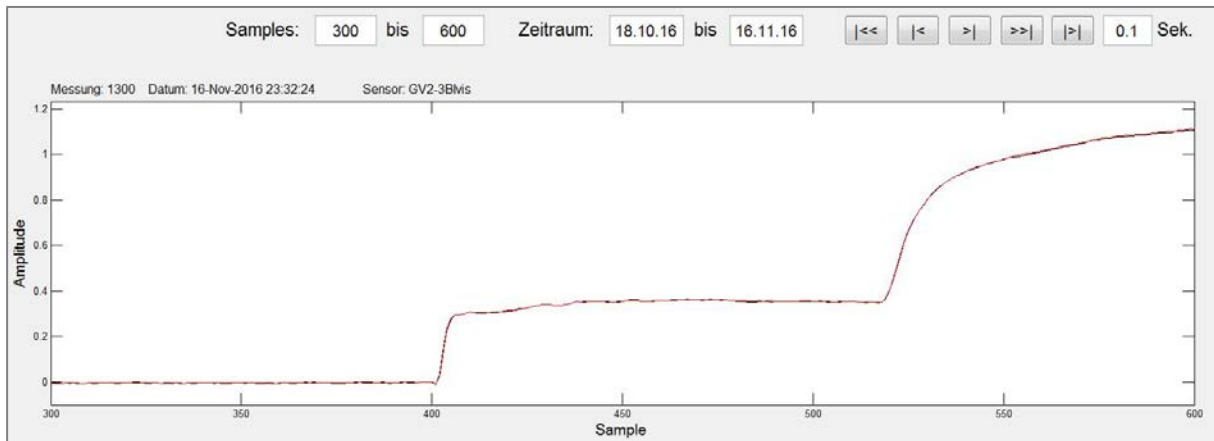


Abbildung 131: Messsignale am Sensor 3B, Messung von der Seite B (von unten nach oben), am 16.11.2016, 23:32 Uhr (rot) im Vergleich zur Messung am 18.10.2016, 14:54 Uhr (schwarz)

Am **Sensor 3B** wurden ab dem 17.11.2016, 06:32 Uhr (rot) erste, geringfügige Änderungen im Vergleich zur Messung am 18.10.2016, 15:54 Uhr (schwarz) festgestellt (Abbildung 132), wobei die Feuchtigkeitszunahme mit jeder nachfolgenden Messung deutlicher zu sehen war.

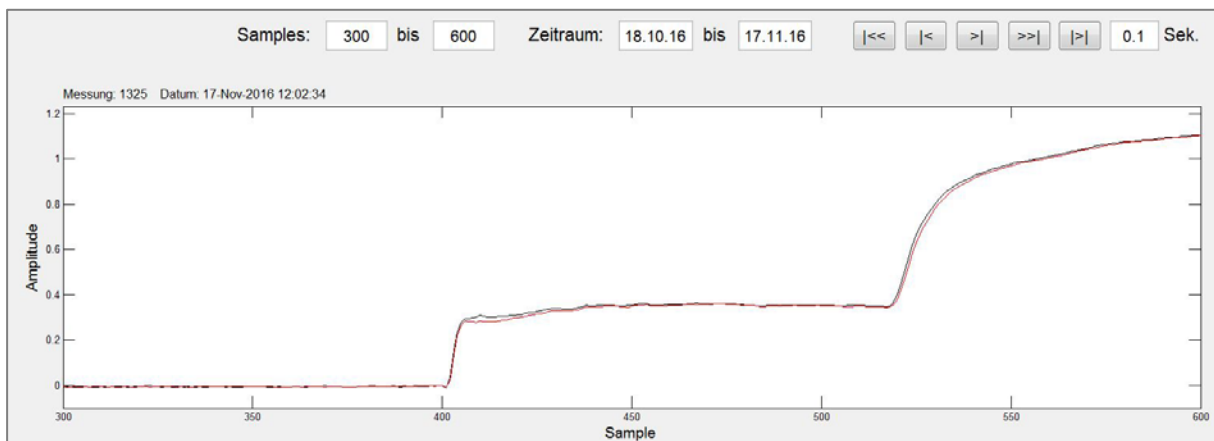


Abbildung 132: Beginn der Feuchtigkeitszunahme am Sensor 3B am 17.11.2016, um 06:32 Uhr

In der Zeit vom 17.11.2016, 06:32 Uhr (schwarz) bis zum 24.11.2016, 23:45 Uhr (rot) wurde in diesem Bereich eine Feuchtigkeitszunahme bis zum Maximum festgestellt (Abbildung 133). Vor diesem Zeitraum lagen die Druckkammerbefüllung und die ersten drei Druckbeaufschlagungen mit einem Druck bis zu 0,7 bar.

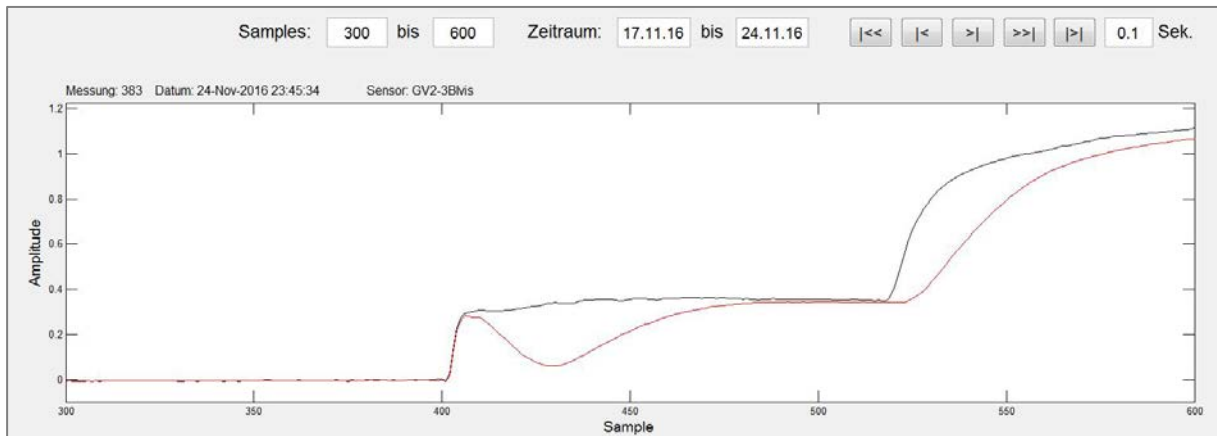


Abbildung 133: maximale Feuchtigkeitszunahme am Sensor 3B am 24.11.2016, 23:45 Uhr

Am **Sensor 4A** (auf der Sohle) wurde ebenfalls am 17.11.2016, allerdings etwas später, erst ab der Messung um 14.00 Uhr eine Feuchtigkeitszunahme detektiert, die sich bis zum Maximum am 24.12.2016, 23:53 Uhr (Abbildung 134) ausweitete.

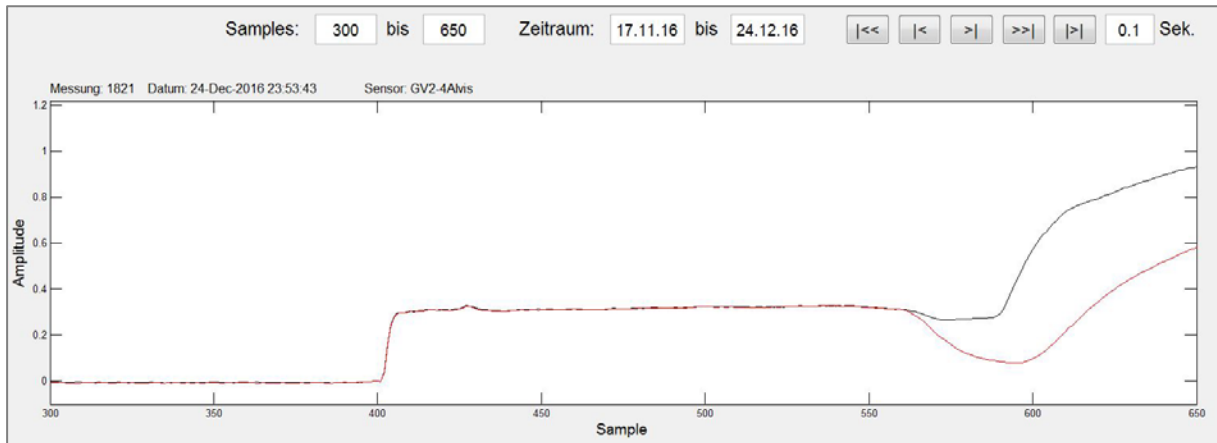


Abbildung 134: maximale Feuchtigkeitszunahme am Sensor 4A am 24.12.2016, 23:53 Uhr

Der Bereich dieser Feuchtigkeitszunahme befindet sich in dem unteren vertikalen Bereich des rechten Stoßes (in Abbildung 135 eingekreist). Im Vorfeld des Einsatzes der TDR-Sensoren gab es Bedenken, dass sich die Feuchteänderung bei einem Flüssigkeitszutritt entlang des Sensors ausbreiten könnte. Betrachtet man den Bereich der Feuchteänderung näher, so kann man feststellen, dass die Flüssigkeit nur im unteren Bereich des rechten Stoßes detektiert wurde und sich nicht entlang des Sensors ausgebreitet hat. Somit konnten diese Bedenken ausgeräumt werden.

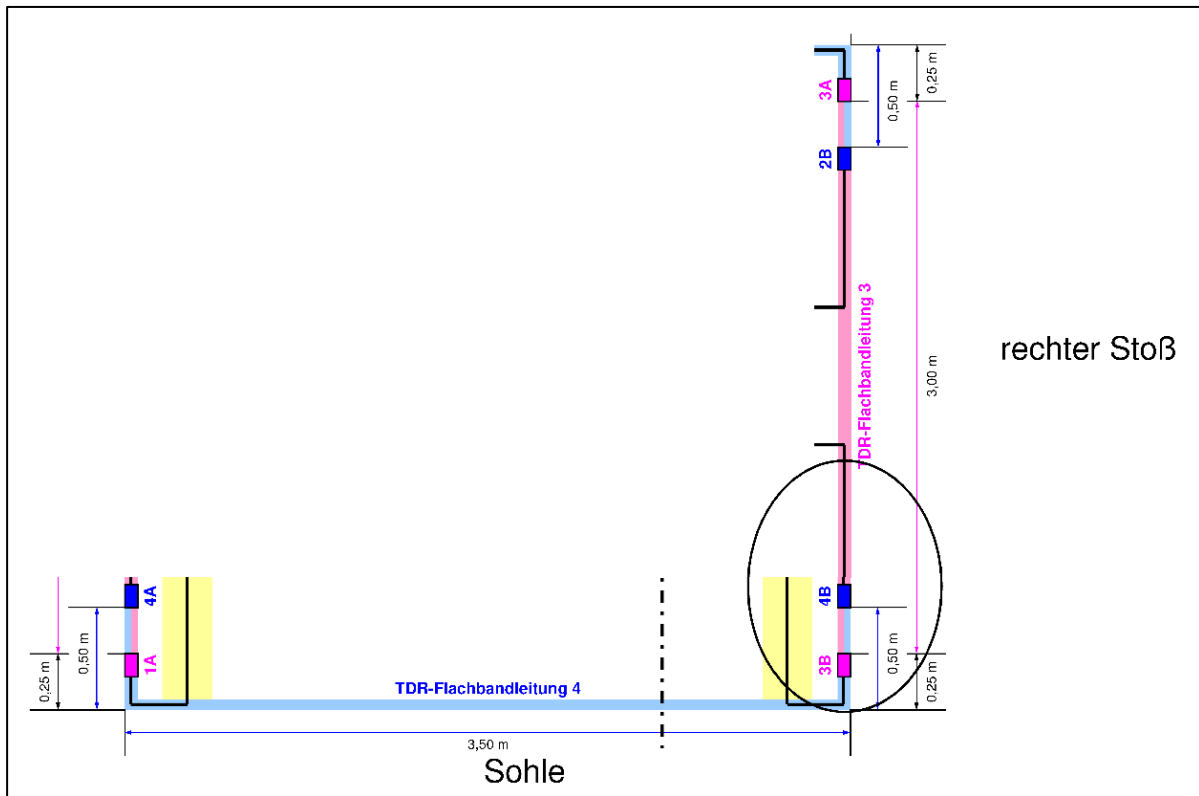


Abbildung 135: Lagen der Sensoren 3 und 4, von der Luftseite betrachtet mit dem eingekreisten Bereich, in dem die Feuchtigkeitszunahme detektiert wurde

In der Abbildung 136 ist das Signal des Sensors 3, gemessen von der Seite B über den Zeitraum vom 18.10.2016, 14:54 Uhr bis zum 05.07.2017, 23:23 Uhr dargestellt. In der farblichen Darstellung im unteren Bereich der Abbildung 136 ist der zeitliche Ablauf der Feuchtigkeitszunahme ab dem 17.11.2016 und die Feuchtigkeitsabnahme ab dem 10.12.2016 deutlich zu erkennen.

In Abbildung 137 ist ein Ausschnitt für den Zeitraum der Feuchtigkeitszu- und -abnahme (17.11.2016 bis 05.01.2017) dargestellt.

Es sind drei plötzliche Veränderungen erkennbar. Diese werden den ersten drei Druckstufen zugeordnet. In Abbildung 137 sind die Druckstufen und die zugehörige Feuchteänderung mit jeweils einer Farbe markiert. So ist die erste Feuchtigkeitsänderung am 17.11.2016 mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die erste Druckbeaufschlagung am 02.11.2016 zurückzuführen. Eine zweite Änderung der Feuchtigkeit wurde am 01.12.2016 festgestellt. Diese Feuchtigkeitszunahme wird auf die zweite und dritte Druckbeaufschlagung am 08.11. und 09.11.2016 zurückgeführt.

Der dritte Feuchtigkeitszutritt am Sensor 3B erfolgte am 07.12.2016 mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund der Druckbeaufschlagung am 29.11.2016.

Die drei detektierten Feuchtigkeitszutritte traten in Abständen von 15, 22 bzw. 8 Tagen zu den jeweiligen Druckbeaufschlagungszeitpunkten auf. Diese Unterschiede sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die verschiedenen mittleren Drücke während der einzelnen Druckbeaufschlagungen und / oder auf verschiedene Fließwege und / oder auf Reaktionen zwischen Lösung und Baustoff zurückzuführen.

Im weiteren Verlauf der Messungen (ab dem 10.12.2016) wurde eine deutliche Feuchtigkeitsabnahme detektiert. Durch die anschließenden Druckbeaufschlagungen am 04.01.2017 und am 16.03.2017 konnte in der Messebene kein Flüssigkeitszutritt festgestellt werden. Ursache dieser "Austrocknung" kann sein:

- a) die Verteilung der Flüssigkeit im Gebirge bzw. Bauwerk und / oder
- b) die Aufnahme der Lösung durch den MgO-Baustoff und / oder

- c) die Reaktionen bzw. Dichteänderungen aufgrund von Phasenumwandlungen, die als Änderung der Dielektrizitätskonstante gemessen wurden.

Ist der Sensor schon mit feuchtem Material umgeben, so detektiert dieser weiter zutretende Feuchte erst, wenn sie deutlich höher als die vorhandene Feuchte ist.

Bis zum Ende des Messzeitraumes am 05.05.2017 war die gemessene Feuchte noch nicht bis auf die Ausgangsfeuchte zurückgegangen.

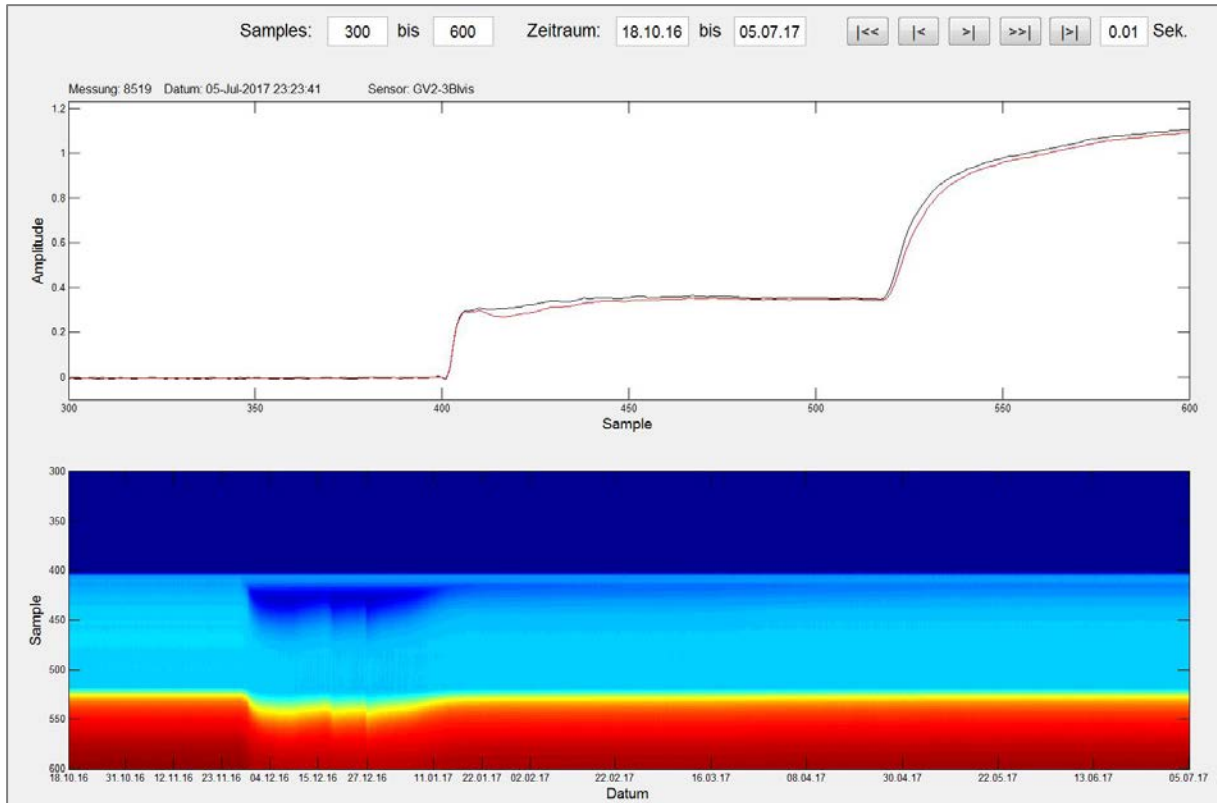


Abbildung 136: Messsignale am Sensor 3 zwischen dem 18.10.2016 und dem 05.07.2017

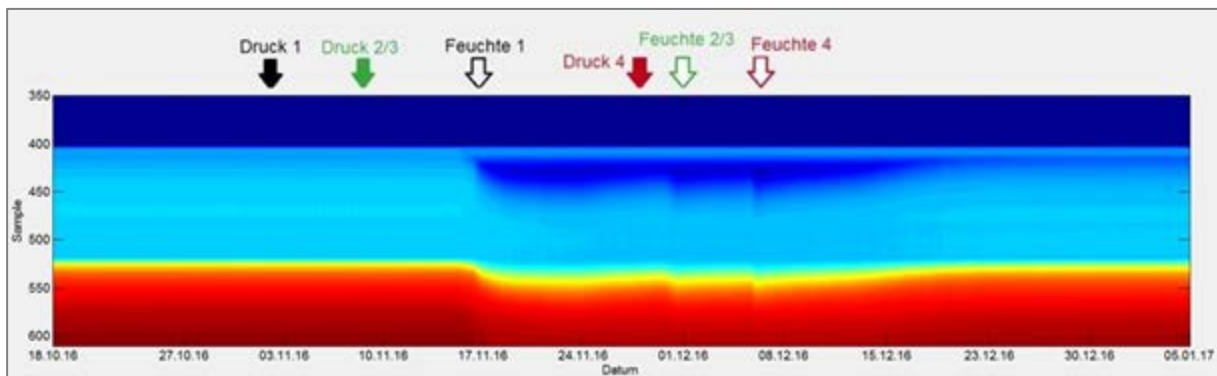


Abbildung 137: Messsignale am Sensor 3B zwischen dem 18.10.2016 und dem 05.01.2017; Zuordnung der Druckstufen und Feuchtedetektionen

Die Ergebnisse belegen, dass die über die Druckkammer eingebrachte Lösung bis in die TDR-Messebene in knapp 7 m Entfernung zur Druckkammer vorgedrungen ist. Da nur in einem Bereich eine Flüssigkeitsveränderung detektiert wurde, ist der Zustrom nicht gleichmäßig über den Kontaktbereich im Querschnitt verteilt. Die Fließwege sind in den Bereichen aufgetreten, in denen der hydraulische Widerstand am geringsten ist. Der hydraulische Widerstand ist im

Tachyhydrit- und Kieserit-haltigen Gebirge wesentlich von der Verwitterung des Kieserits und des Tachyhydrits abhängig. Die Verwitterung hat sich bereits im Laufe der Standzeit des GV2-Bauwerkes von ca. 9 Jahren eingestellt, obwohl bei der Herstellung des GV2-Bauwerkes versucht wurde, die Kontur durch Sandstrahlen zu reinigen und anschließend „sofort“ mit Spritzbeton zu versiegeln. Die Fließwege sind auch wahrscheinlich nicht geradlinig verlaufen. Insbesondere durch den Zahn können die Fließwege beeinflusst worden sein.

Während der nächsten Druckbeaufschlagungen zwischen Juli 2017 und November 2018 wurde der GV2 über die Druckkammer acht Mal mit Flüssigkeit mit unterschiedlichem Druck (1,1 bar bis 9,6 bar) beaufschlagt. Im Gegensatz zu den Druckbeaufschlagungen im Jahr 2016, bei denen die Feuchtigkeitsänderungen deutlich sichtbar waren, wurden an den TDR-Sensoren bis zum 25.10.2018 keine Feuchtigkeitsänderungen detektiert. An der Luftseite des Bauwerks wurde bis zum 13.11.2018 auch noch kein Flüssigkeitsaustritt festgestellt.

In den folgenden Abbildungen werden die Daten zwischen Juli 2017 (schwarze Linien) mit Daten vom Oktober bzw. November 2018 (rote Linien) verglichen. In Abbildung 138 und Abbildung 139 sind die erste Messung und die letzte Messung bei den Sensoren 1 (linker Stoß) und 2 (Firste) fast deckungsgleich. Es ist keine Feuchtigkeitsänderung zu erkennen.

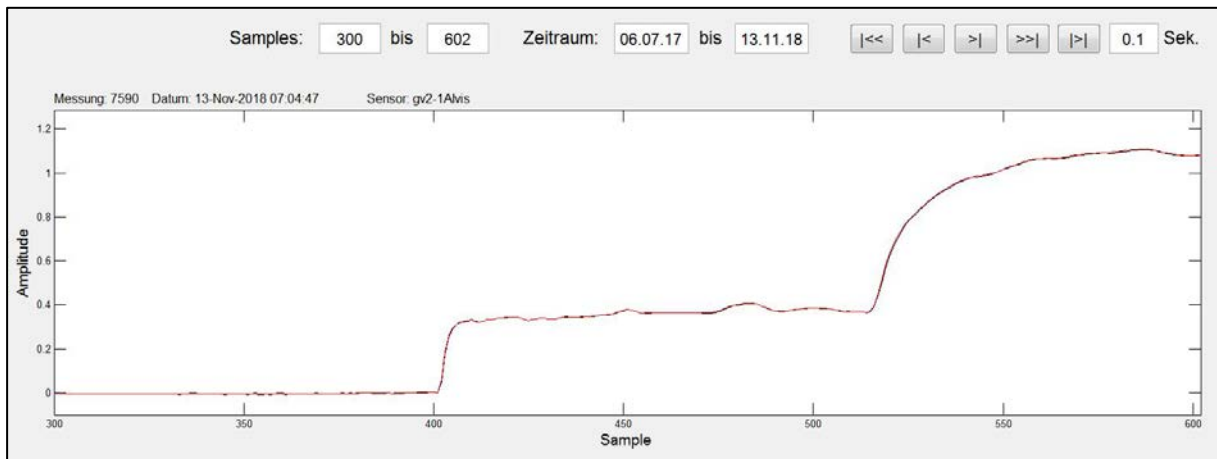


Abbildung 138: Messsignale am Sensor 1 zwischen dem 06.07.2017 und dem 13.11.2018

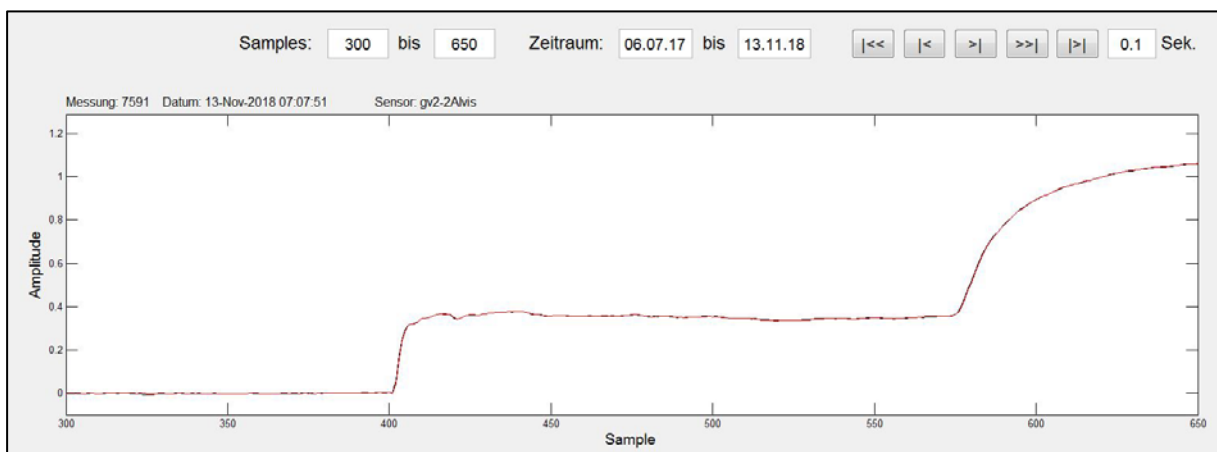


Abbildung 139: Messsignale am Sensor 2 zwischen dem 06.07.2017 und dem 13.11.2018

In Abbildung 140 ist die Feuchtigkeitsentwicklung zwischen dem 06.07.2017 und dem 25.10.2018 am Sensor 3 am rechten Stoß dargestellt. Im vorderen Bereich des Sensors 3 ist die rote Linie (25.10.2018) minimal oberhalb der schwarzen Linie (06.07.2017). Dieser vordere

Bereich stellt im Bauwerk den Bereich am unteren rechten Stoß dar. Diese Verschiebung der Linien deutet auf eine minimale Austrocknung im Sensitivitätsbereich des Sensors während des dargestellten Zeitraums hin. Bestätigt wird dies auch durch die Änderungen, die im hinteren Bereich des Sensors 4 (Abbildung 141), welcher sich ebenfalls am unteren rechten Stoß befindet (siehe auch Abbildung 135), noch deutlicher zu erkennen sind. Hier ist zu sehen, dass im dargestellten Zeitraum noch eine Austrocknung in dem Bereich, in dem vorher am Sensor 3 die Flüssigkeit detektiert wurde, stattfand.

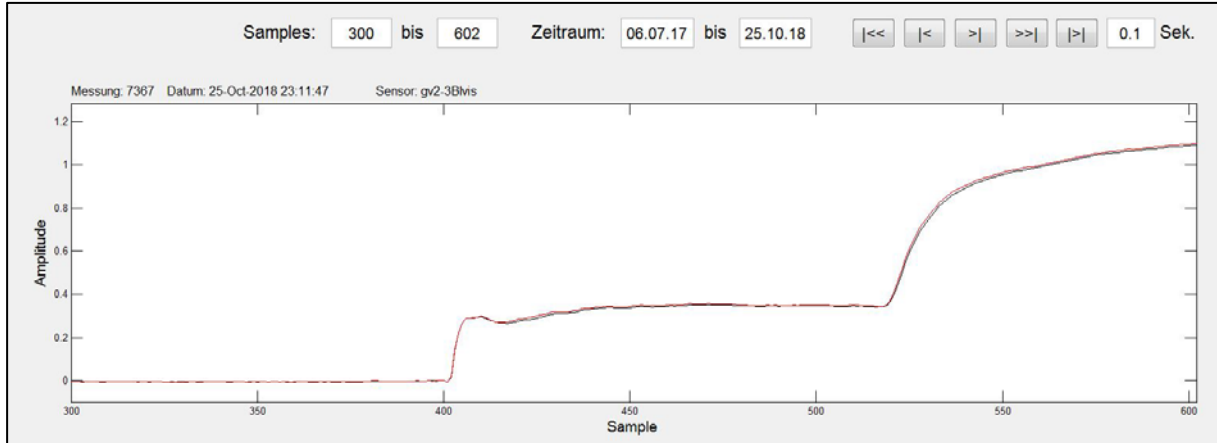


Abbildung 140: Messsignale am Sensor 3 zwischen dem 06.07.2017 und dem 25.10.2018

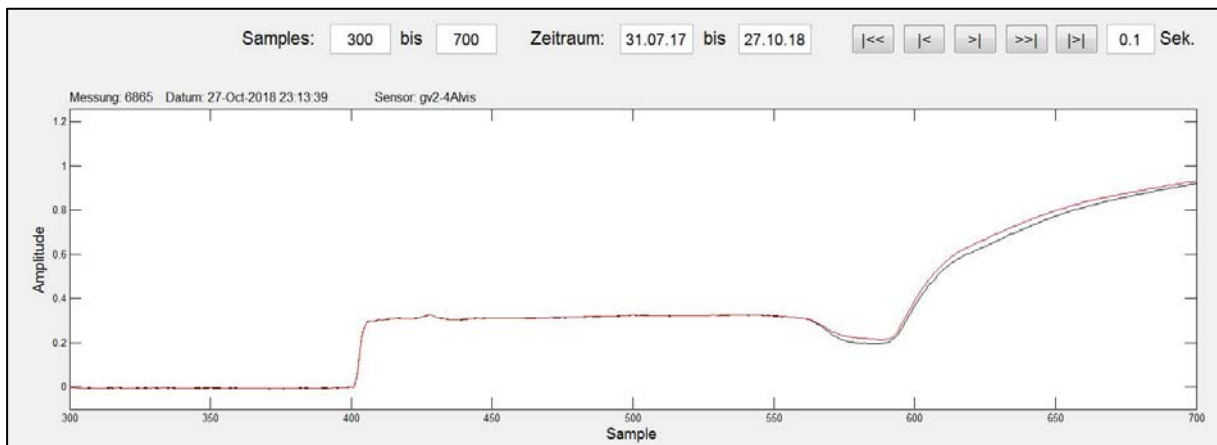


Abbildung 141: Messsignale am Sensor 4 zwischen dem 06.07.2017 und dem 25.10.2018

Am 24.09.2018 wurde der Flüssigkeitsdruck auf knapp 10 bar erhöht. Bis zum 25.10.2018, also einen Monat nach der Druckerhöhung, sind keine Änderungen an den Sensoren aufgetreten. Erst die Messungen am 26.10.2018 zeigten erneut eine Feuchtigkeitszunahme am Sensor 3 am rechten Stoß (Abbildung 142 und Abbildung 143) Die Feuchtigkeitszunahme erreichte am 07.11.2018 das Maximum und blieb dann bis zum 13.11.2018 konstant.

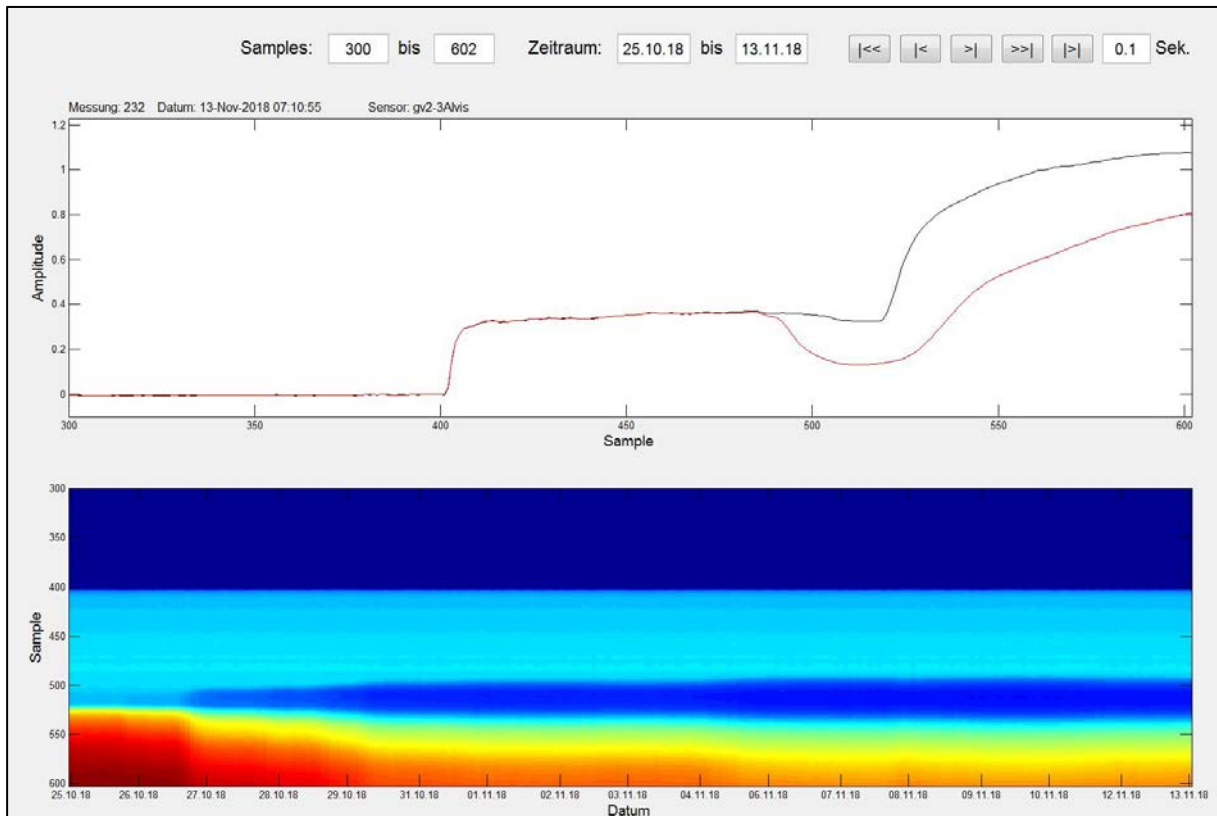


Abbildung 142: Messsignale am Sensor 3A zwischen dem 25.10.2018 und dem 13.11.2018

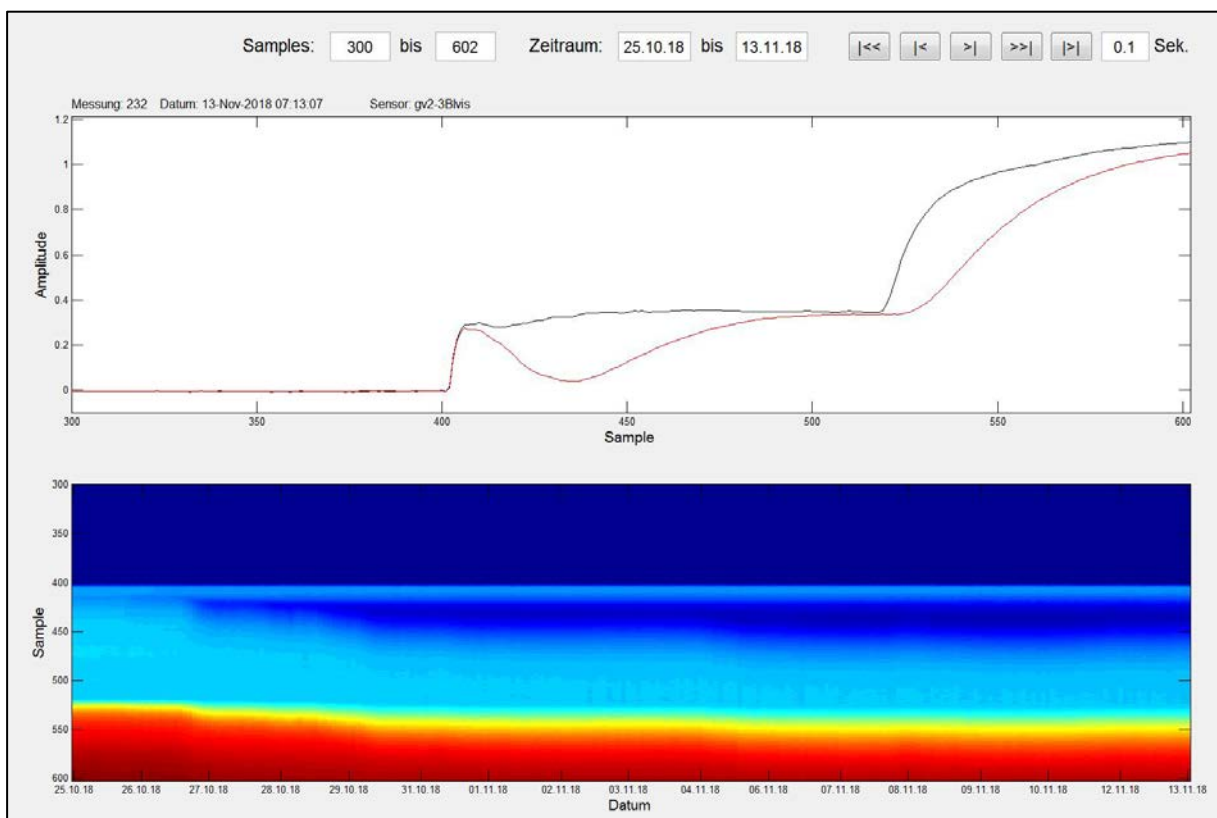


Abbildung 143: Messsignale am Sensor 3B zwischen dem 25.10.2018 und dem 13.11.2018

In Abbildung 143 ist zu erkennen, dass sich bei den Messungen von der B-Seite, also von unten nach oben, die Amplitude des TDR-Signals (Reflexionsfaktor) fast über den gesamten Sensor ändert. Mit zunehmender Feuchte lässt sich der genaue Ort der Feuchteänderung aus den Rohdaten immer schwerer erkennen. Für einseitige Messungen müssten hier komplexe Rekonstruktionsalgorithmen angewendet werden. Durch die Auswertung der A-Seite (Abbildung 144) und die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs beider Signale kann die Feuchteänderung dem unteren rechten Stoß zugeordnet werden. Es ist auch ersichtlich, dass sich die Feuchte nicht entlang der Sensoren ausgebreitet hat.

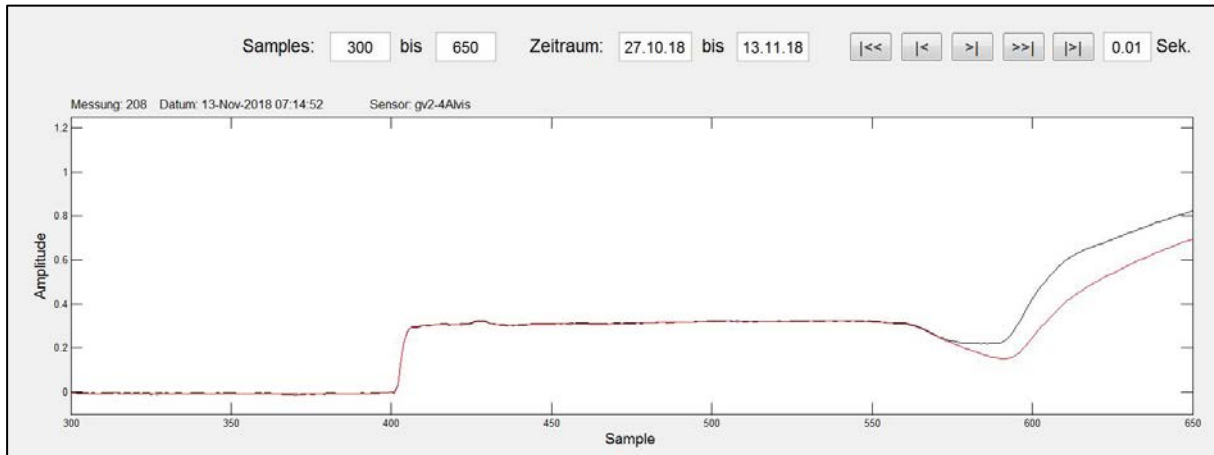


Abbildung 144: Messsignale am Sensor 4A zwischen dem 25.10.2018 und dem 13.11.2018

Vergleicht man die Messungen vom Oktober/November 2018 mit den Messungen von 2016, ist ebenfalls eine Feuchteänderung am Sensor 4 einige Zeit später zu erwarten. Wie Abbildung 144 zeigt, ist diese auch eingetreten. Im Gegensatz zu 2016, in dem der zeitliche Versatz der Feuchteänderung ca. 7,5 Stunden betrug, traten die ersten Feuchteänderungen 2018 erst ca. 48 Stunden später am 28.10.2018 auf. Diese erreichten am 09.11.2018 ihr Maximum. Danach änderte sich das Messsignal bis zum 13.11.2018 nicht mehr.

Die Verzögerung zwischen Sensor 3 und 4 ergibt sich durch einen leichten Versatz bei der Anordnung (Abbildung 125). Die Sensoren wurden im Abstand von ca. 15 cm an der Kontur befestigt. Da der Sensor 3 etwa 15 cm näher zur Druckkammer angebracht ist, erklärt dies auch, warum die Feuchtigkeitsänderungen am Sensor 3 eher als am Sensor 4 zu erkennen sind. Bezieht man den Abstand der Sensoren von ca. 15 cm auf die Zeit von 2 Tagen, die zwischen den Feuchtigkeitsänderungen lag, so kann daraus eine örtliche „Fließgeschwindigkeit“ im Bereich der Kontaktzone berechnet werden. Diese liegt bei $0,15 \text{ m}/(2 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s} = 9 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. Dieser Wert ist allerdings auf Grund des kurzen Fließweges kaum belastbar. Zudem ist nicht klar, ob die Strömung in der direkten Kontaktzone oder in der Auflockerungszone stattfand.

2016 betrug die Zeitdifferenz 7,5 Stunden, in der nach der Registrierung einer Feuchteänderung am Sensor 3 auch eine Feuchteänderung am Sensor 4 festgestellt wurde. Im Jahr 2018 betrug die Zeitdifferenz 48 Stunden. Ursache für die zeitliche Änderung kann die Phasenumwandlung im MgO-Beton bzw. die Dichteänderung aufgrund von Phasenumwandlungen sein.

Vom Beginn der Messungen im Oktober 2016 bis zum 16.02.2019 waren am Sensor 1 am linken Stoß keine Feuchteänderungen zu erkennen. Erst bei den Messungen am 16.02.2019 traten erste Feuchteänderungen im unteren Bereich auf (Abbildung 145). Zu diesem Zeitpunkt betrug der Druck in der Druckkammer bereits über 11 Wochen 12,6 bar. Entlang des Sensors ergibt sich ein kontinuierlicher Anstieg der Feuchte. Ab dem 25.02.2019 zeigt sich nochmals ein etwas stärkerer Anstieg. Dieser Anstieg setzt sich bis zum 18.04.2019 fort. Ab dann ist einen Rückgang der Feuchte zu verzeichnen. Zwischen dem 15.04. und dem 18.04.2019 fand

die kurzzeitige Druckentlastung von 12,6 bar auf etwa 7 bar statt. Anschließend lag der Druck in der Druckkammer bis zum 23.04.2019 bei 12,5 bar. Ab dem 21.04.2019 steigt die Feuchte erneut an. Zuvor war der Druck am 23.04.2019 auf 17,3 bar erhöht worden. Am 09.05.2019 ist eine deutliche Feuchtigkeitszunahme zu erkennen. Am 15.05.2019 ist eine extrem starke Feuchtigkeitszunahme zu erkennen, die schon nach kurzer Zeit wieder leicht zurückgeht. Diese stark erhöhte Feuchtigkeit ist auf die am 14.05.2019 vorgenommene Druckerhöhung in der Druckkammer zurückzuführen. Hier wurde der maximale Druck von 28,4 bar aufgebracht.

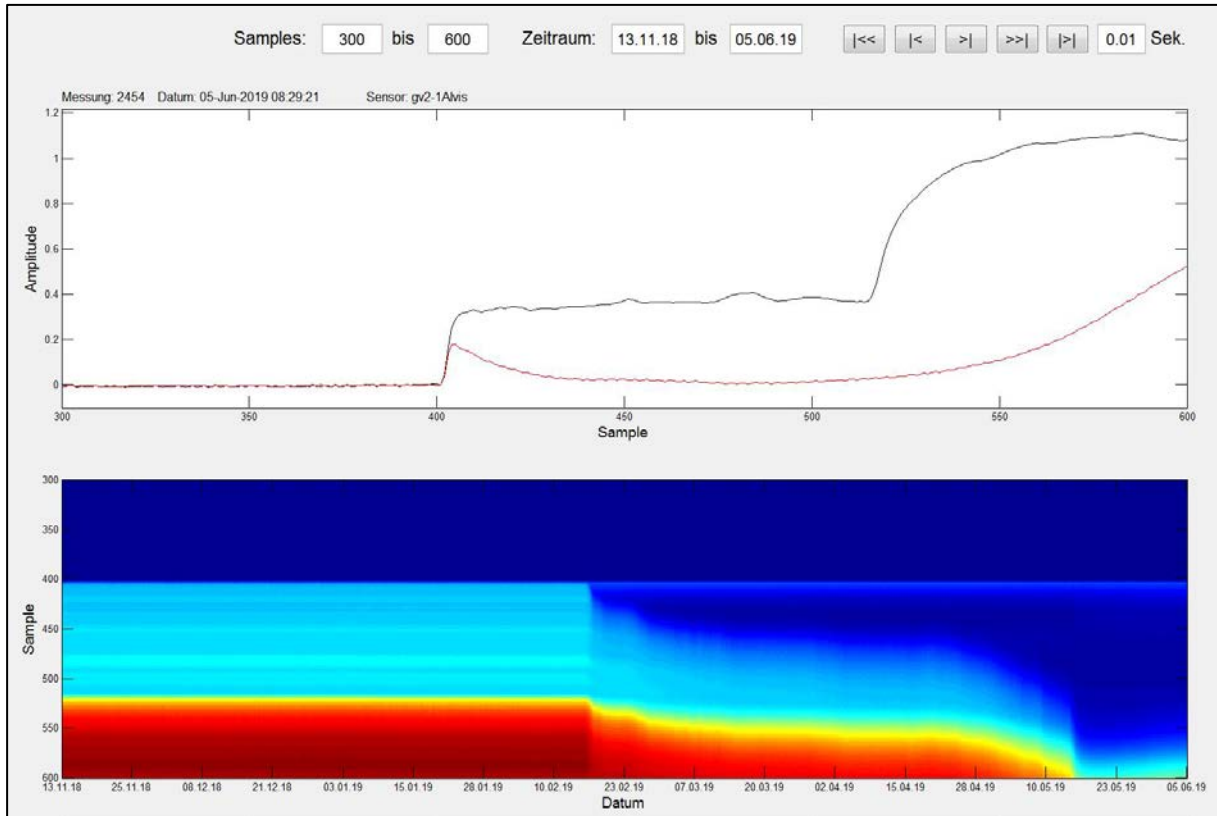


Abbildung 145: Messsignale am Sensor 1A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019

Die Reaktionen am Sensor 2A an der Firste sind in Abbildung 146 dargestellt. Es sind geringfügige Änderungen am rechten Ende des Sensors zu erkennen. Am 07.02.2019 waren diese Änderungen erstmals zu erkennen und haben bis Ende Februar 2019 ihr Maximum erreicht, welches bis zum 05.06.2019 unverändert geblieben ist.

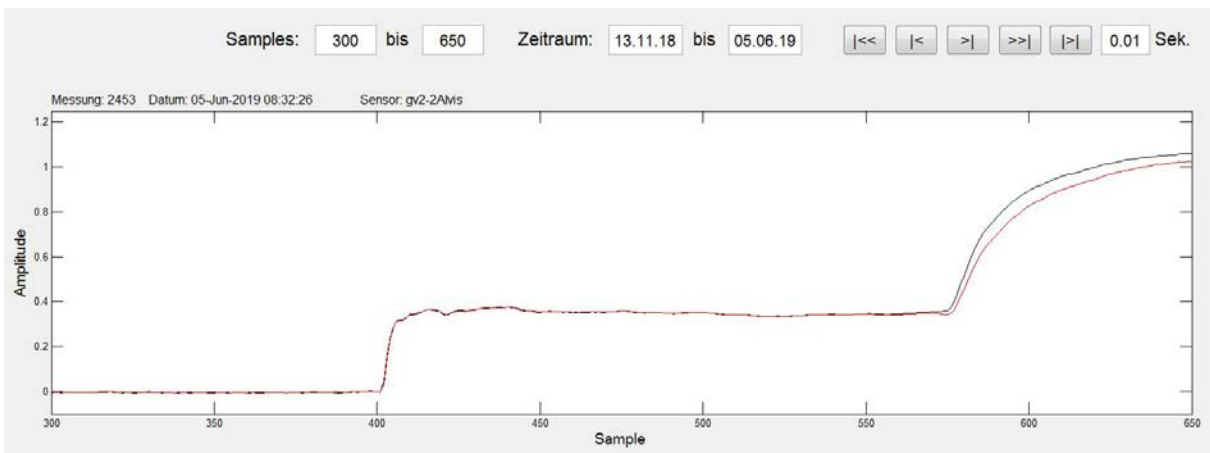


Abbildung 146: Messsignale am Sensor 2A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019

Am Sensor 3 (Abbildung 147) traten ab dem 01.12.2018 weitere Änderungen auf, die sich hauptsächlich am Ende des Sensors, also im unteren Bereich des rechten Stoßes bemerkbar machten. In der Zeit vom 30.12.2018 bis zum 09.01.2019 wurde eine Feuchtezunahme bis in eine Höhe von ca. 1 m über der Sohle detektiert. Die weitere Feuchteausbreitung entlang des Sensors bis zu dessen Anfang im oberen Bereich des rechten Stoßes fand am 07.02.2019 ihr Maximum. Zu diesem Zeitpunkt traten ebenfalls erste Änderungen am Ende des Sensors 2 auf, die mit der Überlappung von Sensor 2 und Sensor 3 in dem Bereich zu erklären sind. Nachfolgend lieferte der Sensor 3 bis zum 18.04.2019 gleichbleibende Signale. In der Zeit vom 18. bis 21.04.2019 ist ein Rückgang der Feuchtigkeit zu erkennen, der auf die Entlastung der Druckkammer am 15.04.2019 zurückzuführen ist. Ab dem 21.04.2019 detektierte der Sensor eine erneute Feuchtigkeitszunahme entsprechend der Druckerhöhung auf erneut 12,5 bar nach der Druckentlastung. Am 02.05.2019 wurde das vorläufige Maximum erreicht und die Feuchte verblieb einige Tage auf dem gleichen Niveau. Erst am 09.05.2019 war eine Zunahme der Feuchtigkeit im oberen Bereich des Sensors zu erkennen, die auf die Druckerhöhung auf 17,3 bar am 23.04.2019 zurückzuführen ist. Durch die Druckerhöhung am 14.05.2019 auf 28,4 bar wurde am 15.05.2019 eine sehr deutliche Feuchtigkeitszunahme festgestellt, die aber schon am 16.05.2019 ihr Maximum erreichte. Von da an detektierte der Sensor einen deutlichen Feuchtigkeitsrückgang im oberen Bereich, was das Ergebnis der Entlastung des Bauwerks am 15. bzw. 16.05.2019 ist. Ab dem 29.05.2019 nahm die Feuchtigkeit weiter ab.

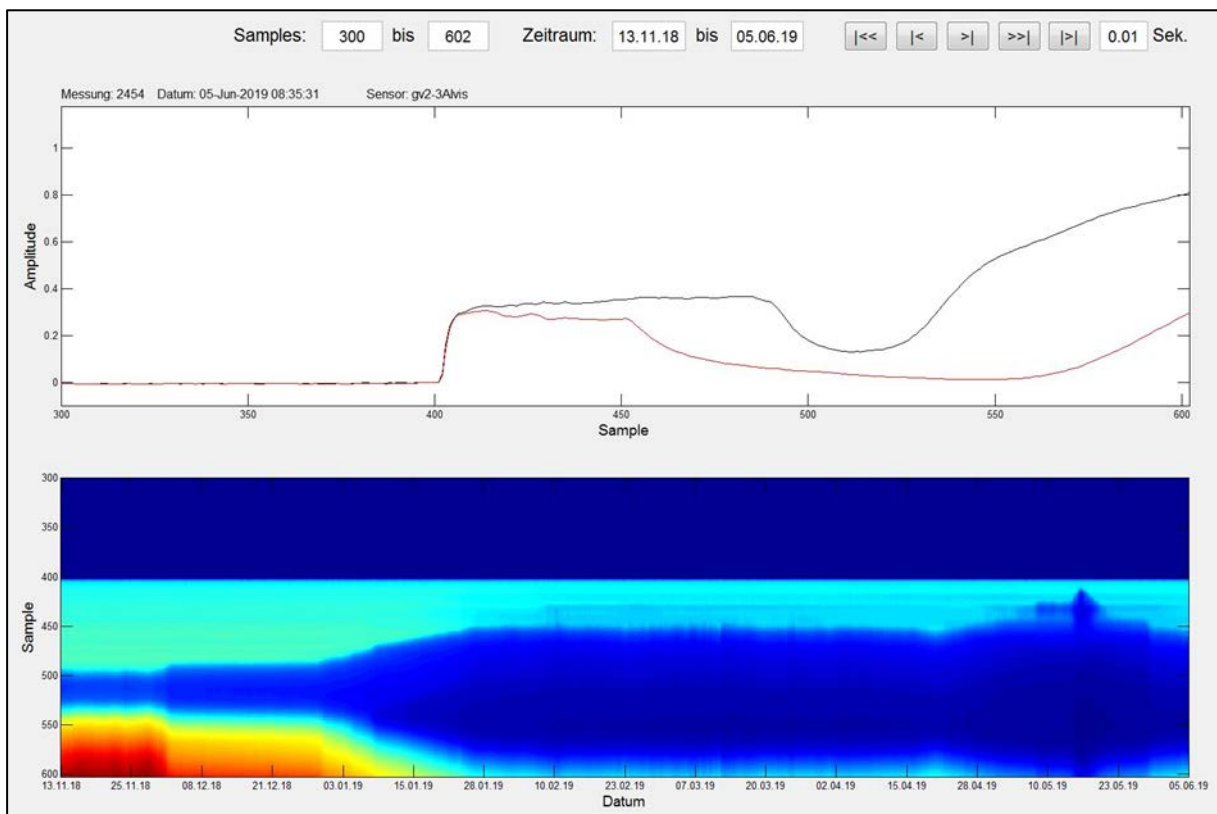


Abbildung 147: Messsignale am Sensor 3A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019

In Abbildung 148 sind die Feuchteänderungen am Sensor 4 an der Sohle dargestellt. Im unteren Bildbereich sind bis in den Februar 2019 mehrere blaue Linien zu sehen. Dies sind keine Feuchteänderungen, sondern es handelt sich hierbei um Auswirkungen der Relaisumschaltung der verschiedenen Messungen.

Erste Feuchteänderungen wurden am Sensor 4 ab dem 18.02.2019 auf der linken Seite der Sohle gemessen. Ab dem 21.02.2019 breitete sich die Feuchte auch am linken Stoß bis in eine Höhe von ca. 50 cm aus. Am 17.05.2019 erreichte die Feuchteänderung hier das Maximum. Dass die Feuchteänderungen am Sensor 4 im unteren Bereich des linken Stoßes erst kurze Zeit nach den Feuchteänderungen vom Sensor 1 in diesem Bereich auftraten, ist durch die Überlappung von Sensor 1 und Sensor 4 (siehe auch Abbildung 125) begründet - analog zu den Effekten an der Überlappung der Sensoren 2 und 3 sowie 3 und 4.

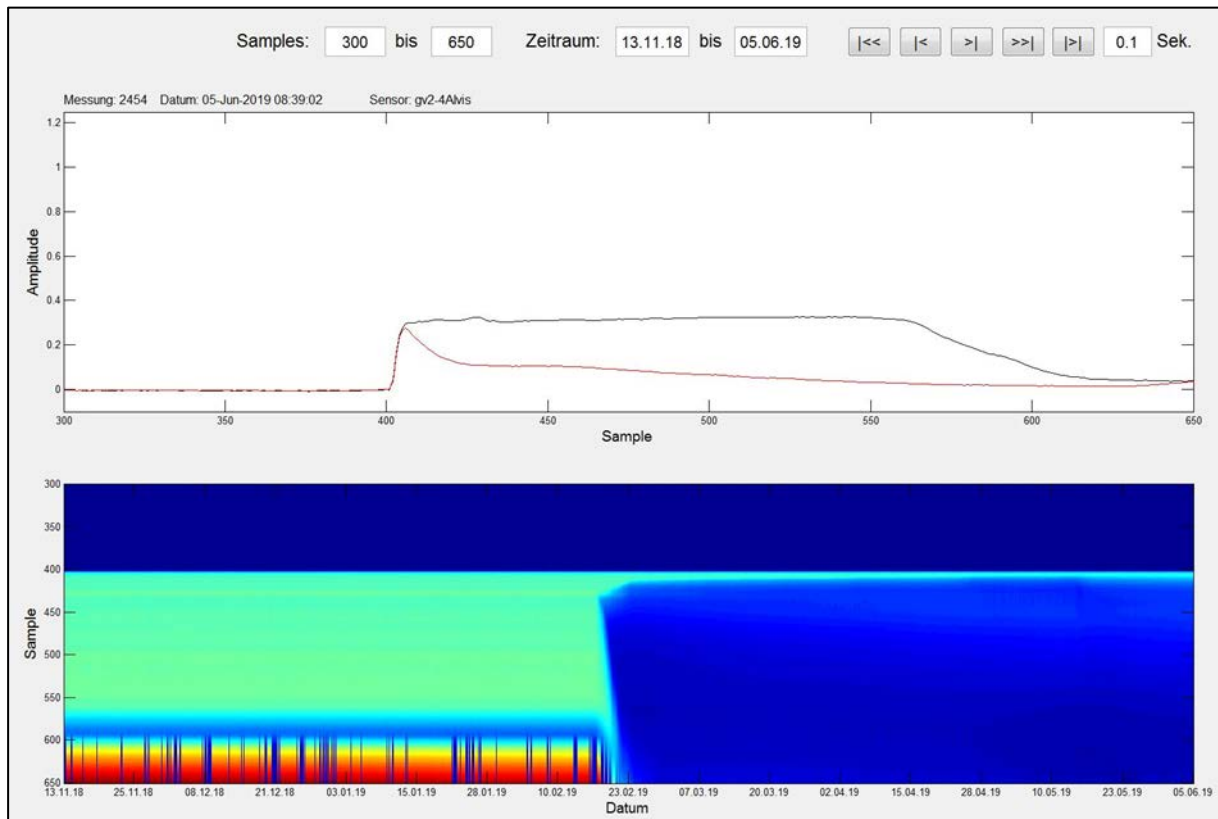


Abbildung 148: Messsignale am Sensor 4A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019

Zusammenfassung zu den Feuchtemessungen mit den TDR-Sensoren

Die eingebauten TDR-Sensoren haben über den gesamten Zeitraum von fast elf Jahren (vom Juli 2008 bis Juni 2019) verlässliche Daten geliefert.

Vom Beginn der Druckkammerbefüllung mit den darauffolgenden Druckbeaufschlagungen ab dem 08.11.2016 detektierten die Sensoren mehrere Feuchteänderungen in ihrem Bereich.

Erste Änderungen zeigten sich bereits am 17.11.2016 im Bereich des Sensors 3 am rechten unteren Stoß bei einem Druck von 0,8 bar in der Druckkammer. Auch die nächsten Druckänderungen bis zum 29.11.2016 wurden detektiert.

Zwischen Juli 2017 und dem 25.10.2018 sind trotz Druckerhöhung am 24.09.2018 auf 10 bar an den Sensoren keine Feuchteänderungen zu verzeichnen. Ab dem 26.10.2018 zeigte erneut der Sensor 3 am unteren rechten Stoß erste Feuchteänderungen und ab dem 28.10.2018 auch der Sensor 4 im gleichen Bereich. Erst nach der Druckerhöhung auf 12,6 bar im November 2018 reagierten auch der Sensor 1 ab dem 16.02.2019 und der Sensor 2 ab dem 07.02.2019.

Die Feuchteänderungen an den Sensoren konnten den verschiedenen Druckerhöhungen zugeordnet werden. Nachdem die Flüssigkeit am 15.05.2019 an der Luftseite des Bauwerks ausgetreten ist, wurde die Druckkammer entlastet. Von hier an ist an allen Sensoren ein Rückgang der Feuchtigkeit festzustellen.

Für zukünftige Streckenverschlüsse wird empfohlen, eine zweite TDR-Messebene im Kontaktbereich Bauwerk / Gebirge vorzusehen. Dadurch könnte frühzeitig ein Flüssigkeitsdurchtritt erkannt werden und über einen größeren räumlichen Abstand eine Aussage getroffen werden, wie schnell sich eventuell auftretende Flüssigkeiten im Kontaktbereich Bauwerk / Gebirge bewegen. Somit könnte – falls notwendig – ein Flüssigkeitsvorlauf erkannt werden und falls notwendig Maßnahmen ergriffen werden. Dies trägt zu höherer Sicherheit von Streckenverschlüssen bei. Die TDR-Messtechnik hat sich als robuste Technologie für ein Langzeitmonitoring bewährt.

Eine quantitative Bestimmung des Wassergehaltes ist prinzipiell über Modelle bzw. Materialgleichungen möglich. Genaue Ergebnisse liefern Materialkalibrierungen, mit denen die Abhängigkeit der komplexen Permittivitäten und der Reflexionsfaktoren für verschiedene Feuchten in Abhängigkeit von der Frequenz bestimmt wurden.

Im vorliegenden Fall wurden durch die Druckbeaufschlagungen mit Flüssigkeit Änderungen des Reflexionsfaktors von 0,3 bis auf ca. 0,0129 gemessen. Allerdings sind TDR-Kalibriermessungen bisher nur mit Bentonit als Dichtmaterial durchgeführt worden [AU29]. Für die quantitative Feuchtigkeitsbestimmung bei MgO-Beton gibt es bisher keine Erfahrungen und Methoden.

Temperaturentwicklung:

An den TDR-Kabelsensoren zur Messung von Feuchteänderungen waren auch acht Temperaturegeber angebracht, mit denen die Temperatur aufgezeichnet wurde. Der Mittelwert der Temperatur aus den 8 Temperaturegebern ist in Abbildung 149 zwischen dem 01.12.2008 und dem 30.05.2019 dargestellt. Die Unterschiede in der Temperatur zwischen den einzelnen Sensoren waren mit weniger als 0,3°C sehr gering. Bei Fertigstellung des Bauwerks im Jahr 2008 herrschte eine Temperatur von 29,3°C. Bis 2011 ist die Temperatur auf 27°C abgesunken. Seitdem war die Temperatur konstant bei 27°C ($\pm 0,2^\circ\text{C}$). Auch während der Druckbeaufschlagungen wurde keine Temperaturveränderung gemessen.

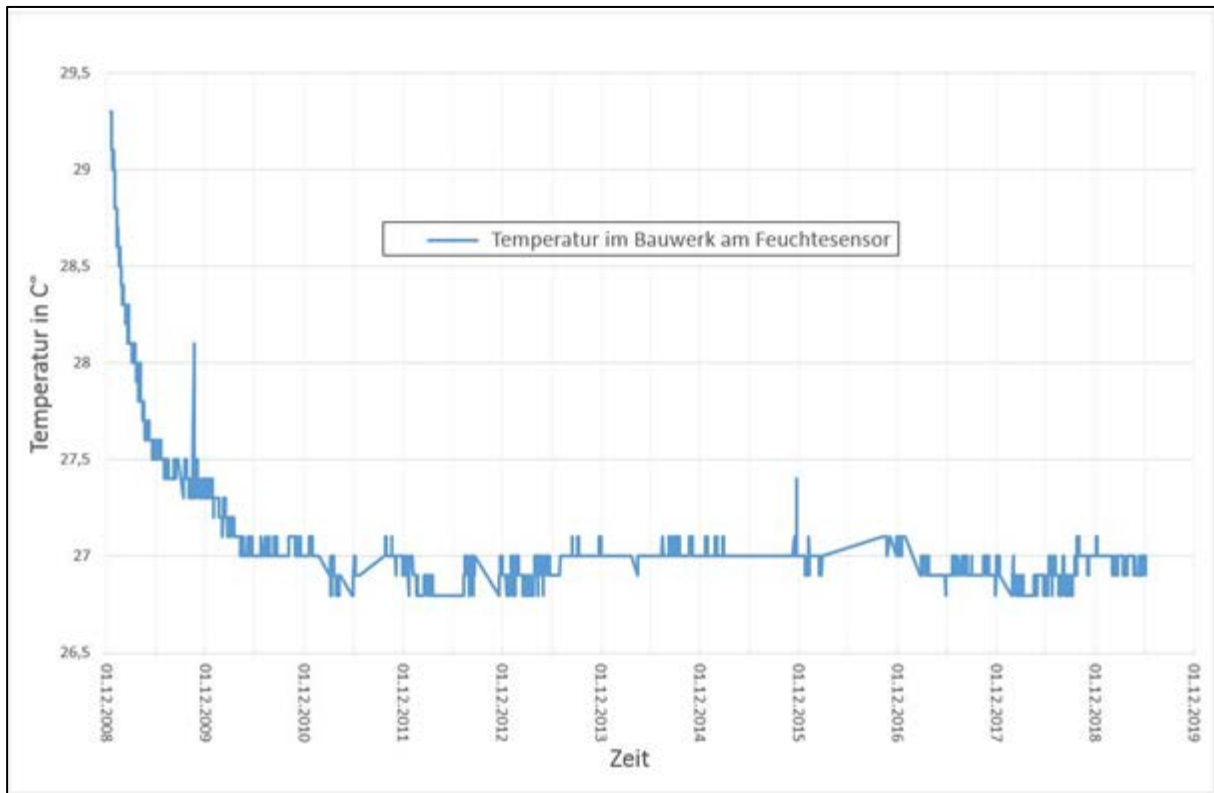


Abbildung 149: Entwicklung der Temperatur im Bereich der TDR-Sensoren im GV2

6 Planung des selektiven Rückbaus und Untersuchung der Kontaktzone

Vom Projektteam wurde es als sinnvoll angesehen, das mit Lösung beaufschlagte Bauwerk GV2 teilweise rückzubauen und zu untersuchen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens MgO-Seal sollte der Rückbau geplant werden. Der eigentliche Rückbau findet in einem weiteren Forschungsvorhaben statt. Ein Hauptziel des Rückbaus ist es, Probenmaterial aus MgO-Spritzbeton, der unter Einwirkung der angreifenden Lösung stand, zu gewinnen (und zu untersuchen). Es wird erwartet, dass im Ergebnis der vier Langzeitbohrlochversuche (B38, B39, B40, B41) aufgrund der langen Einwirkungszeit der Salzlösung unter einem hohen Flüssigkeitsdruck die Lösung zumindest einige Zentimeter in den MgO-Beton eingedrungen ist. Für die Bohrung B40 wurde eine theoretische radiale Eindringung von 8,1 cm der Lösung in den MgO-Beton berechnet. Die Einwirkungsbereiche sollen durch Überbohren der genannten Bohrungen gewonnen werden. Für die Bohrungen B38 und B39 (Bohrlochdurchmesser 42 mm) ist ein Durchmesser der Überbohrung von 100 mm vorgesehen. Bei den Bohrungen B40 und B41 (Bohrlochdurchmesser 70 mm) soll mit einem Durchmesser von 130 mm überbohrt werden (Tabelle 37). Auf größere Bohrdurchmesser wurde verzichtet, da der Bohrfortschritt hierbei zu gering wäre. Dies zeigte sich bereits bei der Überbohrung der Bohrung B34 mit einem Durchmesser von 300 mm im Rahmen des Vorhabens MgO-Seal.

Tabelle 37: geplante Überbohrungen an den Bohrungen B38, B39, B40 und B41

Bohrung	Durchmesser [mm]	Durchmesser der Überbohrung [mm]	Erfasster Ringraum beim Überbohren [mm]
B38	42	100	29
B39			
B40	70	130	30
B41			

Ein zweites Ziel des Rückbaus ist es, die Kontaktzone und den anliegenden MgO-Beton zu untersuchen – vor allem in einem Bereich, in dem ein Feuchtigkeitszutritt detektiert wurde. An den Feuchtesensoren wurde erstmals am rechten, unteren Bereich am 17.11.2016 Feuchtigkeit detektiert. Die Lösung trat ebenfalls am rechten Bereich der Sohle und am unteren Bereich des rechten Stoßes im Februar 2019 durch. Deshalb soll die rechte Seite des Bauwerks (betrachtet von der Luftseite) freigelegt werden. Danach sollen der MgO-Spritzbeton selbst und die Kontaktzone zum umliegenden Gebirge mit einem Teil der nun zugänglichen Injektionsebenen mit 2K-Injektionsbitumen und dem Epoxidharz Denepox nachuntersucht werden. Des Weiteren soll ein Teil der Mantelfläche freigelegt werden und die Kontaktfläche beprobt werden. Das beim Rückbau gewonnene Material soll hinsichtlich Phasenbestand, Festigkeit und hydraulischer Parameter untersucht werden.

Die Tiefe der seitlichen Auffahrung soll 5 m bis 6 m betragen, um den/die in den bisherigen Untersuchungen festgestellten hydraulisch durchlässigeren Bereich bzw. die Bereiche beim Widerlagerzahn (siehe Abschnitt 3.2.1) untersuchen zu können (Abbildung 150).

Bei dieser Tiefe der Auffahrung können vier Verpressebenen mit 2K-Injektionsbitumen (VE11, VE9, VE7, VE5) und drei Verpressebenen mit Denepox (VE10, VE8, VE9) miterfasst werden. Weiterhin werden mehr als 40 Betonierabschnittsgrenzen von der Mantelfläche freigelegt. Die Betonierabschnittsgrenzen sollen durch radial gestoßene Bohrungen detailliert untersucht werden. Bei einem derartigen Rückbau ist die Ergebnisdichte wesentlich höher als bei punktuellen Untersuchungen über Bohrungen von der Luftseite aus.

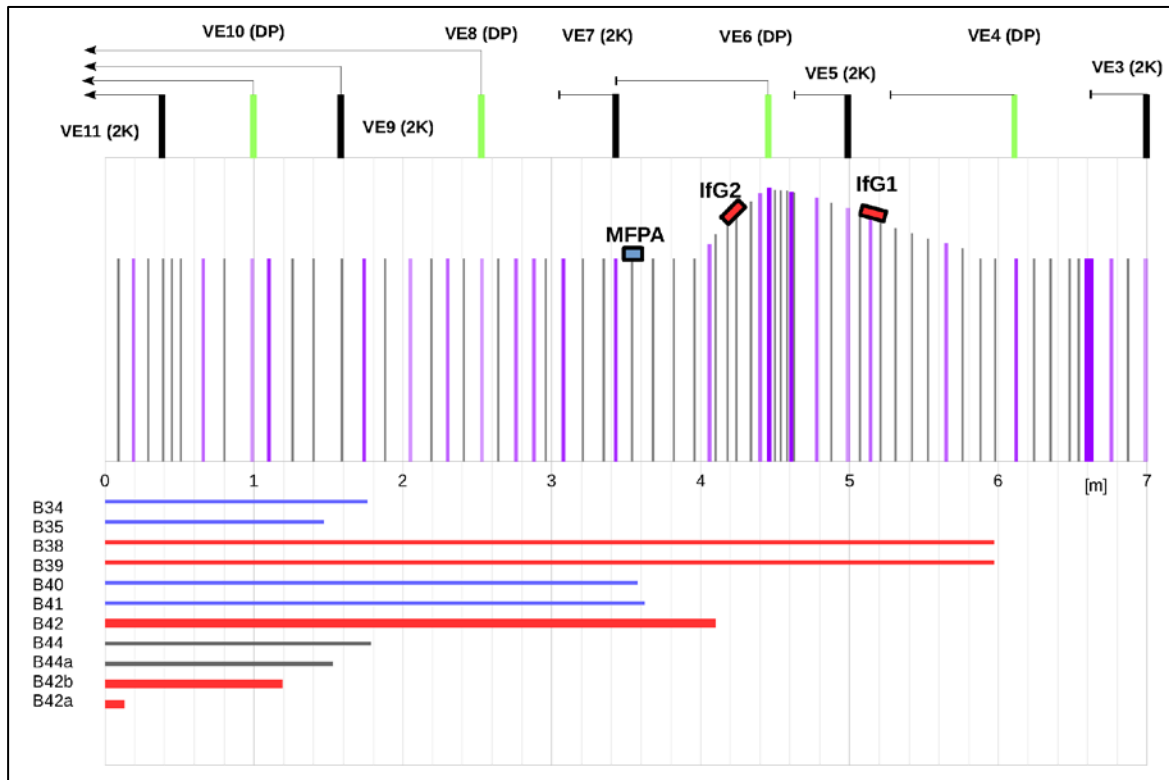


Abbildung 150: Längsschnitt des Bauwerkes GV2 (Luftseite links)

Der Rückbau wird in folgenden Arbeitsschritten durchgeführt:

1. Beräumung der Datenerfassungsanlagen und der Messtechnik an der Ortsbrust,
2. Verfüllen der zur Erfassung des luftseitigen Lösungsaustritts errichteten Auffanggrube (Arbeitssicherheit),
3. Kerngewinn durch Überbohren der Bohrungen B38, B39, B40 und B41,
4. Freischnitt der Mantelfläche (von der Luftseite gesehen rechts),
5. Begutachtung der freigelegten Kontur,
6. radiale Bohrungen parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen.

Die Auffahrung für den Freischnitt erfolgt, wie in Abbildung 151 dargestellt, durch ein seitlich schräges Anfahren, sodass der geforderte Querschnitt der Auffahrung erreicht wird, und die Bewetterung und Arbeitssicherheit gewährleistet sind. Für die Auffahrung wird ein Minibagger mit aufgesetzten Fräskopf verwendet. Die Gesamtbreite der Auffahrung muss mindestens 2,5 m betragen, damit der Minibagger und auch das Bohrgerät für die radialen Kernbohrungen ausreichend Platz haben und die Auffahrung begangen werden kann (Abbildung 152). Die maschinelle Auffahrung wird so ausgeführt, dass ca. 20 cm des an der Mantelfläche anliegenden Salzgesteins vorerst verbleiben. Dieser Steg wird dann manuell beraubt, um die Kontur durch den maschinellen Freischnitt nicht zu beschädigen.

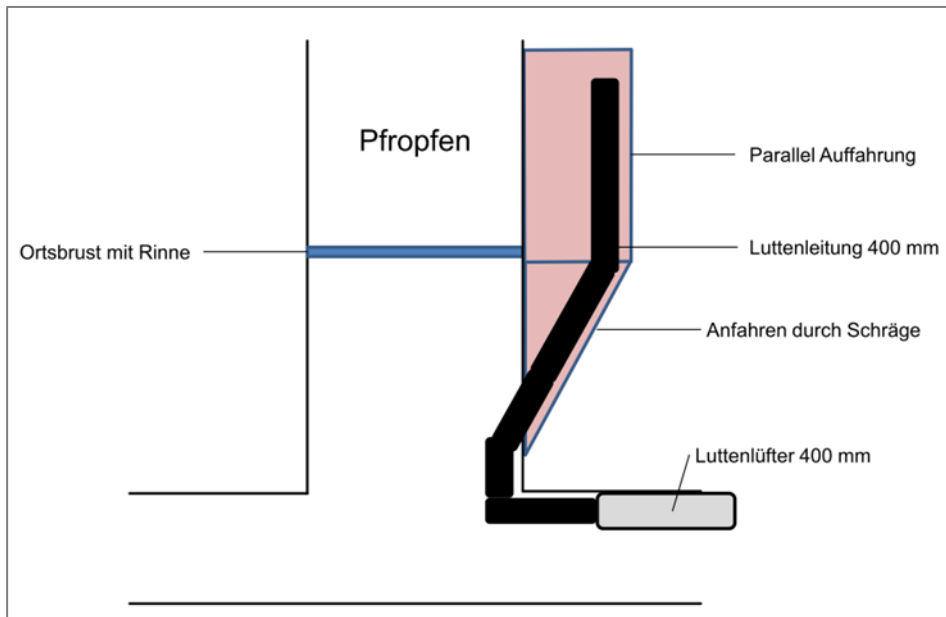


Abbildung 151: Schema zum Anfahren des Freischnittbereiches am GV2 (Draufsicht)

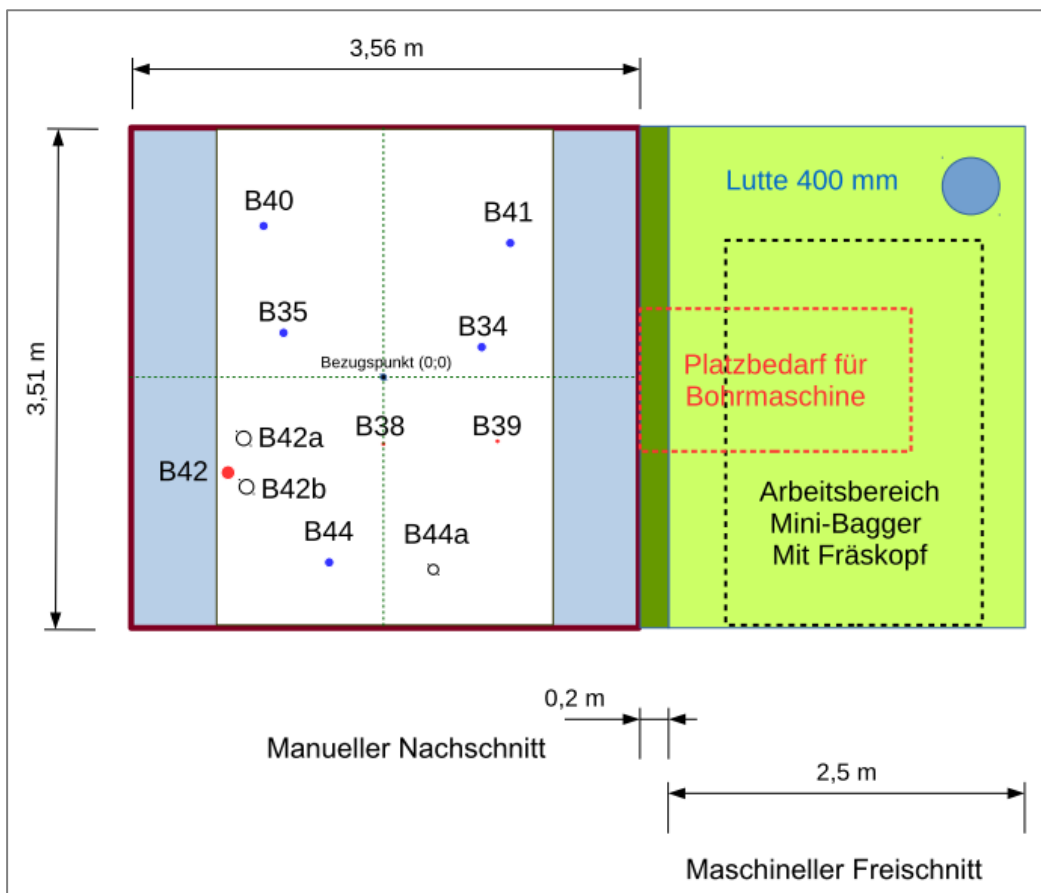


Abbildung 152: Abmessungen des Bereiches der Auffahrung für den Rückbau (Ansicht)

Es ist geplant, zwei Bohrungen (B45, B46) radial auszuführen. Diese sind in Abbildung 153 dargestellt. Der Ansatzpunkt der B45 befindet sich in 1,26 m Teufe ab Ortsbrüst, bei einer Höhe von 2,30 m. Der Ansatzpunkt der B46 liegt in 2,30 m Teufe und einer Höhe von 2,0 m. Beide Bohrungen sollen einen Durchmesser von 70 mm haben und um $11,5^\circ$ gegen die Sohle

- Zutrittsstellen von Lösung aus der Druckkammer. Da die eingesetzte Lösung mit Fluorescein getracert wurde, sollte ein Feuchtigkeitszutritt mit einer UV-Lampe festgestellt werden können. Die festgestellten Feuchtigkeitszutritte beim Rückbau sollen mit den Messergebnissen der TDR-Kabelsensoren (Abschnitt 5.4) abgeglichen werden.
- Veränderungen des MgO-Betons durch Lösungseinwirkung (Probengewinnung für Phasenanalyse).

Da die Mantelfläche nach dem Rückbau zugänglich ist, können folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

Untersuchung zur Verbandsfestigkeit des Spritzbetons:

Der Spritzbeton besteht aus einzelnen Spritzschichten. Die Kontaktflächen der Spritzschichten sind die nicht zu vermeidenden Betonierabschnittsgrenzen. MgO-Betonkerne mit Betonierabschnittsgrenzen können eine geringere Zugfestigkeit als MgO-Betonkerne aus dem Inneren einer Spritzschicht haben. Daraus folgt, dass das mechanische Verhalten des gesamten Spritzbetonkörpers von der Belastungsrichtung abhängig ist bzw. sein kann und sich von dem im Labor an kleinen Probekörpern (ohne oder mit nur einer Betonierabschnittsgrenze) ermittelten mechanischen Verhalten des MgO-Spritzbetons unterscheiden kann. Es wird vorgeschlagen, aus dem zugänglichen Bereich des MgO-Betonkörpers von der Mantelfläche aus Probekörper mit einer Kantenlänge von ca. 50 cm herauszuschneiden. Diese Probekörper können unter mehrachsiger Belastung im Labor untersucht werden.

Durchführung von Ultraschalluntersuchungen:

Im Juni und Oktober 2017 wurden durch die Bundesanstalt für Materialprüfung Ultraschalluntersuchungen an der Ortsbrust des GV1-Bauwerkes und des GV2-Bauwerkes durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass das Ultraschall-Echo-Verfahren bei dem MgO-Beton im GV1 (Ortbeton) und im GV2 (Spritzbeton) zur Erkennung von „Inhomogenitäten“ geeignet ist. Die Eindringtiefe der Ultraschallwellen mit dem Gerät A1040 Mira wurde mit mindestens 1 m (Spritzbeton) bzw. 2 m (Ortbeton) abgeschätzt (siehe Abschnitt 4.2.6). Am GV1 zeigte die erste Arbeitsfuge als deutliches Echo. Tieferliegende Grenzschichten wurden jedoch nicht erkannt. Am GV2-Bauwerk zeigten sich nur schwache, kleinräumige Echos bis in ca. 1 m Tiefe. Mit der Large Aperture UltraSound Apparatur (LAUS-Apparatur) wurde umfangreicher untersucht und dabei eine deutlich größere Eindringtiefe erreicht.

Der Aufbau eines zukünftigen QS-Systems basierend auf US-Echo scheint möglich. Zur Validierung sind dazu systematische Untersuchungen, auch an Modellkörpern im Labor, erforderlich. Die Untersuchungen sollen fortgesetzt werden.

Gefügeuntersuchungen:

Das Gefüge des MgO-Betons (Baustoffstruktur) kann anschaulich durch eine Mikro-Computertomographie (CT) beschrieben werden. Dabei kann auch der Porenraum des MgO-Baustoffs charakterisiert werden.

Erste Ergebnisse von Computertomographie (CT)-Untersuchungen [AU37] an Bohrkernen aus dem GV2 zeigen folgende Ergebnisse:

- Die Porenklassen im mm-Bereich sind gut darstellbar bzw. quantifizierbar.
- Eine Unterscheidung Korn / Bindemittel ist möglich.
- Die festgestellte laminierte evtl. eingeregeltere heterogene Verteilung der Korngrößen entspricht möglicherweise der Orientierung der Spritzschichten.

- Die Poren erscheinen blasenartig, anscheinend mit einem unvernetzten Porenraum, größere Poren (bis mm-Bereich) gruppieren sich um bzw. in der Nähe der Zuschlagkörner und die Mikroporen ($< 30 \mu\text{m}$) anscheinend im Bindemittel.

Die Untersuchungen sollen in einem Anschlussvorhaben fortgesetzt werden. Dabei soll die Auflösung erhöht werden, und die Ergebnisse der CT-Untersuchungen mit den Ergebnissen der Hg-Porosimetrie verglichen werden.

Eine Vermessung von „Rissen“ und eventuellen Strukturdefekten an den Betonierabschnittsgrenzen erscheint möglich.

Der Einfluss großer Poren auf den Flüssigkeitstransport soll mittels Positrons-Emissions-Tomographie (PET) aufgeklärt werden. Dieses Verfahren dient der direkten zerstörungsfreien Visualisierung von Flüssigkeitstransport in Festkörpern mit entsprechenden Wegsamkeiten (Poren, Mikrorisse). Als Durchströmungsmedium wird eine Salzlösung verwendet. Für die Visualisierung der Transportwege der Lösung muss diese mit einem Tracer (als Positronenstrahler) dotiert werden, damit die Lösungstransportwege orts aufgelöst detektiert werden können. Im vorliegenden Fall ist als Tracer das Isotop ^{22}Na denkbar, das aber eine relativ große Halbwertszeit von 2 Jahren und 220 Tagen hat. Derartige Untersuchungen sind vorgesehen. Sie sollen im Rahmen eines Anschlussvorhabens durchgeführt werden.

7 Vorschläge zur Verbesserung der Spritzbetonrezeptur

7.1 Einleitung und Zielstellung

Die Rezeptur des MgO-Spritzbetons im Bauwerk GV2 lautet wie folgt [AU31]:

MgO (G75 Styromag):	15,6 M-%
Zuschlag 0-8 mm:	72,9 M-%
R-Lösung:	11,5 M-%

Diese Rezeptur ist für die Bedingungen zukünftiger Streckenverschlussbauwerke im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit mit Kieserit und Tachyhydrit) entwickelt worden. Im Bergwerk Teutschenthal ist das komplette Bauwerk GV2 mit dieser MgO-Betonrezeptur errichtet worden (siehe Abschnitt 2.1). Die Rezeptur ist typisch für MgO-Baustoffe mit der 5-1-8-Bindemittelphase und enthält stöchiometrisch nicht umgesetztes MgO (Rezepturtyp D4).

Für eine Übertragung der Ergebnisse auf die Bedingung eines Endlagers sind folgende Anpassungen dieser MgO-Spritzbetonrezeptur erforderlich:

- Verwendung einer MgO-Sorte mit reproduzierbaren Abnahmebedingungen nach dem Zitronensäuretest (ZT-Wert in Sekunden als Maß der Reaktivität des MgO). Dies würde eine Alternative zur bisherigen Sorte G75 von Styromag ermöglichen.
- Ersatz der für die spezifischen Bedingungen der Grube Teutschenthal relevanten R-Lösung durch eine konzentrierte $MgCl_2$ -Lösung, die als technisches Handelsprodukt in reproduzierbarer Menge und Qualität beschafft werden kann.

Die Ergebnisse der Anpassung der Grundrezeptur des MgO-Spritzbetons sind im Abschnitt 7.4 beschrieben. Bei dieser Anpassung soll auch die „Klebrigkeit“ des MgO-Betons beim Spritzen verbessert werden. Weiterhin soll der Anteil des Rückpralls des Spritzbetons verringert werden.

Eine Möglichkeit, die „Klebrigkeit“ des Spritzbetons beim Spritzen zu verbessern, ist die Zugabe von besonders feinkörnigem Steinsalz ("Feinsalz") und/oder durch Fasern. Ziel ist es dabei, die Schichtmächtigkeit einer Spritzschicht zu erhöhen. Damit kann auch die Anzahl der Betonierabschnittsgrenzen verringert und die Homogenität des Baustoffs verbessert werden. Andererseits kann sich aber auch eventuell die sich entwickelnde Abbinde­temperatur erhöhen, da sich die Menge des MgO-Betons in einer abbindenden Spritzcharge erhöht.

Zur ersten Anpassung der Rezeptur wurden rheologische Untersuchungen und Untersuchungen der Frischbetonkonsistenz (Ausbreitmaß) durchgeführt.

In einer ersten Versuchsserie wurde der Einfluss der Zugabe von "Feinsalz" zur Bindemittelsuspension (ohne "Feinsalz" und 3 Zugabemengen "Feinsalz") untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Abschnitt 7.3 beschrieben. Zur Verbesserung der "Klebrigkeit" wurden erste Überlegungen angestellt, wie man dieses Phänomen quantitativ bewerten kann (siehe Abschnitt 7.2). Die "Klebrigkeit" wurde bisher in Handhabungsversuchen getestet. Bei den Handhabungsversuchen wurden im Labor die drei Betonkomponenten händisch vermengt und die Klebrigkeit qualitativ bewertet. Diese Handhabungsversuche wurden begleitend zu der Herstellung von Prüfkörpern zur Untersuchung des Einflusses der Zugabe einer ausgewählten Sorte Schmelzbasaltfasern zum Frischbetonmörtel auf die Festigkeit (Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, direkte Zugfestigkeit) der Prüfkörper durchgeführt. Je Rezeptur (ohne und mit Schmelzbasaltfasern) wurden 27 Probekörper hergestellt (3 Probealter, 3 Parallelversuche). Diese Untersuchungen sind in den Abschnitten 7.4 und 8 beschrieben.

Für diese Untersuchungen wurden folgende Komponenten eingesetzt:

MgO der Firma Lehmann & Voss L4/200

Der MgO-Gehalt im Produkt der Firma Lehmann & Voss L4/200 beträgt ca. 95 %. Das Material wird im Bergwerk Asse als Komponente des MgO-Baustoffs A1 eingesetzt. Deshalb liegen umfangreiche Erfahrungen zur Qualitätssicherung dieses Materials vor [AU31].

Die Reaktivität wird durch den Zitronensäuretest mit einem Wert $ZT = 150 - 300$ s (vorzugsweise $200 - 300$ s) spezifiziert. Da die Reaktivität des MgO möglicherweise auch die Konsistenz des Frischbetons beeinflusst, sollte untersucht werden, ob für die Spritzbetonrezeptur ein MgO mit einem geringeren ZT-Wert (= höhere Reaktivität) vorteilhaft ist. Dafür wurde ein reaktiveres MgO mit einem ZT-Wert von ca. 150 s verwendet.

MgCl₂-Lösung

Als Anmachlösung wird die MgCl₂-Lösung DEUSA S30 (ca. 5 molale MgCl₂-Konzentration) eingesetzt. Die Lösung muss NaCl-gesättigt sein. Dies wird durch Zugabe einer ausreichenden Menge von feinkörnigem Steinsalz erreicht.

Zuschlag

Der Sand-Kies-Zuschlag 0-8 mm der Firma Quick-Mix mit der in Abbildung 154 dargestellten Kornverteilung wird beibehalten.

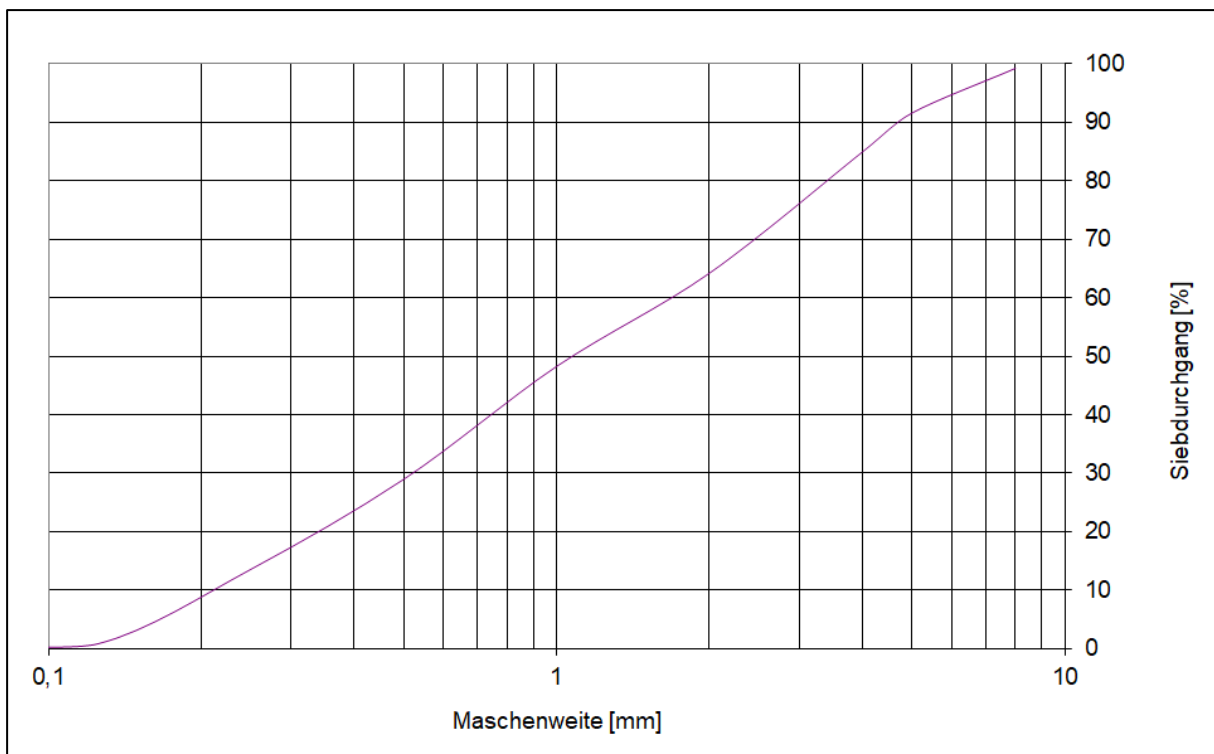


Abbildung 154: Korngrößenverteilung des Sand-Kies-Zuschlages 0-8 mm

Feinsalz

Für eine verbesserte Klebrigkeit wurde eine sehr feinkörnige Komponente (Mehlkorn) zugegeben. Das Feinsalz (FS) ist ein zum Baustoff passendes Produkt, da es aus Steinsalz mit einem NaCl-Gehalt von mind. 90 % - bei der GSES typischerweise mind. 98 % (Rest kann Anhydrit, Sylvit, Polyhalit, Kieserit sein) - besteht. Es hat einen Korngrößenbereich zwischen $d_5 = 0,03$ mm bis $d_{95} = 0,3$ mm. Die Korngröße d_{50} beträgt 0,14 mm. Der Eigenwassergehalt liegt bei $(0,18 \pm 0,08)$ % und kann im vorliegenden Fall vernachlässigt werden.

Fasern

Durch zugesetzte Fasern kann nicht nur die Frischbetonkonsistenz verbessert werden, sondern theoretisch auch die Frühfestigkeit (Zugfestigkeit im frühen Zustand) erhöht werden. Dadurch kann die Wahrscheinlichkeit für eine Rissbildung verringert werden.

Aufgrund der geforderten Langzeitbeständigkeit des MgO-Betons scheiden Stahlfasern, Textil- oder Kunststofffasern grundsätzlich aus. Deshalb verbleiben als Variante alkaliresistente Glasfasern oder Schmelzbasaltfasern, wobei auch bei deren Auswahl die Langzeitbeständigkeit betrachtet werden muss. Im vorliegenden Fall werden daher Schmelzbasaltfasern bevorzugt.

Die Schmelzbasaltfasern sind röntgenamorph, d.h. sind Silikatgläsern ähnlich. Eine langzeitliche Veränderung der Fasern durch Kristallisation mit einer eventuellen Volumenabnahme ist nicht ausgeschlossen, wird aber als nicht relevant angesehen, da die Faserfunktion nur in der Frühphase zur Verbesserung der Verarbeitungsfähigkeit genutzt wird.

Es wurden drei Schmelzbasaltfasern der Firma Deutsche Basalt Faser GmbH (Sangerhausen) beschafft und untersucht: UCF 20 mm, Turbobuild dispergate 12 mm und Turbobuild integral 24 mm. Als Zugabemenge wurden 3 bis 5 kg Fasern je m³ Beton ausgewählt.

Zwei Sorten („Turbobuild integral 24 mm“ und „Turbobuild dispergate 12 mm“) können für den Spritzbeton nicht verwendet werden, weil sie mit einem sich bei 250 ... 400 °C zersetzenden Beschichtungs- und Verklebematerial behandelt sind. Ansonsten entspricht die Zusammensetzung der Fasern der Zusammensetzung eines Basaltes.

Für die weiteren Untersuchungen wird deshalb nur die Sorte „UCF 20 mm“ verwendet.

7.2 Bewertung der Klebrigkeit

Die „Klebrigkeit“ ist im Sinne eines messbaren Parameters nicht eindeutig definiert. Beim Spritzbeton wird damit ein Komplex von Eigenschaften gemeint. Um die „Klebrigkeit“ zu messen, können bei einem Spritzbeton folgende Parameter gemessen werden, die indirekt bzw. auch die Klebrigkeit charakterisieren:

- Kohäsion im Frischmörtel,
- Viskosität im Frischmörtel,
- Scherwiderstand im Frischmörtel,
- Adhäsion zwischen erstarrtem Spritzbeton und frischem Spritzbeton.

Aufgrund der bisherigen methodischen Erfahrungen wurde den zeitabhängigen Viskositätsmessungen der Vorrang gegeben (siehe Abschnitt 7.3). Allerdings sind Viskositätsmessungen nicht für Mörtel, sondern nur für die Bindemittelsuspension (mit und ohne Füllstoffe) geeignet.

Der Einsatz einer Laborflügelsonde zur Bestimmung der Kohäsion und eines Schergerätes zur Bestimmung von Scherkräften für den Mörtel (Bindemittelsuspension mit Zuschlag) wurde zurückgestellt. Aufgrund der hohen Steifigkeit der GV2-Rezeptur scheiterte bei früheren Untersuchungen der Versuch, die Scherfestigkeit der Mischung mit einer Laborflügelsonde zu messen.

Ein praktikabler Ansatz für die Bewertung der Konsistenz bzw. „Klebrigkeit“ des Spritzbetonmörtels ist dessen Frühfestigkeit. Für frischen Spritzbeton wird bei einem Alter von 2 Minuten eine Festigkeit des Mörtels von 0,1 bis 0,2 MPa empfohlen. Üblich ist die Prüfung der Frühfestigkeit (als Druckfestigkeit) mit einem Penetrometer. Der Durchmesser der Penetrometernadel soll 3 mm betragen [AU38],[AU39],[AU40].

Zusätzlich dazu bietet das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 einen ersten Anhaltspunkt, um die Klebrigkeit zu beurteilen. Ist das Ausbreitmaß gering, so kann geschlossen werden, dass die Klebrigkeit hoch ist (indirekte Schlussfolgerung). Für Spritzbeton soll die Konsistenz des Frischbetonmörtels steif (F1) sein, was einem Ausbreitmaß von ≤ 340 mm entspricht. Erfahrungswerte für geeignete Ausbreitmaße liegen bei 200 ... 300 mm.

Für steifere Betone wird das Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4 als indirekte Größe zur Einschätzung der Klebrigkeit empfohlen. Aufgrund fehlender Erfahrungen kann hier kein Richtwert angegeben werden.

7.3 Bestimmung des zeitabhängigen rheologischen Verhaltens der Bindemittelsuspension

Ein bewährtes Verfahren, um die Bindemittelansatz zu verbessern, sind Messungen der zeitlichen Entwicklung der Viskosität von verschiedenen Bindemittelsuspensionen. Diese Messungen geben Aufschluss über die zu erwartende Konsistenz und das Erstarrungsverhalten der Bindemittelsuspension.

7.3.1 Vorbetrachtung zu den rheologischen Untersuchungen

Die Art der Probenherstellung und das Messregime sollten den Zustand der Bindemittelsuspension während des Spritzvorgangs gut nachbilden. Zur Beurteilung der Klebrigkeit wurden die dynamische Viskosität verschiedener Bindemittelmischungen im Rheometer bestimmt. Nachfolgend wird dazu die Herstellung der Proben beschrieben.

1. Phase: Mischprozess

Beim Trockenspritzverfahren, bei dem die Flüssigkeit erst an der Düse zugeführt wird, wird das Trockengemisch und die Flüssigkeit in Sekundenbruchteilen miteinander vermengt, bevor das Gemisch mit hoher kinetischer Energie an den Stoß prallt.

Im Labor werden MgO-Pulver und Salzlösung mit einem Labormischer oder einem Spatel vermengt. Die Mischzeit soll so kurz wie möglich gehalten werden, um die Ergebnisse auf den Mischvorgang in der Praxis übertragen zu können. Direkt nach Ende des Mischprozesses wird mit einem Spatel ein Teil der Probe entnommen und in das vorbereitete Messsystem (Scherrheometer MARS II) eingebaut. Bei der Entnahme der Probe und dem Einbau wird die Bindemittelprobe unweigerlich nochmals geschert. Beim Spritzvorgang gibt es dagegen keine vergleichbare Nachscherung des Gemisches.

Es wurden nur kleine Mengen des Bindemittels von <100 ml angemischt. Die Masse an Lösung wurde in einer Messreihe konstant gehalten. Das MgO-Pulver wurde in die Salzlösung hineingerührt. Die Mischzeit einschließlich der Zugabezeit wurde so kurz wie möglich gehalten. Direkt im Anschluss wurde die Probe in den Messspalt (siehe Nr. 2) eingebaut. Die Abbildung 155 zeigt das verwendete Rheometer und in Abbildung 156 ist die Messanordnung mit dem Messspalt zu sehen.



Abbildung 155: Dynamisches Scherrheometer Haake MARS I

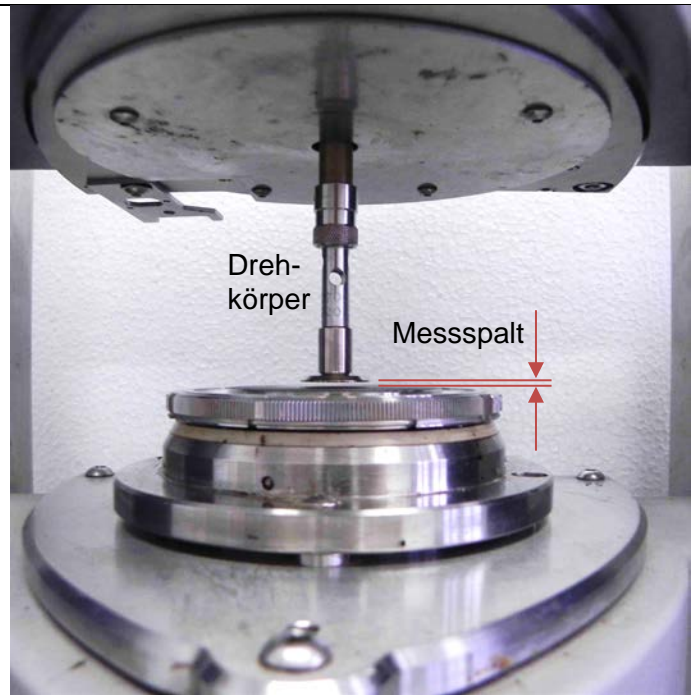


Abbildung 156: Messgeometrie Platte-Platte, mit Drehkörper PP20TIPR und Messspalt

2. Phase: Abbindephase

Die Viskosität der Bindemittelproben wird mit einem dynamischen Scherrheometer MARS II gemessen. Für relativ steife Suspensionen eignet sich vor allem das Platte-Platte-Messsystem mit profilierter Plattenoberfläche, wie in Abbildung 156 gezeigt. Die Messprobe befindet sich im Spalt zwischen den beiden Platten. Die obere, drehbar gelagerte Platte ist die Unterseite des Drehkörpers, über die die Messprobe unter definierten Bedingungen beansprucht wird. Der verwendete Drehkörper hat einen Durchmesser von 20 mm. Bei Messung im CS-Modus (*CS = controlled stress*) wird über den Drehkörper ein konstantes Drehmoment auf die Messprobe aufgebracht und dadurch eine Schubspannung hervorgerufen. Die daraus resultierende Bewegung (Deformation) wird gemessen. Im CR-Modus (*CR = controlled rate*) ist dieses Prinzip umgekehrt. Hier wird die Bewegung des Drehkörpers vorgegeben. Das dazu erforderliche Drehmoment wird gemessen. [AU36].

Nachdem bei einem Spritzvorgang im Feld das Gemisch auf den Untergrund aufgeprallt ist und „klebt“, befindet es sich nahezu in Ruhe. Dennoch wirken verschiedene Kräfte auf die Betonmatrix. Zum einen wirkt die Schwerkraft der Spritzbetonschicht und zum anderen wirken Kräfte in Spritzrichtung auf die Betonmatrix, wenn beim weiteren Spritzen der Bauwerks Oberfläche das nächste Spritzgut auf die soeben gespritzte Schicht prallt. Die Krafteinwirkung darf nicht zum „Fließen“ des Baustoffs führen.

Um die Viskosität im Ruhezustand zu erfassen, sollte die Anregung der Probe beim Messen so gering sein, dass die Struktur der abbindenden Bindemittelsuspension während des Messvorgangs nicht zerstört wird. Dies wird durch eine Oszillationsmessung erreicht, bei der die Probe über die obere Platte durch Schwingungen angeregt wird. Der Drehwinkel der oberen Platte bzw. die aufgebrachte Schubspannung dürfen dabei einen Grenzwert nicht überschreiten, da sonst die Struktur der abbindenden Bindemittelsuspension zerstört wird.

Auf Basis eines früheren Messregimes an Magnesiabindemittel wurde die Deformation bei den Messungen konstant gehalten. Die Deformation γ ist beschrieben als dimensionsloser Verhältnisswert von Auslenkung s zum Plattenabstand h [AU35]:

$$\gamma = \frac{s}{h} \quad (16)$$

γ	-	Deformation	[-]
s	-	Auslenkung	[mm]
h	-	Plattenabstand	[mm]

Durch die profilierte Plattenoberfläche der oberen sowie der unteren Platte ist der Messspalt tatsächlich etwas größer als der vom Rheometer für die Berechnung der rheologischen Größen verwendete Plattenabstand h . Dadurch werden etwas zu hohe Werte für die Deformation bestimmt und etwas zu niedrige Werte für die Viskosität. [AU36] Dies ist ein systematischer Fehler. Er blieb bei den Messungen unberücksichtigt.

Im Oszillationsmodus erfolgt die Anregung in Form einer Sinusschwingung. [AU35]:

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (17)$$

γ	-	Deformation	[-]
γ_A	-	Deformationsamplitude	[-]
ω	-	Kreisfrequenz	[s ⁻¹]
t	-	Zeit	[s]

Abbildung 157 veranschaulicht das Prinzip der Messprobenanregung im Oszillationsmodus. Dargestellt ist die Seitenansicht des Messspaltes. Es gilt:

$$\gamma_A = \frac{s}{h} = \frac{R \cdot \varphi_A}{h} \quad (18)$$

R	-	Plattenradius	[mm]
φ_A	-	Amplitude des Auslenkwinkels	[rad]

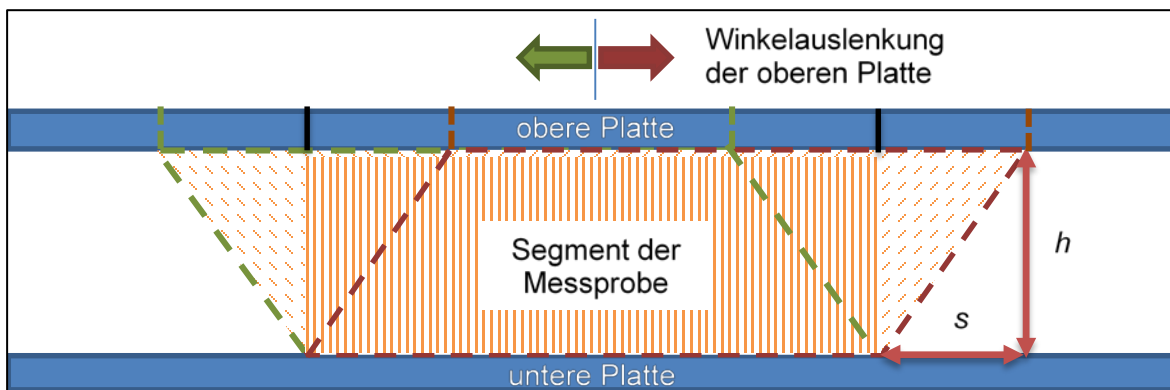


Abbildung 157: Prinzip der Deformation einer Probe im Messspalt am Plattenrand

Die Deformation γ ist bedingt durch die Messgeometrie „Platte-Platte“ über den Radius der oberen Platte nicht konstant, sondern unter der Plattenmitte gleich null und am Plattenrand maximal. Die vom Rheometer ausgegebenen Messwerte beziehen sich auf dem Plattenrand. Neben der Deformationsamplitude γ_A wurde die Frequenz f der aufgebrachtten Schwingung mit $f = 10 \text{ s}^{-1}$ vorgegeben. Das entspricht einer Kreisfrequenz ω von 62,82 rad/s. Das erforderliche Drehmoment, das zum Aufbringen der Deformation benötigt wird, wird vom Rheometer über die Messdauer gemessen. Aus dem Drehmoment und der Geometrie der Probe wird die

Schubspannung berechnet. Die Schubspannungsantwort des Rheometers ist um den Phasenverschiebungswinkel δ der Deformationsanregung verschoben [AU35]:

$$\tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (19)$$

τ - Schubspannung [Pa]
 τ_A - Schubspannungsamplitude [Pa]
 δ - Phasenverschiebungswinkel [°]

Der Phasenverschiebungswinkel δ kennzeichnet die Größe der viskosen Eigenschaft der Probe. Ist die Schubspannungskurve ohne Verschiebung zu der aufgetragenen Deformations-schwingung, $\delta = 0^\circ$, dann reagiert die Messprobe rein elastisch auf die Anregung. Bei rein viskosem Verhalten ist die Schubspannungskurve um 90° verschoben, $\delta = 90^\circ$. Der Übergangspunkt zwischen flüssigen und festen Zustand einer Probe liegt bei $\delta = 45^\circ$ [AU35].

Im Oszillationsmodus wird die Viskosität als komplexe Größe bestimmt [AU35]:

$$\eta^* = \frac{\tau(t)}{\gamma(t) \cdot \omega} \quad (20)$$

η^* - Viskosität [Pa s]

Die Messdauer der Proben wurde mit 3 Stunden festgelegt. Vor und während der gesamten Messzeit wurde die untere Platte bei 28°C temperiert (eigener Standard für Untertagebedingungen) gehalten. Die Temperatur entspricht den zu erwartenden Gleichgewichtsbedingungen.

7.3.2 Erste Versuchsreihe – Messungen bei unterschiedlichem Feinsalzgehalt

Die erste Versuchsreihe wurde zwischen Januar und März 2018 durchgeführt. Verwendet wurde MgO der Sorte „F4 200“ von *Lehmann & Voss* mit 2 verschiedenen Reaktivitäten:

- Charge 205348 – normale Reaktivität (Zitronensäuretest-Wert: 210 ± 10 s)
- Charge 201888 – höhere Reaktivität (Zitronensäuretest-Wert: 135 ± 10 s)

In Tabelle 38 sind Reaktivitäten (Zitronensäuretest-Werte) verschiedener verwendeter MgO-Sorten und Chargen zusammengestellt. Des Weiteren ist die spezifische Oberfläche (BET) des MgO-Pulvers angegeben.

Tabelle 38: verwendete MgO-Chargen

Lieferant	Charge	BET-Oberfläche [m ² /g]	Zitronensäuretest [s]
Lehmann & Voss	F4-201888	10,8	135 ± 10
	F4-205348	8,1	210 ± 10
	F4-181215	11,3	120 ± 5
	F4-194272	10,1	205 ± 5
Styromag	G75-7.5.18	31,1	115 ± 5
	G80-8.5.18	24,0	160 ± 10

In der ersten Versuchsserie sollte das gleiche Masseverhältnis MgO / Lösung mit den MgO-Produkten von *Lehmann & Voss* getestet werden, wie es im Mittel beim Spritzbetonbauwerk GV2 angewendet wurde. Dort wurde auf 1 kg Lösung 1,36 kg MgO „G75“ eingesetzt. Das MgO

„G75“ von *Styromag* hatte einen MgO-Gehalt von ca. 75 %, wodurch das Masseverhältnis reines MgO / Lösung bei 1,02 lag.

Das MgO „F4 200“ von *Lehmann & Voss* hat einen MgO-Gehalt von ca. 95 %. Wird das Masseverhältnis reines MgO / Lösung beibehalten, wird weniger MgO „F4 200“ im Verhältnis zur Lösung benötigt. Auf 1 kg Lösung kommen mit dem MgO-Produkt von *Lehmann & Voss* lediglich $1,36 \times 0,95 / 0,75 = 1,07$ kg MgO-Pulver. Da somit in Summe weniger feines Material in der Bindemittelsuspension vorhanden ist, soll geprüft werden, ob der fehlende Pulveranteil durch Feinsalz (FS) ersetzt werden kann. Ziel war, dass die Viskosität der Bindemittelsuspension mit Feinsalz (und F4 200 MgO) ähnlich schnell ansteigt wie die Bindemittelsuspension der GV2-Rezetur (mit MgO „G75“ der Fa. *Styromag*).

In der ersten Versuchsserie sollte der Anteil an Feinsalz variiert werden. Das Verhältnis MgO-Produkt/ Lösung wurde auf 1,00 (statt 1,07) gesetzt. Folgende Feinsalz-Anteile (bezogen auf die Gesamtmasse des Mischansatzes) wurden getestet: 0 % / 8,5 % / 15,6 % / 27,0 %. Bei einem Feinsalz-Anteil von 15,6 % liegt das gleiche Masseverhältnis Körnung (MgO-Produkt + Feinsalz) / Lösung = 1,37 vor wie bei der Rezeptur des MgO-Betons beim GV2-Bauwerk.

Der Versuchsprogramm der ersten Versuchsreihe ist in Tabelle 39 dargestellt.

Tabelle 39: MgO und Feinsalz bei erster Versuchsreihe zum rheologischen Verhalten von verschiedenen MgO-Bindemittelsuspensionen

MgO-Lieferant	MgO-Produkt	MgO-Charge	Feinsalz (FS) – Anteil an Gesamtmasse	Anzahl Messungen
L&V – <i>Lehmann & Voss</i>	F4-200	205348 – normale Reaktivität (ZT = 210 ± 10 s)	ohne FS	2
			8,5 %	2
			15,6 %	2
			27,0 %	2
		201888 – höhere Reaktivität (ZT = 135 ± 10 s)	ohne FS	2
			8,5 %	2
			15,6 %	2
			27,0 %	2

Im Rheometer wurde als Spaltweite 1,000 mm eingestellt. Im Gegensatz zu später durchgeführten Messungen erfolgten die Messungen bei einer höheren Deformationsanregung von 0,5 %, $\gamma_A = 0,005$. Diese Deformationsanregung wurde schon bei früheren Messungen an Magnesiabindemittelsuspensionen verwendet.

Für die Probenherstellung wurde zunächst das MgO-Pulver in der Lösung untergemischt. In einem zweiten Schritt wurde das Feinsalz zugegeben und untergemischt. Der gesamte Mischprozess, wie er in Tabelle 40 dargestellt ist, dauerte wesentlich länger als bei späteren Versuchsreihen.

Tabelle 40: erste Versuchsreihe – Ablauf der Probenherstellung und des Probeneinbaus

Schritt	Zeitpunkt nach Mischbeginn [min]		Bemerkungen
	ohne Feinsalz	mit Feinsalz	
Zugabe MgO zur Lösung und Mischbeginn	0,0	0,0	Lösung: 50 g MgO: 50 g Mit Labormischer bei $n = 100 \text{ min}^{-1}$
Zugabe Feinsalz	-	3,5	je nach Anteil
Mischen – Ende	4,0	ca. 5,5	
Entnahme Probemenge und Einbau ins Rheometer	im Anschluss		Masse nicht eingewogen
Anfahren des Messspaltes – Beginn	ca. 7,0 – 9,0		
Anpassung der Probe bei eingestellter Messgeometrie	im Anschluss		
Start der Messung im Rheometer einschl. 2-min Ruhezeit direkt vor Messung	10 – 13		Temperierhaube aufgesetzt; $\gamma_A = 0,005$ Start der Messung

In Abbildung 158 ist der zeitliche Verlauf der komplexen Viskosität bei den verschiedenen Feinsalzanteilen und den beiden MgO-Produkten von *Lehmann & Voss* dargestellt. Die Viskositätsverläufe der ersten Messreihe haben in Abbildung 158 grüne und braune Farben. Außerdem sind die Viskositätsverläufe von zwei Bindemittelsuspensionen mit MgO-Produkten von *STYROMAG*, mit der Bezeichnung „5-1-8_SB_G75-36-M04“ und „...-M05“, in schwarz dargestellt. Diese wurden 2008 an einer Bindemittelsuspension mit einer MgO-Charge, die beim GV2 eingesetzt wurde, gemessen. Zudem war das Messregime und die Deformationsvorgabe bei den Rheometerversuchen im Jahr 2008 und im Jahr 2018 gleich. Allerdings wurden die Messungen mit einem Rheometer RS600 durchgeführt. Die Bindemittelsuspension wurde mit R-Lösung (2008) hergestellt, die der S30-Lösung (2018) ähnlich ist. Das Masse-Verhältnis MgO-Produkt G75 / Lösung betrug 1,27.

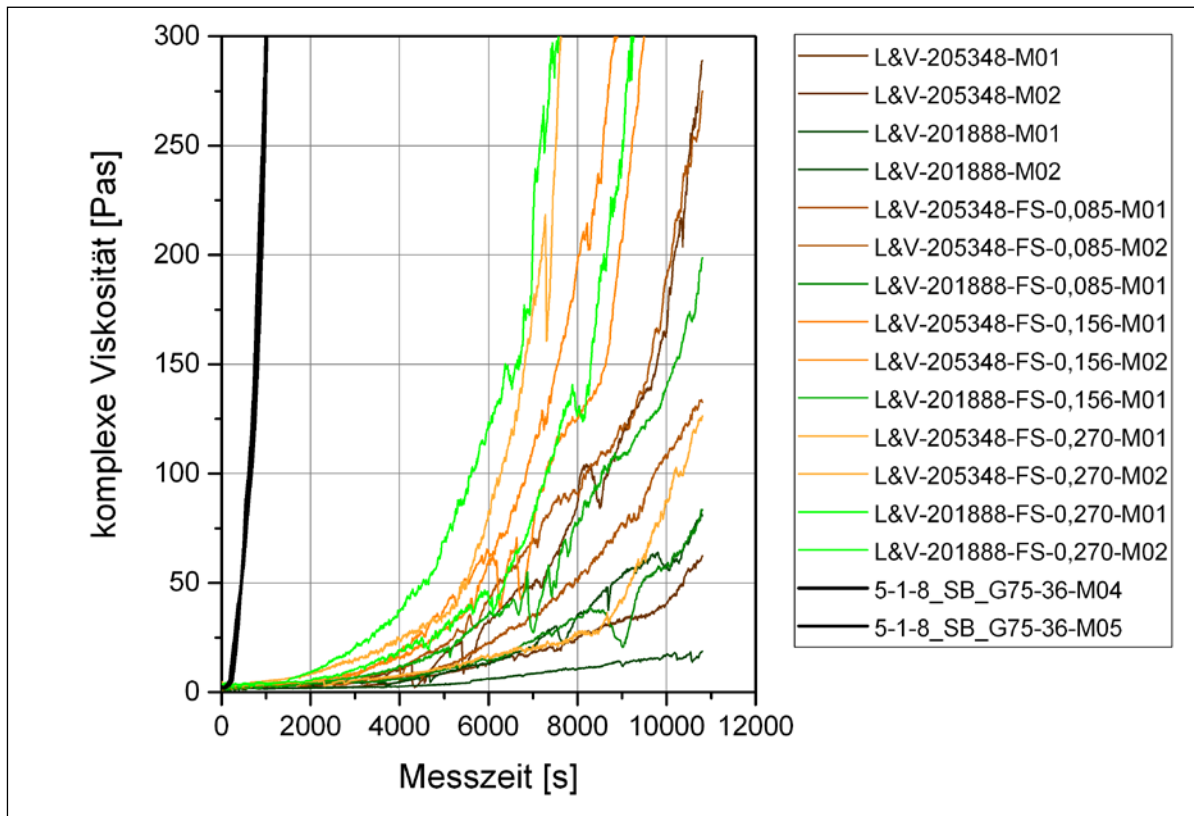


Abbildung 158: Viskositätsmessungen – 1. Versuchsreihe Viskositätsverläufe

Die einzelnen Messreihen in Abbildung 158 sind wie folgt gekennzeichnet:

L&V	-	MgO-Produkt von <i>Lehmann & Voss</i>
205348	-	MgO-Charge mit normaler Reaktivität (Zitronensäuretest-Wert von 210 ± 10 s)
201888	-	MgO-Charge mit erhöhter Reaktivität (Zitronensäuretest-Wert von 135 ± 10 s)
FS	-	Feinsalz
0,085...0,270	-	Masse-Anteil des Feinsalzes an der Gesamtmasse
M..	-	Lfd. Nr. der Messung

Im Ergebnis zeigt sich, dass trotz Feinsalz-Zugabe keine Mischung eine ähnlich hohe Viskositätszunahme und damit ein ähnlich hohes Ansteifen mit der Zeit aufweist, wie die 2008 gemessene Bindemittelsuspension mit dem *STYROMAG*-Produkt der Charge G75-36. Die Feinsalz-Zugabe bewirkt bei den Produkten von *Lehmann & Voss* lediglich eine geringfügig schnellere Viskositätszunahme im Vergleich zur Viskositätszunahme bei einer Bindemittelsuspension ohne Feinsalzzugabe. Jedoch ist die Viskositätszunahme bei einer Bindemittelsuspension mit Feinsalz immer noch gering im Vergleich zur Viskositätszunahme der Bindemittelsuspension mit der *STYROMAG*-Charge G75-36.

Wird ein reaktiveres MgO-Produkt mit einem ZT-Wert von 135 s verwendet, dann ist die Viskositätszunahme der Bindemittelsuspension in den ersten 3 Stunden ähnlich der Viskositätszunahme einer Bindemittelsuspension mit einem normal reaktiven MgO (ZT-Wert von etwa 200 s). Die Reaktivität eines MgO-Produktes wird sich vermutlich erst zu einem späteren Zeitpunkt, beim Einsetzen des Abbindeprozesses, auf die Steifigkeit auswirken.

7.3.3 Bewertung der Deformationsvorgabe

Nach der ersten Versuchsreihe wurde in einem nachfolgend durchgeführten Test überprüft, ab welchem Wert sich die Deformationsanregung auf die Bindemittelmatrix auswirkt. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die festgelegte Deformation von $\gamma_A = 0,005$ wahrscheinlich zu einer zu starken Anregung der Probe führte und es während der Messung zur Zerstörung von zuvor entstandenen Bindungen/Strukturen in der Bindemittelmatrix kam. Daraufhin wurden weitere Versuche durchgeführt um eine verträgliche Deformation γ_A festzulegen.

Die Strukturstärke der Bindemittelmatrix lässt sich mit dem elastischen Anteil G' (= Speichermodul) des komplexen Schubmoduls G^* beschreiben. Der komplexe Schubmodul ist das Verhältnis von Schubspannung zu zugehöriger Deformation:

$$G^* = \frac{\tau(t)}{\gamma(t)} \quad (21)$$

G^*	- komplexer Schubmodul	[Pa]
τ	- Schubspannung	[Pa]
γ	- Deformation	

Im Oszillationsmodus lässt sich der komplexe Schubmodul in seine zwei Anteile zerlegen.

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (22)$$

G^*	- komplexer Schubmodul	[Pa]
G'	- elastischer Anteil des komplexen Schubmoduls	[Pa]
G''	- viskoser Anteil des komplexen Schubmoduls	[Pa]

Im Test wurde der Verlauf des Speichermoduls G' in Abhängigkeit von der Deformation ausgewertet. Der Anteil G' (Speichermodul) kennzeichnet die elastische Eigenschaft (Festkörpereigenschaft) der Probe, der Anteil G'' (Verlustmodul) die viskose Eigenschaft der Probe. Beginnt der Speichermodul G' bei steigender Deformation abzufallen, dann werden Strukturen in der Messprobe zerstört. [AU35]

Für den Test wurde ein MgO-Bindemittel aus einer 2008 eingesetzten G75-Charge von *STYROMAG* und R-Lösung im Verhältnis MgO-Produkt / Lösung von 1,357 verwendet. Es wurde davon ausgegangen, dass das Bindemittel von *Lehmann & Voss* und der S30-Lösung einen ähnlichen Verlauf der Materialfunktionen über die Deformation hat wie das im Test verwendete Bindemittel G75 von *STYROMAG*. Getestet wurden zwei Proben des Bindemittels nach unterschiedlich langer Ruhezeit vor der Messung. Die Ergebnisse des Tests sind in Abbildung 159 dargestellt. Bei der Probe „_10min“ (rote Linie), die erst wenige Minuten alt war, beginnt der Speichermodul ab einer Deformation von $1,5 \cdot 10^{-4}$ abzufallen. Bei der zweiten Probe „_3h“ (blaue Linie) mit langer Standzeit liegt der Grenzwert, ab dem sich der elastische Anteil des komplexen Schubmoduls G' ändert, bei $6 \cdot 10^{-5}$. Für nachfolgende Versuchsreihen wurde eine noch etwas niedrigere Deformation von $\gamma_A = 5 \cdot 10^{-5}$ als Vorgabe gewählt. Der Deformationsvorgabewert der ersten Versuchsreihe von $\gamma_A = 0,005$ liegt im Bereich, in dem die Materialfunktionen abfallen. Die Viskosität, die den Ruhezustand beschreibt, wurde daher in der ersten Versuchsreihe unterschätzt.

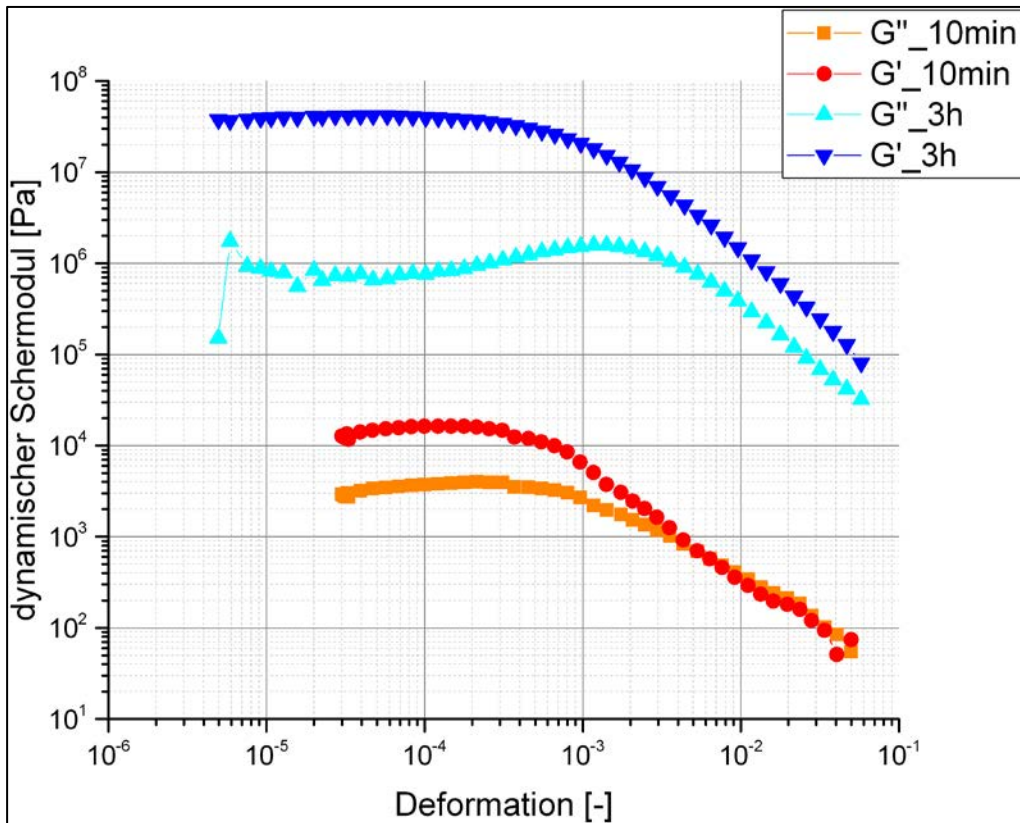


Abbildung 159: Anteile des komplexen Schubmoduls in Abhängigkeit von der Deformation

Auch wenn die Anregung der Bindemittelsuspension in der ersten Versuchsreihe zu hoch war, ist dennoch erkennbar, dass sich mittels Feinsalzzugabe kein derartig schnelles Ansteifen der Suspension erzielen lässt, wie es mit G75 von *STYROMAG* erreicht wurde.

7.3.4 Zweite Versuchsreihe – Messungen mit verändertem Masseverhältnis und weiteren MgO-Sorten

Da sich durch die Zugabe von Feinsalz kein wesentlich schnellerer Viskositätsanstieg der Bindemittelsuspensionen mit den MgO-Sorten von *Lehmann & Voss* erzielen ließ, wurde in einer zweiten Versuchsserie das Masseverhältnis MgO-Produkt / Lösung auf 1,36 erhöht, wie beim GV2 mit dem G75 von *STYROMAG*. Bedingt durch den höheren MgO-Gehalt in den Produkten von *Lehmann & Voss* ist dadurch mehr MgO pro Masse an Lösung als bei der GV2-Rezeptur enthalten. Verwendet wurden von *Lehmann & Voss* die Chargen 205348 und 194272 mit normaler Reaktivität und die Chargen 201888 und 181215 mit höherer Reaktivität. Die Reaktivitäten der MgO-Chargen sind in Tabelle 38 angegeben. Neben den Produkten von *Lehmann & Voss* wurden auch die im Jahr 2017/2018 aktuellen MgO-Chargen von *STYROMAG* G75 und G80 getestet. Die Messungen der zweiten Versuchsreihe sind in Tabelle 41 angegeben.

Tabelle 41: MgO-Produkte und Anzahl der Messungen der zweiten Versuchsreihe zum rheologischen Verhalten von MgO-Bindemittelsuspensionen

MgO-Lieferant	MgO-Produkt	MgO-Charge	Reaktivität (Wert des Zitronensäuretests)	Verhältnis MgO-Produkt/ Lösung	Anzahl Messungen
L&V – Lehmann & Voss	F4-200	205384	210 ± 10 s	1,357	3
		194272	205 ± 5 s		2
		201888	135 ± 10 s		1
		181215	120 ± 5 s		1
STY – STYROMAG	G75	7.5.18	115 ± 5 s	1,100	2
				1,200	1
	G80	8.5.18	160 ± 10 s	1,200	2

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde gegenüber der ersten Versuchsreihe der gesamte Ablauf vom Anmischen über den Probeneinbau bis hin zum Messregime verbessert. Die anzumischende Menge wurde etwa halbiert und mit dem Spatel gemischt. Die Mischzeit lag mit 1,5 min deutlich unter der Mischzeit der ersten Versuchsreihe. Bei den Messungen wurde eine 100-fach geringere Deformationsanregung als bei der ersten Versuchsreihe gewählt. Während der Messungen wurde mittels Axialkraftregelung der Spalt nachgefahren, um sicher zu stellen, dass der Spalt immer exakt befüllt bleibt. Die Anfangsspaltweite wurde zu ca. 1 mm eingestellt.

Die zweite Versuchsreihe wurde von Juli bis August 2019 durchgeführt. Der zeitliche Ablauf zur Herstellung, zum Einbau und zur Messung einer Probe ist in Tabelle 42 angegeben.

Tabelle 42: zweite Versuchsreihe – Ablauf der Probenherstellung und des Probeneinbaus

Schritt	Zeit nach Mischbeginn [min]	Menge/ Beschreibung
Zugabe MgO zur Lösung und Mischbeginn	0,0	Lösung: 19,6 g MgO: je nach Vorgabe
Mischen – Ende	1,5	mit Spatel
Entnahme Probemenge	im Anschluss	1,5 – 2,0 g
Einbau im Rheometer	ca. 2,0	
Anfahren des Messspaltes	ca. 3,5	Zeitpunkt von 3,3 bis >5 min
Anpassung der Probe bei eingestellter Messgeometrie	im Anschluss	
Start des Messprogramms im Rheometer einschl. 2 min Ruhezeit direkt vor der Messung	ca. 7	Temperierhaube aufgesetzt; $\gamma_A = 5 \cdot 10^{-5}$

Beim Anmischen des MgO-Pulvers von *STYROMAG* in einem Masseverhältnis MgO-Produkt/ Lösung von 1,36 war die Mischung zu steif, um sie im Rheometer einbauen zu können. Deshalb wurde das Verhältnis auf 1,2 und 1,1 reduziert. Bei den Bindemittelsuspensionen mit *Lehmann & Voss*-Produkten wurde jedoch das Verhältnis MgO-Produkt /Lösung mit 1,357 belassen.

In Abbildung 160 ist der Verlauf der Viskosität der getesteten Bindemittelsuspensionen dargestellt. Die Viskosität der Bindemittelsuspensionen steigt über die Messzeit bei den Bindemittelsuspensionen mit *STYROMAG*-Produkten stärker an als bei den Bindemittelsuspensionen mit Produkten von *Lehmann & Voss*, obwohl der MgO-Gehalt bei den Bindemitteln mit G75 und G80 deutlich geringer ist als bei den Bindemitteln von *Lehmann & Voss*.

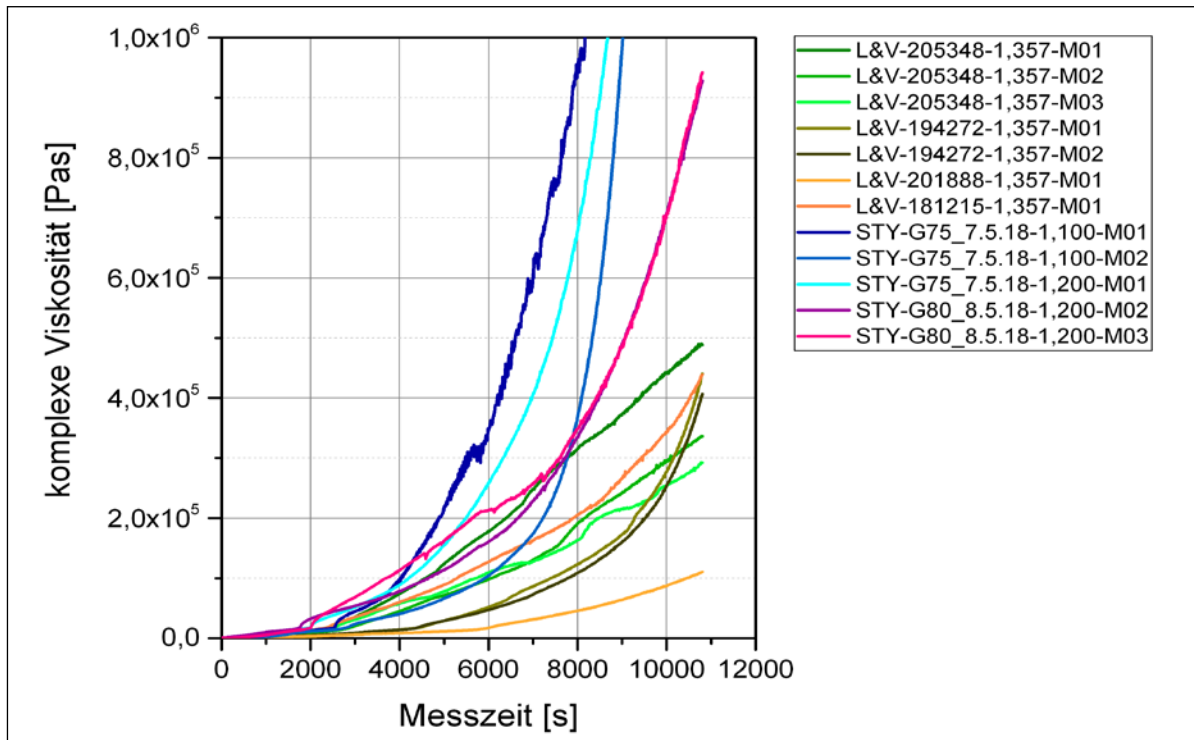


Abbildung 160: Viskosität in Abhängigkeit der Zeit bei den Bindemittelsuspensionsproben der 2. Messreihe, (Parameterbezeichnung: „MgO-Produkt – Lösungsverhältnis (1,357; 1,1; 1,2) – Probennummer (M01; M02; M03) Viskositätsmessungen)

Abbildung 161 zeigt einen Detailausschnitt aus Abbildung 160 für die ersten 1000 Sekunden. Hier wird deutlich, dass die Viskosität mit der Zeit bei den Proben MgO G75 und G80 der Fa. *STYROMAG* stärker ansteigt gegenüber den Proben mit MgO der Fa. *Lehmann & Voss*. Die Anfangsviskosität ist allerdings etwa in der gleichen Größenordnung.

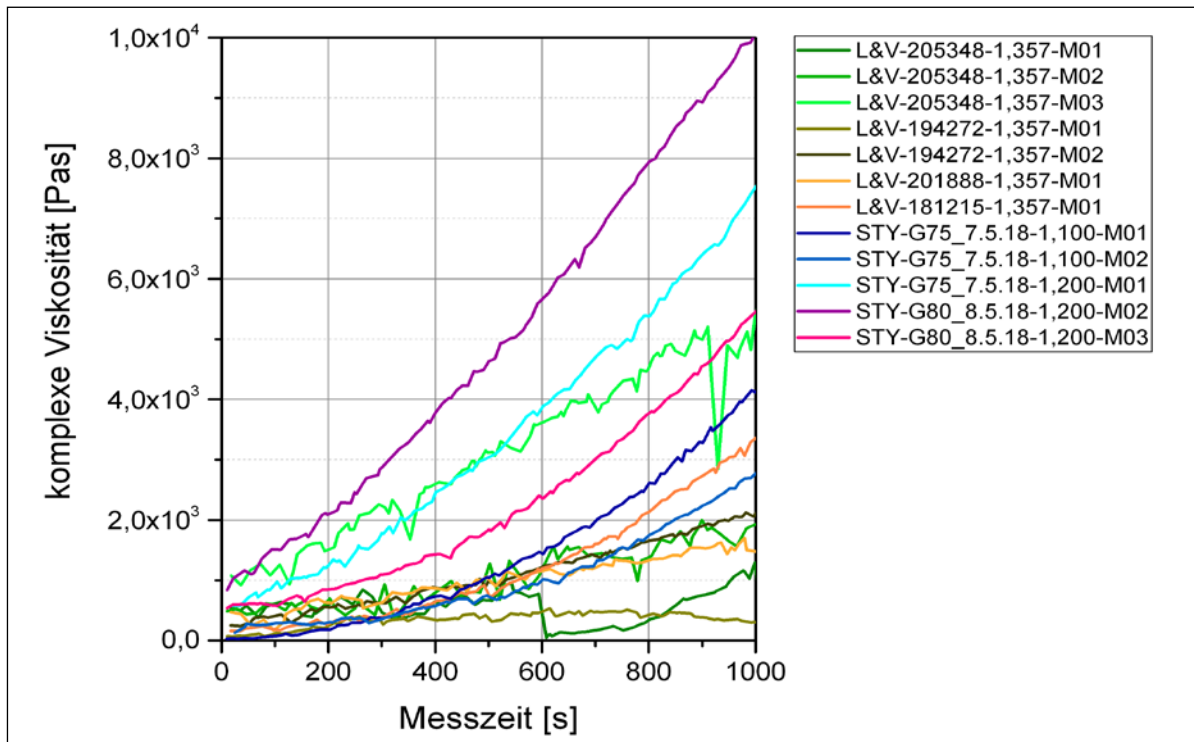


Abbildung 161: Viskosität der Bindemittelsuspensionsproben bei 2. Messreihe (Ausschnitt aus Abbildung 160) – Parameterbezeichnung: „MgO-Produkt - Lösungsverhältnis (1,357; 1,1; 1,2) - Probennummer (M01; M02; M03)

Wird der Verlauf des Phasenverschiebungswinkels δ betrachtet, dann zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Bindemittelsuspensionen mit MgO von *STYROMAG* und mit MgO von *Lehmann & Voss*. Bei geringen Phasenverschiebungswinkeln zwischen 0° und 45° dominieren elastische Eigenschaften, bei größeren Phasenverschiebungswinkeln zwischen 45° und 90° dominieren viskose Eigenschaften. Der in Abbildung 162 dargestellte Phasenverschiebungswinkel δ zeigt, dass die Proben mit dem MgO von *STYROMAG* etwas weniger viskos auf die Deformationsanregung reagieren als die Proben mit MgO von *Lehmann & Voss*. Jedoch zeigen alle Proben bereits am Anfang der Messzeit Festkörpereigenschaften, da der Phasenverschiebungswinkel bei allen Messkurven schon zu Beginn der Messzeit kleiner als 45° ist.

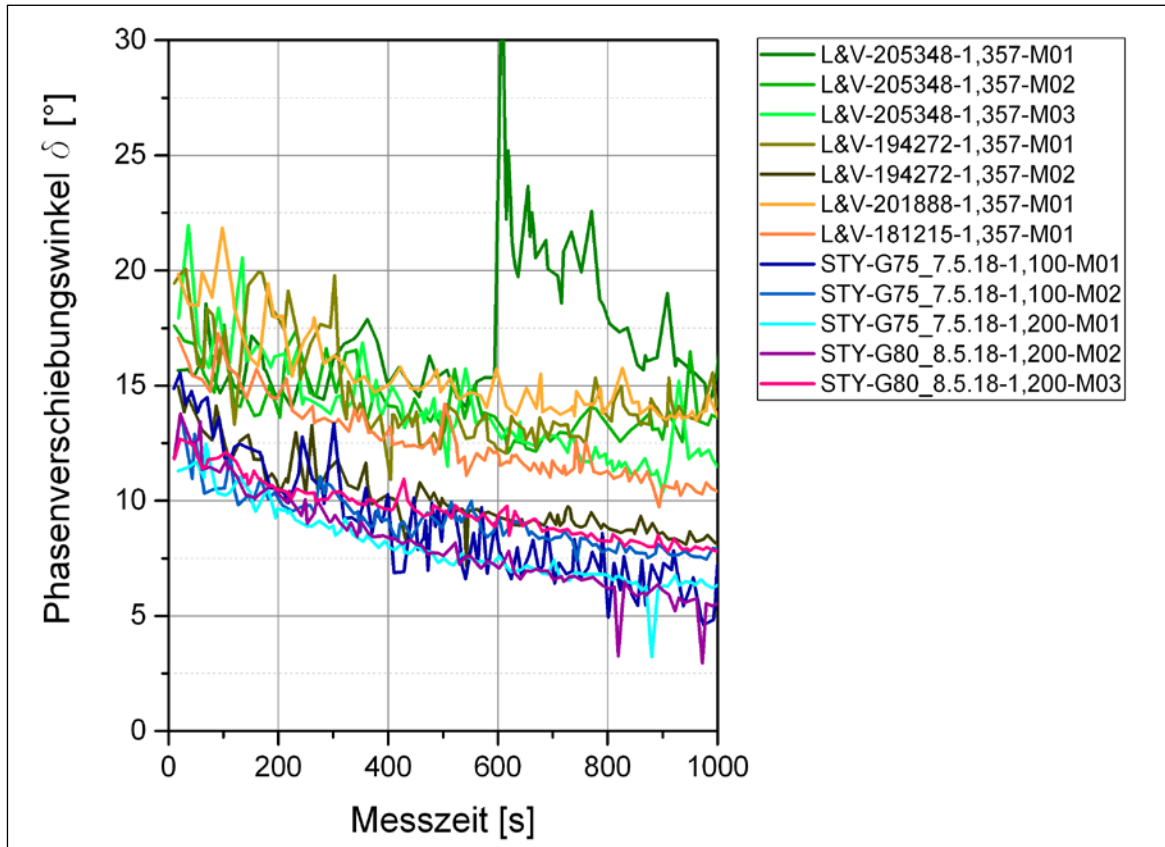


Abbildung 162: Änderung des Phasenverschiebungswinkels über die Zeit bei verschiedenen MgO-Bindemittelsuspensionen

7.3.5 Zusammenfassung und Ausblick zu den rheologischen Untersuchungen mit MgO-Bindemittelsuspension

Bindemittelsuspensionen mit MgO von *Lehmann & Voss* steifen trotz höherem MgO-Gehalt und insgesamt höherem Anteil an MgO-Pulver nicht so schnell an wie Bindemittelsuspensionen mit MgO von *STYROMAG*.

Die Zugabe von Feinsalz führt bei einer aufgetragenen Deformation von 0,5 % zu einer stärkeren Zunahme der Viskosität. Jedoch repräsentiert die Anregung mit einer Deformation von 0,5 % nicht den Ruhezustand, da sie zu hoch ist.

Die Reaktivität der MgO-Sorten hatte keine Auswirkung auf den Verlauf der Viskosität innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 3 Stunden. Dies gilt sowohl für das MgO von *Lehmann & Voss* als auch das MgO von *STYROMAG*.

Beim Vergleich von mehreren Einzelmessungen der selben Bindemittelrezeptur fällt die große Streuung der Messkurven auf. Durch die sehr kleinen Probemengen des MgO-Pulvers bei der Entnahme aus einer vielfach größeren Grundmenge könnte die Zusammensetzung der verwendeten Einzelproben voneinander abweichen. Als weitere mögliche Ursache für die Streuung der Messergebnisse kommt eine inhomogene Benetzung des MgO-Pulvers mit der Salzlösung aufgrund der begrenzten Mischintensität und Mischzeit infrage.

Bei der Entwicklung von Betonrezepturen ist zu beachten, dass in der Praxis das rheologische Verhalten der Betonmatrix relevant ist, weil das Verhalten der Bindemittelsuspension durch die Zuschlagskörnung beeinflusst wird. Vor allem aus diesem Grunde sollten in zukünftigen

Untersuchungsprogrammen zum rheologischen Verhalten zunächst sogenannte Handhabungsversuche an Mischungen durchgeführt werden, die alle Komponenten der Betonrezeptur (Zuschlag + MgO + Lösung) enthalten. Ist eine Mischung erfolgshöflich, könnte die Zusammensetzung der Bindemittelsuspension mittels rheologischer Messungen weiter optimiert werden.

Für weitere Untersuchungen an Bindemittelsuspensionen ist es sinnvoll, schubspannungsge-regelt statt mit konstanter Deformationsanregung zu messen, da auch in der Praxis auf einer Spritzbetonschicht mechanische Spannungen wirken. Über Amplitudentests, bei denen die Schubspannung schrittweise erhöht wird, kann die Grenze bestimmt werden, ab welcher Schubspannung das Bindemittel beginnt, seine Festigkeit zu verlieren [AU35].

Um zu untersuchen, wie klebrig ein Bindemittel ist, könnten Messproben unter Zugbeanspruchung im Rheometer gemessen werden. Anstelle von Drehbewegungen der Messgeometrie wird die axiale Verfahrenrichtung des Rheometers genutzt. Hierbei wird zunächst beim Einbau der Messprobe die obere Platte unter definierten Bedingungen auf die Probenoberfläche aufgefahen (z.B. mit konstanter Normalkraft bei vorgegebener Haltezeit). Danach wird die obere Platte mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit nach oben bewegt und der Verlauf der Zugkraft über den Verfahrenweg ausgewertet. Solche Messungen werden als Tack-Tests bezeichnet (engl. *tack*). Weiterhin könnte geprüft werden, ob bei Oszillationsmessungen an MgO-Bindemittelproben der Phasenverschiebungswinkel als Parameter für die Klebrigkeit ausgewertet werden kann. [AU35]

7.4 Anpassung der Grundrezeptur des D4-Betons

Aus früheren rheologischen Untersuchungen [AU1] ergibt sich folgende Grundrezeptur D4 für einen MgO-Beton mit der 5-1-8-Bindemittelphase.

MgO (L&V):	16 %
Zuschlag 0-8 mm:	68 %
MgCl ₂ -Lösung (S30):	16 %

Diese Rezeptur ist allerdings eine Ortbetonrezeptur. Eine Spritzbetonrezeptur mit den prinzipiell gleichen Ausgangsstoffen ist noch nicht getestet worden. Eine Anpassung der Ortbetonrezeptur für eine Spritzbetonrezeptur ist das Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen.

Die Anpassung einer MgO-Ortbetonrezeptur zu einer MgO-Spritzbetonrezeptur ist durch folgende Maßnahmen möglich:

1. Erhöhung des Zuschlaganteiles (Masseverhältnis Zuschlag/MgO).
2. Verringerung des Masseverhältnis Lösung/MgO⁶. Der Maximalwert von 1,0 darf nicht überschritten werden.
3. Verwendung einer MgO-Sorte mit höherer Reaktivität. Für einen fließfähigen Ortbeton wurde ein MgO mit einem ZT-Wert von ca. 300 s (bei pH = 7) empfohlen. Für Spritzbeton kann auch ein MgO mit einem geringeren ZT-Wert von ca. 150 s (bei pH = 7) verwendet werden, wenn nach dem Spritzen keine höhere Temperaturentwicklung beobachtet wird.
4. Zugabe von Feinsalz als Mehlkorn.
5. Zugabe von Schmelzbasaltfasern.

⁶ Im Unterschied zu den rheologischen Untersuchungen (Abschnitt 7.3) wird bei MgO-Baustoffmischungen in Anlehnung an den w/z-Wert (Wasser-Zement-Wert) das Masseverhältnis Lösung/MgO verwendet (und nicht MgO/Lösung).

Die Ergebnisse der für die o.g. Punkte Nr. 2, 3 und 4 durchgeführten rheologischen Untersuchungen (siehe Abschnitt 7.3) und der Handhabungsversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine Verringerung des Masseverhältnisses Lösung/MgO auf Werte von $< 0,83 \dots 0,91$ ist sinnvoll. Allerdings wird bei $< 0,77$ schon ein Zustand erreicht, bei dem nur eine krümelige Konsistenz vorliegt.
- Ein MgO mit höherer Reaktivität (geringerem ZT-Wert) in der Rezeptur hat keine signifikanten Vorteile gebracht.
- Die Zugabe von Feinsalz als Mehlkorn hat keine Verbesserung gebracht. Vorteilhafter ist aufgemahlene Feinsalz. Allerdings ist diese Variante praktisch nur unter sehr hohem Aufwand umsetzbar, der in keinem Verhältnis zum Ergebnis der Verbesserung der Spritzbetonklebrigkeit steht.
- Der Zusatz von Mikrosilika (silica fume) wurde aufgrund der Reaktivität mit der $MgCl_2$ -Lösung zurückgestellt. Bekannt ist aber, dass dies ein bewährtes Mittel zur Erhöhung der Klebrigkeit ist [AU12].
- Vorteilhaft erscheinen ausreagierte Mg-Silikate, wie z. B. natürlicher Talk, der sich im vorliegenden System inert verhält. Talk-haltige MgO-Sorten (z. B. STYROMAG) haben auch eine höhere BET-Oberfläche. Eine Alternative ist die Zumischung von Talk zu einem reinen MgO. Eine Talk-Zumischung von ca. 10 % der Trockenmasse des MgO ist ausreichend.

Im Ergebnis dieser Vorversuche wurden Probekörpern mit den Rezepturen SBn und SBn-F gemäß Tabelle 43 hergestellt. In Tabelle 43 sind neben der GV2-Spritzbetonrezeptur als Vergleich die Zusammensetzung von zwei neuen Spritzbetonvarianten enthalten, wobei eine Mischung keine Fasern (SBn) und die andere Mischung Fasern (SBn-F) enthält.

Tabelle 43: Rezepturen für die Herstellung von Probekörpern

	GV2 SB (Vergleich)	SBn	SBn-F
MgO [M-%]	15,6 (STYROMAG G75)	15,8 L&V 194272 (ZT 205 s)	
Lösung [M-%]	11,4 (R-Lösung)	13,0 (DEUSA S30)	
Zuschlag 0-8 mm [M-%]	73,0	69,6	69,4
Talk IMERYS LUZENAC-A3 [M-%]		1,6	1,6
Schmelzbasaltfasern UCF 20 mm [M-%]		-	0,2
Summe	100	100	100
Lösung/MgO [-]	0,731	0,823	0,823
Lösung/(MgO+Talk). [-]	0,731	0,747	0,747
Zuschlag inkl. Fasern /MgO [-]	4,679	4,405	4,405

Es wurden Probekörper im Labor mit den neuen Rezepturen SBn und SBn-F hergestellt und an diesen Probekörpern

- die Einaxiale Druckfestigkeit,
- die Spaltzugfestigkeit,
- die Haftzugfestigkeit an Steinsalz und

- die direkte Zugfestigkeit

bestimmt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

8 Untersuchungen zur Vervollständigung der experimentellen Datenbasis

Hauptziel der Untersuchungen war festzustellen, welche Festigkeit bei der Rezepturvariante mit Zugabe von Talkmehl im Masseverhältnis Talk/MgO-Produkt = ca. 0,1 zum bisher verwendeten MgO der Firma Lehmann & Voss erreicht werden kann. Weiterhin sollte geklärt werden, ob durch die Zugabe unbeschichteter Schmelzbasaltfasern eine Festigkeitserhöhung erreicht werden kann.

Die Proben für die Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit, der Spaltzugfestigkeit, der Haftzugfestigkeit an Steinsalz und der direkten Zugfestigkeit wurden im Labor entsprechend den Spritzbeton-Rezepturen SBn und SBn-F hergestellt. Die Probekörper waren zylindrisch mit einer Höhe von 200 mm und einem Durchmesser von 100 mm. Die Probekörper wurden also nicht aus einer gespritzten Schicht herausgebohrt.

Es wurden insgesamt 18 Probekörper hergestellt. Je Probealter (3 Tage, 7 Tage, 28 Tage) gab es je 3 Proben jeweils mit und ohne Fasern.

Als Belastungsgeschwindigkeit für alle Versuche wurde eine konstante Axialverformungsrate von $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/s gewählt.

Einaxiale Druckfestigkeit

Die Mittelwerte und die Standardabweichung der einaxialen Druckfestigkeit (für je 3 Messwerte) sind in Tabelle 44 aufgeführt. Die Ergebnisse sind auch in Abbildung 163 dargestellt.

Tabelle 44: Mittelwerte aus 3 Messwerten der einaxialen Druckfestigkeit und Standardabweichung aus je 3 Versuchen der Rezepturen SBn (ohne Fasern) und SBn-F (mit Fasern UCF) – nach Ergebnissen von [AU41]

Betonalter	Mittelwert einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Standardabweichung einaxiale Druckfestigkeit [MPa]
3 d ohne Fasern	50,80	1,67
3 d mit Fasern	52,88	2,31
7 d ohne Fasern	67,87	2,41
7 d mit Fasern	66,40	7,84
28 d ohne Fasern	92,83	5,38
28 d mit Fasern	93,10	3,26

Es hat sich gezeigt, dass schon nach drei Tagen die für den D4-Rezepturtyp hohen Druckfestigkeiten von ca. 50 MPa erreicht worden sind. Nach 28 Tagen beträgt die Druckfestigkeit über 90 MPa. Durch Fasern ist praktisch keine Festigkeitserhöhung nachweisbar (siehe Abbildung 163).

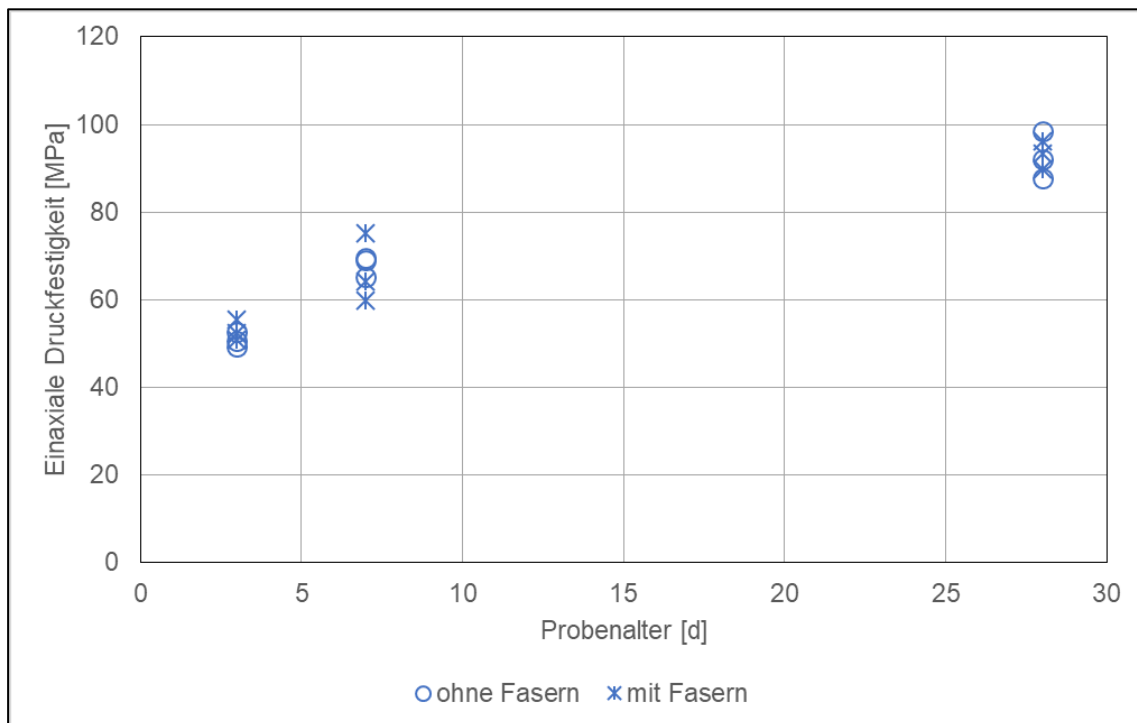


Abbildung 163: Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit der Rezepturen SBn und SBn-F in Abhängigkeit vom Probenalter

Spaltzugfestigkeit

Der Mittelwert und die Standardabweichung der Spaltzugfestigkeit (für je 3 Messwerte) sind für die verschiedenen Rezepturen und Probenalter in Tabelle 45 gelistet und in Abbildung 164 dargestellt. An drei Tage alten Proben beträgt die Spaltzugfestigkeit zwischen ca. 4 MPa und 5 MPa, nach 28 Tagen zwischen etwa 7 MPa und 9 MPa.

Tabelle 45: Mittelwerte (aus 3 Messwerten) der Spaltzugfestigkeit und zugehörige Standardabweichung der Rezepturen SBn (ohne Fasern) und SBn-F (mit Fasern UCF) – nach Ergebnissen aus [AU41]

Betonalter	Mittelwert Spaltzugfestigkeit [MPa]	Standardabweichung Spaltzugfestigkeit [MPa]
3 d ohne Fasern	4,66	0,34
3 d mit Fasern	4,12	0,38
7 d ohne Fasern	6,17	0,15
7 d mit Fasern	6,00	0,10
28 d ohne Fasern	7,35	0,49
28 d mit Fasern	8,57	1,01

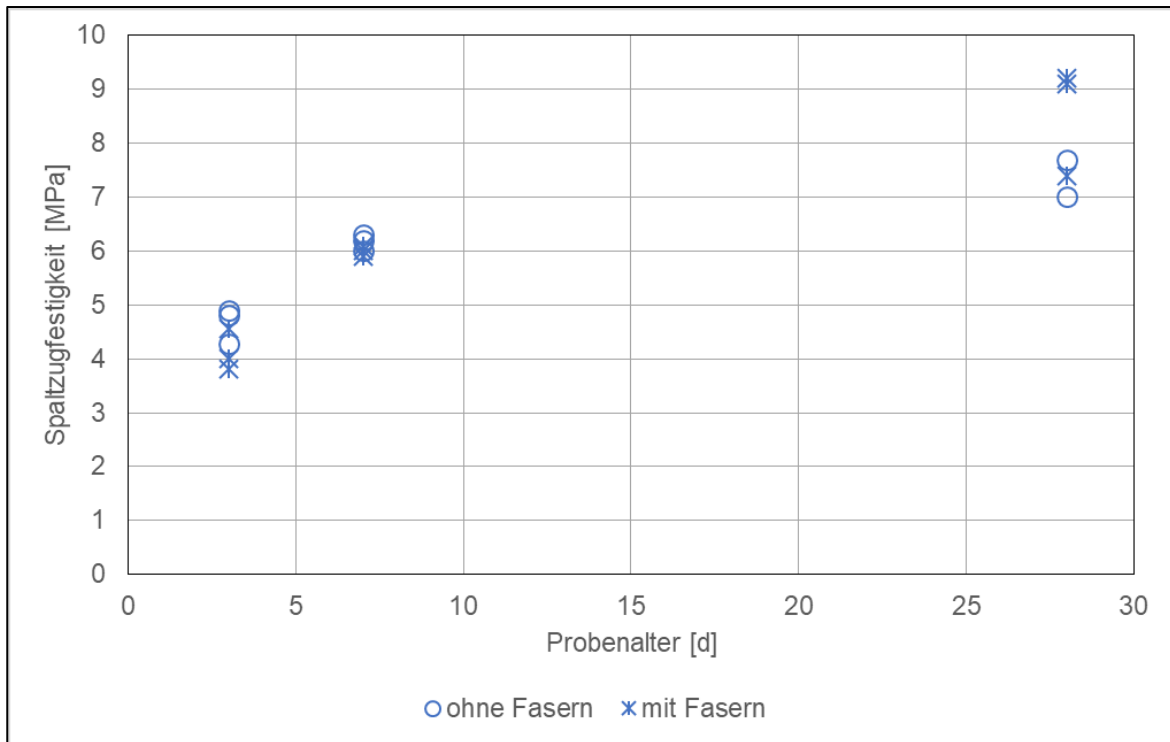


Abbildung 164: Spaltzugfestigkeit der Rezepturen SBn und SBn-F in Abhängigkeit vom Probenalter

Direkte Zugfestigkeit

Die Werte der direkten Zugversuche bei einem Probenalter von 3 Tagen und 7 Tagen hatten eine hohe Streuung (Einzelwerte zwischen 1,37 MPa und 4,58 MPa), sodass sich noch kein klares Ergebnis ableiten lässt. Für 28 Tage alte Proben ist die Streuung der Einzelwerte geringer (siehe Abbildung 165 und Tabelle 46), so dass die Werte der direkten Zugfestigkeit hier vertrauenswürdiger sind. Der Mittelwert der Zugfestigkeit für die Proben mit Fasern (5,70 MPa) unterscheidet sich unwesentlich vom Mittelwert der Zugfestigkeit für Proben ohne Fasern (5,62 MPa). Daraus wird abgeleitet, dass die Zugabe von Fasern zum MgO-Mörtel keinen signifikanten Vorteil für die direkte Zugfestigkeit brachte.

Tabelle 46: Mittelwerte (aus je 3 Messwerten) der direkten Zugfestigkeit und ihrer Standardabweichung der Rezepturen SBn (ohne Fasern) und SBn-F (mit Fasern UCF) – nach Ergebnissen von [AU41]

Betonalter	Mittelwert Zugfestigkeit [MPa]	Standardabweichung Zugfestigkeit [MPa]
3 d ohne Fasern	2,77	1,64
3 d mit Fasern	2,65	0,24
7 d ohne Fasern	2,79	1,15
7 d mit Fasern	3,93	0,31
28 d ohne Fasern	5,62	0,06
28 d mit Fasern	5,70	0,20

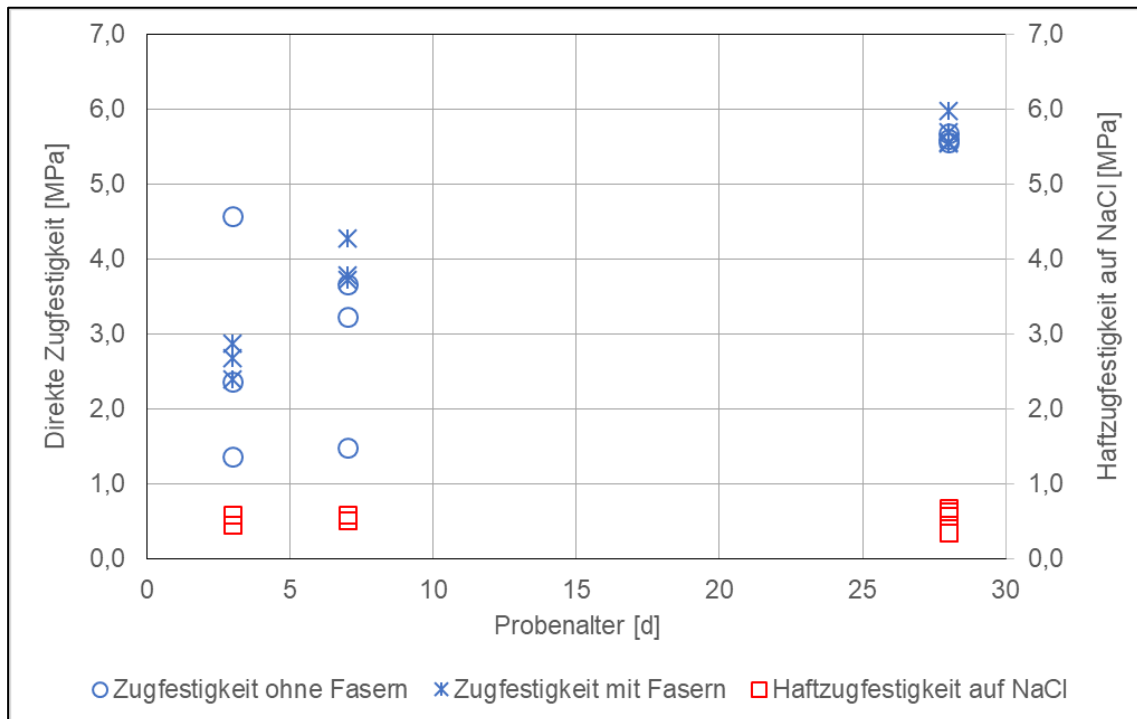


Abbildung 165: Direkte Zugfestigkeit der Rezepturen SBn und SBn-F und Haftzugfestigkeit der Rezeptur SBn auf Steinsalz in Abhängigkeit vom Probenalter

Direkte Haftzugfestigkeit auf Steinsalz

Bei den direkten Haftzugversuchen des MgO-Betons auf Steinsalz trat ein Versagen meist konturnah im Steinsalz auf. Die Haftzugfestigkeit konnte deshalb nicht höher sein als die Zugfestigkeit des „aufgelockerten“ Steinsalzes (aus der Auflockerungszone – um 0,5 MPa). Die Ergebnisse der direkten Haftzugversuche sind in Abbildung 165 rot dargestellt.

Das Probealter ist für die Haftzugfestigkeit des MgO-Betons am Steinsalz nicht relevant. An 28 Tage alten Proben wurden 4 Einzelmessungen (sonst 2 Einzelmessungen) durchgeführt.

Bei 28 Tage alten Proben beträgt der Mittelwert der Haftzugfestigkeit des MgO-Betons am Steinsalz 0,56 MPa und die Standardabweichung 0,15 MPa.

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde MgO der Fa. Lehmann & Voss eingesetzt, da dieses für die weitere Anwendung geplant war. Während der Erstellung dieses Berichtes hat sich herausgestellt, dass das MgO der Firma *Lehmann & Voss* nicht mehr verfügbar sein wird. Die Untersuchungen sollen deshalb mit MgO der Firma STYROMAG (mit natürlichem Talk-Gehalt) in einem Nachfolgeforschungsvorhaben fortgesetzt werden. Dabei sollen auch halbtechnische Spritzversuche geplant werden und die Frühfestigkeit nach 0,5 sowie 1 und 2 Tagen untersucht werden.

9 Aufgabenstellung für einen geeigneten chemo-hydro-mechanischen Nachweis bei MgO-Spritzbeton mit 5-1-8-Phase

9.1 Einleitung

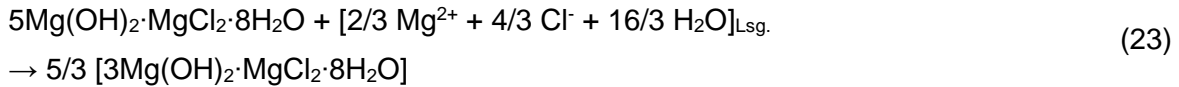
Im Fall des MgO-Baustoffs, der nach dem Abbinden die 5-1-8 Bindemittelphase aufweist, kommt es bei Lösungsangriff zur Umwandlung der 5-1-8-Phase in die thermodynamisch stabile 3-1-8-Phase, verbunden mit einem Festphasen-Volumenzuwachs und bei einer entsprechenden Einspannung damit zum Aufbau eines Kristallisationsdruckes. Aufgrund des Festphasenvolumenzuwachses tritt quasi eine hydraulischen „Selbstabdichtung“ ein, da das Porenvolumen kleiner wird. Dies führt zu einer weiteren Verringerung der Permeabilität. Es handelt sich somit um einen komplexen chemo-hydro-mechanischen Prozess, der in numerischen Simulationsrechnungen zum Lösungsdurchtritt durch einen Baustoffkörper in den bisherigen Betrachtungen nur unzureichend berücksichtigt wurde.

Da konkrete Messwerte zur Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung für den MgO-Baustoff nicht vorliegen und aufgrund der kleinen Größenordnung dieser Kennwerte nicht einfach experimentell bestimmbar sind, wird eine Selbstabdichtung zunächst nur phänomenologisch anhand ablaufender Phasenumbildungen sowie im Ergebnis der Bohrlochuntersuchungen qualitativ diskutiert. Danach werden ausgehend von einer stufenweisen Massen-/Volumenbilanz der zutretenden Lösung und den resultierenden Festphasenumwandlungsreaktionen die sich ergebende Porositätsänderung quantifiziert.

Abschließend werden verschiedene Porenraummodelle zur Abschätzung von möglichen Porositäts-/Permeabilitätsänderungen herangezogen.

9.2 Stoffumwandlungsprozess / phänomenologische Beobachtungen

Beim Zutritt von Lösung zum MgO-Beton der Rezeptur D4 wird die 5-1-8-Phase in die langzeitstabile 3-1-8-Phase nach folgender Reaktion umgewandelt [AU1]:



Bei der Kristallisation der 3-1-8-Phase nimmt das Volumen zu. Die dabei eintretende Volumenzunahme beträgt nach den experimentellen Daten und der Volumenbilanz [AU1] 4,1 cm³ je 5 ml zugetretener Lösung. Die Lösung wird dabei vollständig verbraucht. Die 4,1 cm³ zusätzliches Feststoffvolumen ergeben sich wie folgt:

Ausgangsbindemittelgefüge im abgebundenen D4:

2,5 cm³ 5-1-8-Phase im D4-Baustoff + 0,6 cm³ Rest-MgO im Baustoff.

Das Volumen der Gesteinskörnung wird nicht betrachtet, da es an der Reaktion nicht teilnimmt.

resultierendes Bindemittelgefüge:

7,2 cm³ neu gebildete 3-1-8-Phase (unter Verbrauch der 5 ml Lösung)

- ➔ Volumenzuwachs an Feststoff: 4,1 cm³ absolut bzw. das 1,323-fache des Feststoff-Ausgangsvolumens

Mit dieser Phasenumwandlung kommt es infolge einer Volumenzunahme bei eingespanntem MgO-Beton zu einer Verringerung des Porenraums.

Die Phasenumwandlung erfordert also den Zutritt von Lösung auf eine bestimmte Baustoffoberfläche bzw. das Eindringen der Lösung in ein bestimmtes Baustoffvolumen. Der oben beschriebene Umsatz wird eher durch das im Kontakt mit dem Baustoff befindliche Lösungsvolumen als durch das verfügbare Feststoffvolumen bestimmt, da es sich hier um einen kompakten Baustoff handelt. Das reaktionsfähige Lösungsvolumen kann entweder in den Poren des Baustoffes oder in andere Wegsamkeiten eindringen (Gefügedefekte, Mikrorisse), die man als Risse mit einer bestimmten Rissweite modelltechnisch abbilden kann.

Die Porosität des Baustoffes D4 wurde durch das Verfahren der Quecksilberporosimetrie bestimmt. Als relevant sind die Werte anzusehen, welche an Baustoffproben nach Trocknung bei Raumtemperatur (25°C) und 32,5 % relativer Luftfeuchte bestimmt wurden (siehe Abschnitt 3.10.1.2). Eine Porosität und Sättigung, welche nach Trocknung der Proben bei 105°C berechnet wird, sind aufgrund der thermischen Zersetzung der Bindemittelphasen bei dieser Temperatur nicht zutreffend. Eine Temperatur von 25°C und eine relative Luftfeuchte von 32,5 % entsprechen auch ungefähr den Umgebungsbedingungen im Steinsalz. Unter diesen Trocknungsbedingungen beträgt die Porosität beim klassischen Verfahren der Hg-Porosimetrie (4,4 ± 1,1 % aus 21 Einzelmessungen) (siehe Abschnitt 3.10.2). Dabei wurden nur Porengrößen bis 100 µm erfasst, weshalb der Bereich der hydraulisch wirksamen Poren (> 300 µm) nicht vollständig beurteilt werden konnte. Generell und zukünftig ist eine Trocknung von MgO-Baustoffproben, die rezepturbedingt die 5-1-8-Phase enthalten, überflüssig, da es sich um einen primär trockenen Baustoff handelt. Die Anmischlösung wird rezepturbedingt vollständig für die Bindemittelphasenbildung verbraucht.

Bei drei Einzelmessungen im Messbereich bis 900 µm wurde eine Porosität von (5,9 ± 0,7) % ermittelt.

Über die Geometrie der als „Risse“ vorstellbaren Defekte liegen keine Ergebnisse vor. Eine mutmaßliche Größenordnung von Rissweiten im Bereich < 100 µm kann erst nach dem Rückbau des Bauwerkes beziffert werden.

Der oben beschriebene Effekt der Zunahme des Feststoffvolumens bei Lösungszutritt führt über die Porositätsabnahme zu einer Permeabilitätsverringering und somit zu einer hydraulischen Selbstabdichtung, was auch aus den Ergebnissen der Bohrlochversuche in den Bohrungen B38, B39, B40 und B41 geschlossen werden kann.

Der intakte Baustoffkörper weist aufgrund der vorher diskutierten Porosität von ca. $5,9 \pm 0,7$ % nur eine geringe Lösungspemeabilität $< 10^{-19}$ m² auf. Die Permeabilität nimmt mit zunehmender Lösungsdruckbeaufschlagung noch weiter ab. Dies zeigt deutlich die „Selbstabdichtung“ in den Bohrungen B38/B39, in denen zu Beginn der Lösungsdruckbeaufschlagung mutmaßlich „Defekte“ vorlagen (siehe Abschnitt 4.3). Dieser Prozess führt zu einer dauerhaften Permeabilitätsverringering des Baustoffs, da die neu gebildete 3-1-8 Phase nicht abtransportiert wird und im Porenraum des Baustoffs verbleibt.

In bisherigen numerischen Durchströmungsberechnungen von Dichtbauwerken wird dieser Sachverhalt jedoch nicht berücksichtigt. Infolgedessen wird in numerischen Analysen die das Bauwerk durchströmende Flüssigkeitsmenge zu hoch ermittelt.

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurde nachfolgend ein Vorschlag erarbeitet, wie bei numerischen Durchströmungsberechnungen die Umwandlung der 5-1-8-Bindemittelphase in die 3-1-8-Bindemittelphase berücksichtigt werden kann und wie sich daraus die Permeabilität verringert. Auf Grundlage der Vorschläge kann dann ein Algorithmus zur Berücksichtigung der Phasenumwandlung in einem numerischen Programm entwickelt werden. In einer zukünftigen numerischen Beschreibung des Lösungskontaktes von MgO-Beton soll die hydraulische Selbstabdichtung infolge der Umwandlung der 5-1-8-Phase in die langzeitstabile 3-1-8-Phase ohne Abtransport der Reaktionsprodukte aus dem Porenraum implementiert werden.

9.3 Änderung der Porosität durch Phasenumbildung bei Lösungskontakt im Porenraum

Im MgO-Beton sind die Poren luffertfüllt, da der abgebundene Baustoff nach der Rezeptur D4 keine Porenlösung enthält. Bei einem Zutritt von Lösung kann diese über die Poren bis in einen bestimmten Bereich des Baustoffes eindringen. Die Eindringgeschwindigkeit ist von der Permeabilität des Baustoffs abhängig. Da sich die Porosität des Baustoffs durch Reaktionen im Porenraum (siehe oben) verringert, nimmt die Eindringgeschwindigkeit der Lösung ab. Da noch keine Beziehung zwischen Permeabilität und Porosität für den MgO-Beton vorliegt, wird nachfolgend die stufenweise Änderung der Porosität beschrieben. Dabei wird der zeitliche Ablauf der Porositätsänderung vernachlässigt, da eine Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung nicht bekannt ist.

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist eine Ausgangsporosität von $n_0 = 5,9$ %, die bei Lösungszutritt vollständig mit MgCl₂-haltiger Lösung erfüllt ist. Weiterhin wird unterstellt, dass der Porenraum immer hydraulisch zugänglich ist, d.h. Lösung kann nachfließen. In der Realität wird die Permeabilität deutlich abnehmen.

In 100 cm³ MgO-Beton sind in diesem Fall 5,9 mL MgCl₂-haltige Lösung eingedrungen. Die 100 cm³ MgO-Beton entsprechen 223,8 g (Trockenrohichte 2,238 g/cm³). Davon sind 31,9 % Bindemittelphase und 22,3 % 5-1-8-Phase (= 49,9 g) und 9,6 % Rest-MgO (= 21,5 g). Für eine vollständige Umsetzung beider Komponenten wären 67,12 g MgCl₂-Lösung bzw. 51,63 mL (Dichte der Lösung 1,3 g/cm³) erforderlich. In den MgO-Baustoff können aber erst einmal nur 5,9 mL in den Porenraum aufgenommen werden, so dass kein vollständiger Umsatz erfolgt. In diesem Fall können nur 25,6 g MgO-Beton umgesetzt werden, was im Fall von 100 cm³ 11,4 % der Gesamtmasse des MgO-Betons entspricht.

Die eingedrungenen 5,9 mL MgCl₂-Lösung bilden aus der 5-1-8-Phase und dem Rest-MgO ein zusätzliches Volumen von 4,838 cm³ 3-1-8-Phase. Dieses Volumen bildet sich im ursprünglichen Porenraum (5,9 cm³) aus, sodass ein Porenraum von 5,9 cm³ - 4,838 cm³ = 1,062 cm³ verbleibt. Dieser Porenraum entspricht einer Restporosität von ca. 1,1 %.

Da die im ursprünglichen Porenraum eingedrungene Lösung dabei vollständig verbraucht wurde, ist der verbleibende Porenraum „frei“ und neue Lösung kann nachfließen. In den jetzigen Porenraum können 1,062 mL Lösung aufgenommen werden. Wenn diese Lösung Kontakt zur 5-1-8-Phase und zum Rest-MgO erhält, bildet sich wiederum 0,87 cm³ zusätzliche 3-1-8-Phase im vorhandenen Porenraum aus. Im Ergebnis dieser Reaktion verringert sich die Porosität auf 0,19 %. Die Lösung wird wiederum aufgebraucht und ca. 0,19 mL Lösung können zutreten.

Setzt man diese Reihe weiter fort, verringert sich die Porosität infolge des Lösungszutritts auf nahezu Null. Abbildung 166 zeigt auf der Basis der oben beschriebenen Ergebnisse diesen Zusammenhang beispielhaft für eine Ausgangsporosität von 3 % und 6 %. Dabei gilt die Bedingung, dass das jeweilige Lösungsvolumen dem jeweiligen Porenvolumen entspricht:

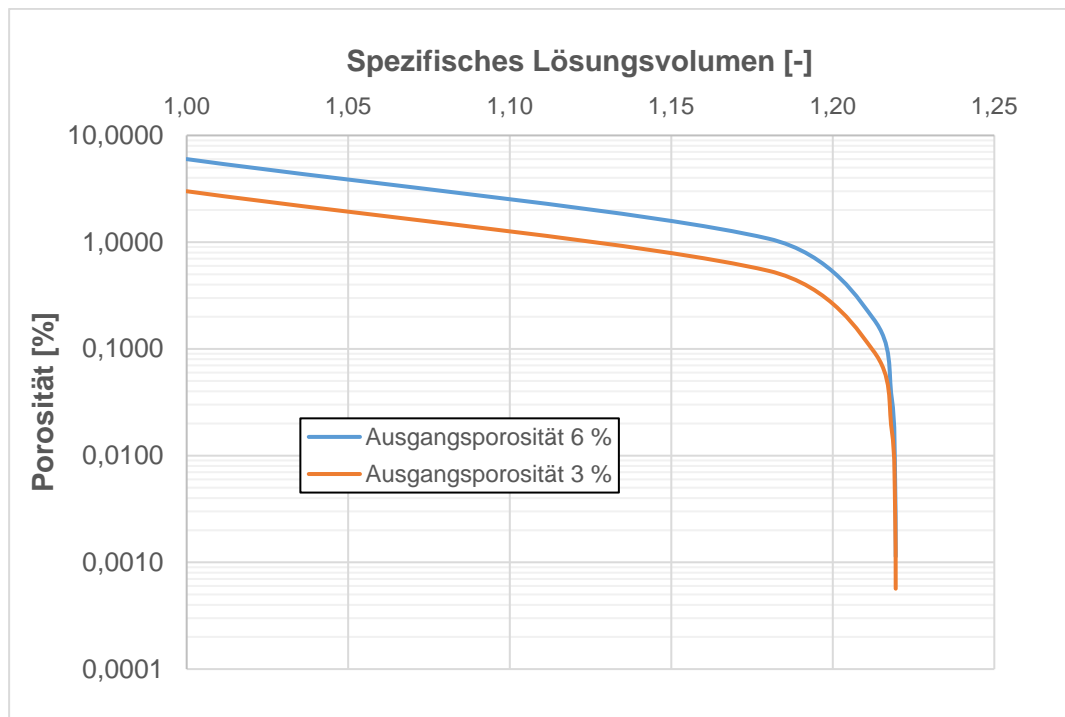


Abbildung 166: Abhängigkeit der Porosität im MgO-Beton der Rezeptur D4 in Abhängigkeit von der Menge an eingedrungener Lösung

Das spezifische Lösungsvolumen ist das kumulative Lösungsvolumen, normiert auf das Ausgangsporenvolumen (Formeln (24) und (25)).

$$V_{L, \text{spez.}} = \frac{\sum V_{L,i}}{V_{P,0}} \quad (24)$$

$V_{L, \text{spez.}}$	-	Spezifisches Lösungsvolumen	[-]
$\sum V_{L,i}$	-	kumulatives Lösungsvolumen über alle Einzelstufen "i"	[cm ³]
$V_{P,0}$	-	Porenvolumen im Ausgangszustand	[cm ³]

$$V_{p,0} = n_0 \cdot V \quad (25)$$

n_0	-	Porosität des MgO-Betons im Ausgangszustand	[-]
V	-	Volumen des MgO-Betons	[cm ³]

Mit der Verringerung der Porosität verringert sich das einwirkbare Flüssigkeitsvolumen (Formel (26)). Im vorliegenden Fall strebt das spezifische Lösungsvolumen einem Wert von 1,219 entgegen. Infolge der nun rapiden Porositätsabnahme kann immer weniger Lösung in den MgO-Beton eindringen.

Eine allgemeingültige Abhängigkeit, die unabhängig von der Ausgangsporosität n_0 ist, zeigt Abbildung 167 als Abhängigkeit der relativen Porosität vom spezifischen Lösungsvolumen. Die relative Porosität ist wie folgt definiert:

$$n_{rel.} = \frac{n}{n_0} \quad (26)$$

n	- Porosität	[-]
n_0	- Porosität des MgO-Betons im Ausgangszustand	[-]

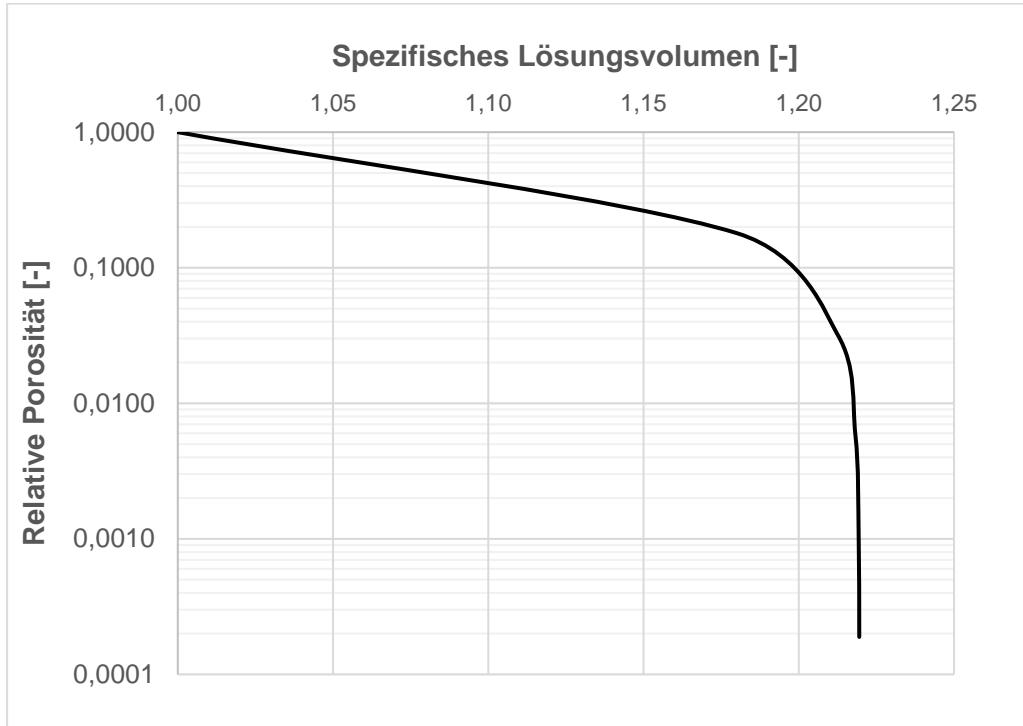


Abbildung 167: Abhängigkeit der relativen Porosität im MgO-Beton der Rezeptur D4 in Abhängigkeit von der Menge an eingedrungener Lösung

9.4 Beschreibung einer Spaltströmung

Der Volumenstrom einer Flüssigkeit kann sowohl als Strömung durch einen porösen Festkörper als auch als Strömung durch einen Spalt dargestellt werden. Für einen gleichen Volumenstrom dieser Phänomene erhält man folgenden Ausdruck.

$$\dot{V} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta p}{\eta_{FI} \cdot L} = \frac{b^3 \cdot h \cdot \Delta p}{12 \cdot L \cdot \eta_{FI}} \quad (27)$$

\dot{V}	- Volumenstrom	[m ³ /s]
k	- Permeabilität	[m ²]
A	- durchströmte Querschnittsfläche	[m ²]
Δp	- Druckdifferenz	[Pa]
b	- Rissbreite	[m]
h	- Risshöhe	[m]
L	- durchströmte Länge	[m]
η_{FI}	- dynamische Viskosität der Lösung	[Pas]

Nach Auflösung der Gleichung nach der Rissbreite b erhält man folgende Formel.

$$b = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot k \cdot A}{h}} \quad (28)$$

In diesem Fall müssen Annahmen für die Ausdehnung des Risses h innerhalb der durchströmten Querschnittsfläche getroffen werden. Dabei ist eine eindeutige Lösung nicht möglich. Ein weiteres Problem ist, dass der Ansatz (27) für einen äquivalenten Volumenstrom in Bezug zur Querschnittsfläche gilt. Dies bedeutet, dass nach Gleichung (28) bei einer größeren Querschnittsfläche A zwangsläufig kleinere Permeabilitäten (bei gleichem Volumenstrom) erhalten werden. Somit ist es schwierig aus der Beziehung (28) eine absolute Beziehung zwischen einer Rissgeometrie (b , h) und der zutreffenden Permeabilität zu erhalten.

Deshalb ist es vorteilhafter, die durch die Änderungen der Rissbreite bedingten Änderungen der Permeabilität wie folgt auszudrücken.

$$\frac{k_1}{k_0} = \left(\frac{b_1}{b_0}\right)^3 \quad (29)$$

k_0	-	Ausgangsporeabilität	[m ²]
k_1	-	sich einstellende Permeabilität, $k_1 < k_0$	[m ²]
b_0	-	Rissbreite im Ausgangszustand	[μm]
b_1	-	verringerte Rissbreite	[μm]

Hierbei bezieht sich der Index "0" auf den Ausgangszustand und der Index "1" auf einen veränderten Zustand, im vorliegenden Fall um verringerte Rissbreiten und eine verringerte Permeabilität.

Durch Umformung der Gleichung (29) wird Gleichung (30) erhalten, welche die Beziehung der sich im Ergebnis der Verringerung der Rissbreite einstellenden geringeren relativen Permeabilität ausdrückt.

$$\frac{k_1}{k_0} = \left(1 - \frac{\Delta b}{b_0}\right)^3 \quad (30)$$

Δb	-	Verringerung der Rissbreite $b_0 - b_1$	[μm]
------------	---	---	------

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 168 dargestellt.

Es zeigt sich, dass eine große Verringerung der relativen Permeabilität vor allem bei geringen Ausgangsrissbreiten b_0 erreicht wird.

Eine Verringerung der Rissbreite $\Delta b = 0,464 b_0$ bewirkt eine Verringerung der Ausgangsporeabilität um eine Zehnerpotenz ($k_1/k_0 = 0,1$).

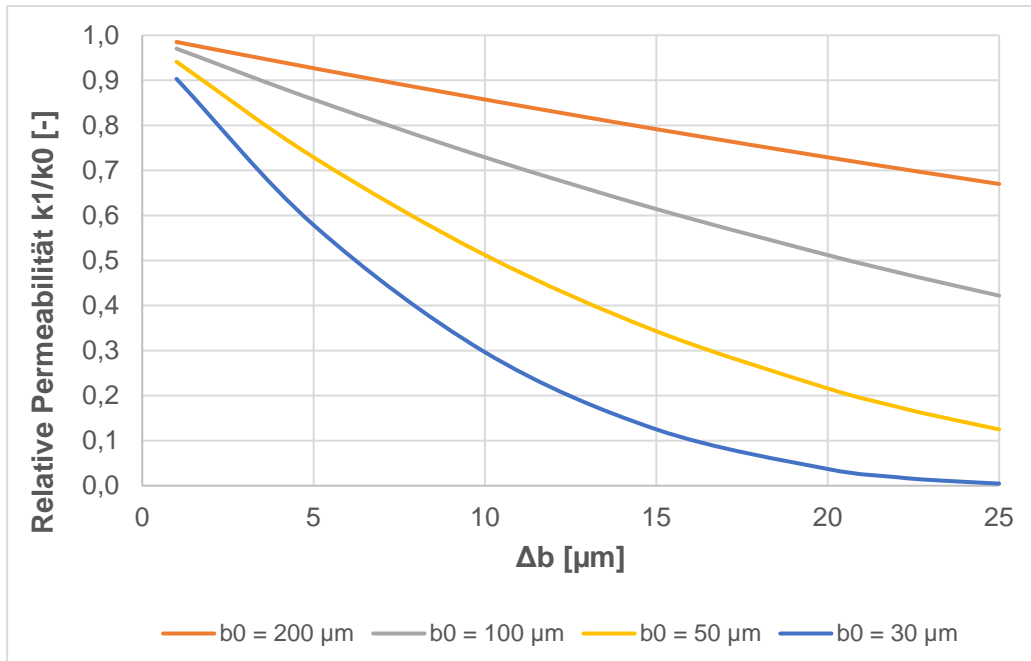


Abbildung 168: Änderung der relativen Permeabilität in Abhängigkeit von der Verringerung der Rissbreite Δb bei unterschiedlichen Anfangsspaltbreiten b_0

9.5 Änderung der Permeabilität durch Verringerung der Porosität

Um die Änderung der Permeabilität bei einer Änderung der Porosität abzuschätzen, ist eine mathematische Beziehung zwischen der Porosität und der dabei zu erwartenden Permeabilität. Dafür sind rein empirische Beziehungen und Herleitungen mit physikalischem Hintergrund bekannt.

Empirische Gleichungen haben den Vorteil, dass sie nur die Messgrößen Porosität und Permeabilität einschließen. Bewährt hat sich der lineare Zusammenhang Porosität – $\log(\text{Permeabilität})$, nach dem die meisten Messwerte gefittet werden. Für den MgO-Baustoff ist die Datenbasis noch zu klein, um derartige Beziehungen aus Messwerten ableiten zu können. Noch nicht geklärt ist auch, ob der Geltungsbereich der Gleichungen (27) und (28) sich auch auf relativ geringe Porositäten erstreckt. In [AU32] werden sowohl Messdaten als auch Modellergebnisse gezeigt, die darauf hinweisen, dass für bestimmte Gesteine (in der Regel Sandstein) ab einer Porosität $< 10\%$ die Gerade $\log(k) = a + b \cdot n$ mit einem geringeren Anstieg verläuft. Der Bereich des „Knickpunktes“ der Gerade liegt meist bei einer Porosität von ca. 10% . Bei Sandstein ist bei einer Porosität von 10% die Permeabilität $k > 10^{-19} \text{ m}^2$ [AU32].

Für den MgO-Baustoff gibt es keine derartig systematischen Daten, die auf Basis von Durchströmungsversuchen mit inerten Fluiden an einer Probenserie mit Variation der Porosität eine Abhängigkeit der Permeabilität zeigt. Deshalb kann auch nicht gesagt werden, ob eine Beziehung $\log(k) = f(n)$ für MgO-Baustoff in unterschiedlichen Porositätsbereichen mit unterschiedlichen Anstiegen verläuft.

Andererseits liegt die Porosität für MgO-Baustoff in einem relativ engen Bereich bei $< 10\%$, sodass wahrscheinlich in diesem Bereich von einer einfachen linearen Beziehung $\log(k) = f(n)$ ausgegangen werden kann. Die Konsequenzen einer Verringerung der Porosität auf die Verringerung der Permeabilität könnten daraus abgeleitet werden, wenn diese Beziehung bekannt wäre. Allerdings zeigen die vorliegenden Gefügeuntersuchungen, dass die Porenraumgeometrie von MgO-Beton im Gegensatz zu Sandstein (aus Körnern bestehend) deutlich komplexer ist, da die Bindemittelphase (Sorelphasen) nadelförmig, feinverfilzt und verwachsen vorliegt.

Nichtempirische Gleichungen basieren meist auf der Carman-Kozeny-Gleichung, die neben den Fluideigenschaften auch die Eigenschaften des durchströmten Körpers berücksichtigt. Dabei ist neben der Porosität die Kenntnis weiterer Feststoffparameter (z.B. hydraulisch wirksamer Partikeldurchmesser, Tortuosität, spezifische Oberfläche) erforderlich. Deshalb stellt sich die Frage, wie diese Parameter richtig bestimmt oder richtig ausgewählt werden können [AU33].

Messungen mittels Quecksilberporosimetrie und CT-Untersuchungen haben gezeigt, dass nicht die Gesamtporosität der entscheidende Parameter für die Permeabilität ist, sondern der Anteil und die Größe der hydraulisch wirksamen Poren, d. h. der größten Poren, die miteinander verbunden sind.

Aus jeder Porengrößenverteilung resultiert formell eine Permeabilitätsverteilung. Im Gefüge des MgO-Baustoffs kann die Porosität unterschiedlich verteilt sein. Geometrisch wirken Parallel- und Reihenschaltung unterschiedlich permeabler Zonen zusammen, die die Gesamtpermeabilität bestimmen. Dabei wird konservativ die Gesamtpermeabilität durch die höchste Einzelpermeabilität dominiert. Dies entspricht der Permeabilität der größten Poren unter der Voraussetzung, dass diese miteinander verbunden sind.

Sind diese Poren nicht miteinander verbunden, kann die Gesamtpermeabilität in einer Reihenschaltung durch die niedrigere Einzelpermeabilität einer Zone mit geringeren Porenradien gedrosselt werden. Die geometrische Anordnung von Poren unterschiedlicher Größen und somit unterschiedlicher Permeabilität erschwert eine eindeutige Zuordnung.

Weiterhin kann nach dem Perkulationsmodell ein Zusammenhang zwischen einer Permeabilität des Festkörpers und der Geometrie der sich durch den Flüssigkeitsdruck in diesem Körper öffnenden Wegsamkeiten oder der Korngröße als Gefügeparameter beschrieben werden [AU34]. Das Perkulationsmodell wird beispielsweise bei Steinsalz verwendet. Ob es für den MgO-Baustoff angewendet werden kann, ist offen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Vorgeschichte und Ziel von MgO-SEAL

Im Rahmen des FuE-Vorhabens 02C1204 (Projekt CARLA II) wurde 2006 das Abdichtbauwerk GV2 aus MgO-Spritzbeton im Carnallitgebirge in der Grube Teutschenthal errichtet. Nach mehrjähriger Stand- und Reifezeit wurden nun während des FuE-Projektes MgO-SEAL die Arbeiten und Untersuchungen an dem ca. 10 m langen Dammbauwerk GV2 weitergeführt. Versuchsziel des Vorhabens MgO-SEAL war es, das chemische, geomechanische und geohydraulische Langzeitverhalten des MgO-Spritzbetonbauwerkes (mit 8 Jahren Reifezeit) bei bzw. nach Lösungskontakt im Maßstab eines realen Bauwerkes zu quantifizieren und zu bewerten. Dies wird für einen (Langzeitsicherheits-)Nachweis der Integrität von Verschlusselementen aus MgO-Beton für zukünftige HAW-Endlager im Salinar benötigt.

Bohrungen

Es wurden 11 bis zu 6 m lange Bohrungen in das GV2-Bauwerk abgeteuft, aus denen vollständige MgO-Betonkerne gewonnen wurden. Besonderes Augenmerk wurde auf die Betonierabschnittsgrenzen zwischen den einzelnen Spritzschichten als eine mögliche mechanisch-hydraulische Schwachstelle gelegt. Die Betonierabschnittsgrenzen wurden in den Bohrlöchern mittels Kamerabefahrung und an den Kernen optisch und durch Festigkeitsprüfungen untersucht. Die Betonierabschnittsgrenzen sind häufig in den Kernen an einem etwas geringeren Kiesanteil und einem höheren Feinanteil zu erkennen. Auch wenn die Kerne an einigen Betonierabschnittsgrenzen beim Bohren gebrochen sind, sind die Betonierabschnittsgrenzen jedoch nicht zwangsweise mit Schwachstellen gleichzusetzen. Mit Ultraschall-Laufzeitmessungen in Bohrlöchern wurde die Homogenität des Spritzbetons indirekt gemessen. Die Wellengeschwindigkeit lag zwischen 2250 m/s und knapp 2400 m/s.

Baustoffrezeptur und Phasenbestand

Das GV2-Bauwerk besteht aus 15,6 M-% MgO der Fa. Styromag, 11,4 M-% R-Lösung, 73 M-% Sand/Kies-Zuschlag mit 8 mm Größtkorn. Bei dieser Rezeptur bildet sich nach dem Abbinden die 5-1-8-Phase ($5 \text{ Mg(OH)}_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{ H}_2\text{O}$) neben unreaktiertem MgO. Der Baustoff ist im abgebundenen Zustand trocken (Feuchtegehalt unter 0,1%). Die gesamte R-Lösung wurde beim Abbindeprozess verbraucht.

Eingesetzte Lösungen

Für die Untersuchungen des MgO-Spritzbetons kamen drei verschiedene Lösungen zum Einsatz:

- Lösung 1: reine, gesättigte NaCl-Lösung
- Lösung 2: NaCl-gesättigte, MgCl_2 -haltige Lösung (2 molal MgCl_2)
- Lösung 3: $\text{MgCl}_2/\text{CaCl}_2$ -Lösung (2,3 - 2,6 molal MgCl_2 / 5,2 - 5,6 molal CaCl_2)

Untersuchung der Bohrkerne

Die Bohrkerne wurden detailliert aufgenommen. Von einzelnen Stücken wurden Dünnschliffe angefertigt und mittels Auflicht- und Durchlichtmikroskopie untersucht. Von Interesse war hier vor allem auch, wie das bei der Herstellung des GV2-Bauwerkes verwendete Injektionsmaterial (2K-Bitumen und Epoxidharz Denepox 40) verhielt. Dabei zeigte sich, dass das Epoxidharz auch mehrere Millimeter bis Zentimeter in die Auflockerungszone um das Bauwerk eingedrungen war.

Proben aus den Bohrkernen wurden bei unterschiedlicher Luftfeuchte gelagert und die Massenaufnahme bzw. -abnahme bestimmt.

Des Weiteren wurden Proben in den drei Versuchslösungen gelagert und das Verhalten der Proben beobachtet sowie die Massen- und Volumenänderung bestimmt. Da die Proben nicht eingespannt waren, führte die Lagerung in den Lösungen 1 und 2 planmäßig zu einer Volumenzunahme und Rissbildung, da sich die 5-1-8-Phase in 3-1-8 Phase umwandelt. Nur bei Angriff von Lösung 3 traten nach 2500 h keine Risse in den Proben auf.

Trocknung von Proben

Für die Ermittlung der Trockendichte, der Porosität und des Sättigungsgrades mussten die Proben getrocknet werden. Eine Trocknung ist nur bei 25°C und 32,5% relativer Luftfeuchtigkeit sinnvoll. Eine Trocknung bei 105°C, wie häufig getrocknet wird, ist nicht sinnvoll, da dabei teilweise das hydratgebundene Wasser der Bindemittelphase miteingefasst wird und damit zu hohe Feuchtegehalte festgestellt werden.

Reindichte, Trockendichte, Porosität und Sättigung von Bohrkernen

Die Reindichte von Bohrkernproben lag in der Größenordnung von 2,34 g/cm³ und die Trockendichte bei etwa 2,24 g/cm³.

Die Porosität wurde aus der Dichte berechnet und zusätzlich über Quecksilberporosimetrie bestimmt. Die totale Porosität, berechnet aus der Dichte, schwankt zwischen etwa 3% und 7% und ist damit sehr gering. Bei der Quecksilberporosimetrie wurden verschiedenen Porosimeter verwendet, mit denen Poren mit einem Durchmesser bis 100 nm, 300 nm und 900 nm eingeschlossen werden konnten. Im Ergebnis der Quecksilberporosimetrie wurden Poren zwischen 3% und 6% mit einem Porendurchmesser zwischen 7 nm und 100 nm ermittelt. Der Porenanteil mit Porendurchmessern zwischen 100 nm und 900 nm beträgt unter 1% und ist damit sehr klein. Insgesamt stimmt die Porosität, ermittelt aus der Dichte und gemessen mittels Quecksilberporosimetrie, gut überein. Es konnte nicht festgestellt werden, dass die Porosität im Bereich von Betonierabschnittsgrenzen höher ist. Zudem änderte sich die Porosität über die Bohrlochteufe nicht. Dies belegt, dass der Spitzbeton in Bezug auf die Porosität relativ homogen hergestellt wurde.

Die Sättigung der Proben lag unter 0,5%, festgestellt durch Trocknung bei 25°C und 32,5% relativer Luftfeuchte. Der Baustoff war damit praktisch trocken.

Überbohren einer Bohrung, in der in-situ-Permeabilitätstests stattfanden

Die Bohrung B34 (Durchmesser 70 mm) wurde mit einem Kernrohr mit 300 mm Durchmesser überbohrt, um die Eindringtiefe der Lösung in den Bohrlochsraum festzustellen. Da „trocken“ d.h. mit Luftspülung gebohrt werden musste, ist dies wegen der sehr hohen MgO-Betonfestigkeit extrem aufwändig und Material verschleißend. Die Eindringtiefe der Lösung in den Baustoff beträgt wenige Millimeter. Entscheidend ist, dass gemäß der Phasenanalyse am überbohrten Kern die Eindringtiefe der Lösung im Bereich einer Betonierabschnittsgrenze nicht größer war als im Inneren einer Spitzschicht.

Festigkeits- und Kriechverhalten

Das Festigkeits- und Kriechverhalten wurde an verschiedenen Bohrkernen ermittelt. Dazu wurden triaxiale Druckversuche durchgeführt. Zudem wurde die Spaltzugfestigkeit und die Zugfestigkeit an Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht und an Proben mit Betonierabschnittsgrenzen bestimmt. Des Weiteren wurde das Kriechverhalten mit zeitabhängigen Kompaktions- und Relaxationsversuchen und an Kernproben die Permeabilität unter triaxialer Einspannung ermittelt.

Die Spaltzugfestigkeit von MgO-Spitzbetonproben aus dem GV2 liegt im Mittel 9 MPa bei 6 Proben in der gleichen Größenordnung wie die Spaltzugfestigkeit von MgO-Ortbeton.

Die Haftzugfestigkeit von MgO-Spitzbeton an Betonierabschnittsgrenzen ist im Mittel mit 2,8 MPa relativ gering. Teilweise lag die Haftzugfestigkeit bei null. Die Haftzugfestigkeit an Proben mit Betonierabschnittsgrenzen war teilweise geringer als aus dem Inneren einer Spritzschicht.

Die Haftzugfestigkeitsergebnisse wiesen zudem eine höhere Streuung auf als die Zugfestigkeit an Proben ohne Betonierabschnittsgrenzen. Die Zugfestigkeit der MgO-Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht liegt in der gleichen Größenordnung wie die Zugfestigkeit von MgO-Ortbeton-Proben. Einzelne Proben sind beim Bohren auch an Betonierabschnittsgrenzen gebrochen. Es sind aber auch Proben durch die Beanspruchung beim Bohren im Inneren einer Spritzschicht gebrochen.

Bei den Kompaktionsversuchen wurde festgestellt, dass sich der Spritzbeton sehr steif verhält, so dass zeitabhängige Kompaktionsprozesse („Kompaktionskriechen“) weitgehend vernachlässigbar sind.

Insgesamt hat der MgO-Spritzbeton mit 5-1-8-Phase eine hohe Festigkeit (einaxiale Druckfestigkeit > 80 MPa) und ein vernachlässigbares zeitliches Verformungsverhalten (kein Kriechen).

Permeabilität mit Gas an Bohrkernen und in situ

Weiterhin wurden an den Bohrkernen und in situ in den Bohrlöchern die Permeabilität mit Gas (und mit (MgCl₂-haltiger) NaCl-Lösung; siehe nächster Absatz) zeitabhängig gemessen. Die Gaspermeabilität betrug zwischen $1,9 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $8,0 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$. An den Kernen wurden dabei eine geringere Permeabilität gemessen als in situ im Bohrloch. Prüfbereiche mit Betonierabschnittsgrenzen (in situ und im Kern) hatten jeweils eine höhere Permeabilität. Die integrale Permeabilität (gemessen mit Gas) bei den Bohrungen B41 und B44 betrug über eine Bohrlochlänge von etwa 3,1 m $1,9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$. Im Bereich von Betonierabschnittsgrenzen wurden in situ eine Permeabilität mit Gas zwischen $1,9 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $1,9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ ermittelt.

Permeabilität mit Lösung an Bohrkernen und in situ

Die Permeabilität, gemessen mit (MgCl₂-haltiger) NaCl-Lösung, lag sowohl bei den Kernproben als auch in situ bei etwa $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bis $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Die Lösungsp permeabilität in situ verringerte sich über den Messzeitraum um eine halbe Zehnerpotenz. Die Bohrungen B38 und B39 reichten bis zum Widerlagerzahn. Bei diesen deutete ein Lösungsverlust beim Befüllen der Bohrungen auf lokale Fehlstellen hin. Die anfangs gemessene Lösungsp permeabilität ($k_{\text{integral}} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bzw. $k_{\text{integral}} \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) verringerte sich über einen Zeitraum von etwa 800 Tagen um mehr als 4 Größenordnungen bis in den Bereich $k_{\text{integral}} \leq 10^{-19} \text{ m}^2$. Dieser Wert entspricht dem integralen Permeabilitätsniveau des kompakten MgO-Betons. Dies zeigt, dass sich MgO-Spritzbeton durch Phasenumwandlung selbst abdichten kann. Diese Porositätsverringerung bei Lösungszutritt wurde auch rechnerisch modellhaft beschrieben. Aus den injizierten Lösungsvolumina wurde eine theoretische radiale Eindringtiefe der Lösung in den MgO-Beton von ca. 8 cm abgeschätzt, wobei angenommen wird, dass an den Betonierabschnittsgrenzen die Eindringtiefe eher höher ist.

Phasenanalytische Untersuchung der Kernproben

Einige Kernproben wurden phasenanalytisch untersucht, um die Reaktionen zwischen MgO-Baustoff und den verwendeten Versuchslösungen festzustellen.

Lösungsdruckbeaufschlagung Gesamtbauwerk

Ein weiteres großes Arbeitspaket bestand in der Druckbeaufschlagung des Bauwerkes mit MgCl₂/CaCl₂-Lösung über die Druckkammer. In insgesamt 17 einzelnen Druckbeaufschlagungen wurde ein Druck zwischen 0,4 bar und 28,4 bar aufgebracht und über mehrere Tage bis Monate konstant gehalten. Die in 7,1 m Entfernung zur Druckkammer installierten Feuchte-sensoren detektieren mehrmals wechselweisen Flüssigkeitszutritt bzw. Austrocknung. Etwa 16 Monate nach der Befüllung der Druckkammer trat erstmals Lösung an der Luftseite hervor. Die in zwei Messebenen am Widerlagerzahn verbauten Flächendruckgeber reagierten auf die jeweiligen Druckbeaufschlagungen mit Druckanstiegen. Bei Drücken größer 12 bar in der Druckkammer stieg der Druck in der Druckkammer-näheren Messebene auf das gleiche Niveau wie in der Druckkammer an. Es fand damit kein Potenzialabbau statt. Aus den im Bericht dargelegten Gründen wurde das Fluidruckkriterium (Fluidruck $p_{\text{fl}} < \text{kleinere Hauptspannung } \sigma_{\text{min}}$) bei der Druckbeaufschlagung planmäßig nicht eingehalten.

Nach der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung und einer möglichst langen Einwirkzeit der Salzlösung ist ein Teil-Rückbau des GV2-Bauwerkes vorgesehen. Dieser wurde bereits im Zuge des Projektes MgO-SEAL geplant.

Vorschläge zur Verbesserung der Spritzbetonrezeptur

Es wurden Vorschläge zur Verbesserung der Spritzbetonrezeptur erarbeitet, mit dem Ziel die Dicke der Spritzbetonschichten (bisher 10 cm) zu vergrößern und damit die Anzahl der Betonierabschnittsgrenzen zu verringern. Dazu wurde ein MgO der Fa. Lehmann & Voss verwendet und die Viskosität der Bindemittelsuspension im Rheometer bestimmt, sowie Handhabungsversuche zur Einschätzung der „Klebrigkeit“ des MgO-Spritzbetons durchgeführt. Des Weiteren wurden Feinsalz und Schmelzbasaltfasern zur Erhöhung der Klebrigkeit getestet. Die zeitnahe Erhöhung der Viskosität, die indirekt auf eine Vergrößerung der Klebrigkeit hindeutet, war jedoch nur gering bis nicht vorhanden. Des Weiteren wurden die Druckfestigkeit, die Zugfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und die Zugfestigkeit von MgO-Betonproben auf Steinsalz an Proben nach 3, 7 und 28 Tagen mit und ohne Schmelzbasaltfasern bestimmt. Es wird eine weitere Rezepturanpassung mit einem MgO mit höherem Talkanteil vorgeschlagen (MgO der Fa. Styromag).

Aufgabenstellung für eine geeigneten chemo-hydro-mechanischen Nachweis bei MgO-Spritzbeton mit 5-1-8-Phase

Permeabilitätstests über 800 Tage im Bohrloch haben gezeigt, dass sich sowohl bei einer Beaufschlagung mit Lösung 1 als auch mit Lösung 2 die Permeabilität mit der Zeit auf kleiner 10^{-19} m^2 verringert. Ursache ist die Umwandlung der 5-1-8-Phase in die 3-1-8-Phase bei Volumenzunahme und damit einhergehender Abnahme der Porosität, wenn das Bauwerk eingespannt ist. Mit der Porosität nimmt gleichzeitig die Permeabilität ab. Diese Abnahme der Permeabilität mit der Zeit sollte im Rahmen eines chemo-hydro-mechanischen Nachweises eines Verschlussbauwerkes berücksichtigt werden. Für die Abnahme der Porosität bzw. der Permeabilität mit der Zeit wurde ein entsprechender Algorithmus entwickelt.

Planung des Rückbaus des Bauwerkes GV2

Während der Projektlaufzeit konnten nicht alle Fragestellungen umfassend betrachtet und beantwortet werden und es ergaben sich neue Fragestellungen. Ein Teil des Bauwerkes soll deshalb zurück gebaut bzw. seitlich freigelegt werden. Es ist geplant, vier Bohrlöcher zu überbohren und zwei weitere radiale Bohrungen abzuteufen. So sollen Veränderungen des MgO-Betons infolge des Lösungskontaktes festgestellt werden. Des Weiteren soll das Bauwerk detailliert beprobt und untersucht werden.

Da die Betonierabschnittsgrenzen potenzielle Schwachstellen bilden, sollten in einem realen Dammbauwerk möglichst wenige Betonierabschnittsgrenzen vorhanden sein. Während des laufenden Projektes MgO-SEAL wurden dazu bereits erste Ansätze diskutiert, um die Spritzschichtdicke zu erhöhen und den Rückprall zu verringern. In weiteren Arbeiten soll die Spritzbetonrezeptur mit dem Ziel angepasst werden, die Frühfestigkeit zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- [AU1] Freyer, D.; Gruner, M. & Popp, T. (2015). Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs. Freiburger Forschungshefte E 15, TU BA Freiberg, ISBN 978-3-86012-516-8.
- [AU2] Teilbericht 4.2 zum Vorhaben CARLA: „In situ Tests zur Eignungsprüfung der entwickelten Behandlungskonzepte“ IBeWa, 15.12.2010.
- [AU3] Teilbericht 4.1 zum Vorhaben CARLA: „Untersuchungen zur Abdichtung der Kontaktzone und des unmittelbar daran anschließenden Gebirgsbereiches (ALZ) in der Einbauzone“ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 30.12.2010.
- [AU4] Teilbericht 7 zum Vorhaben CARLA: „Errichtung und Test von Funktionselementen; Großversuche GV1, GV2 und GV3“ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 03.12.2010.
- [AU5] Zusammenfassender Abschlussbericht zum Vorhaben CARLA: „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV“ vom 31.12.2010.
- [AU6] Teilbericht 2 zum Vorhaben CARLA: „Auswahl der Einbaustandorte für die einzelnen zu untersuchenden Funktionselemente des komplexen Absperrbauwerkes“ K-UTEC, IBeWa, IfG, 30.06.2010.
- [AU7] Teilbericht 3.1 zum Vorhaben CARLA: „Entwicklung eines interdisziplinären Messkonzeptes zum Nachweis der geplanten Eigenschaften der Dammbaumaterialien und des Umgebungsgesteins sowie ihres Verhaltens im Zeitverlauf“ IfG, 31.08.2010.
- [AU8] Teilbericht 6 zum Vorhaben CARLA: „Modellberechnungen für das Komplettbauwerk“ IfG, 31.08.2010.
- [AU9] IBeWa: „MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von Salzlösungen – Bohrprogramm“, 05.02.2016
- [AU10] Salzer, K., Phillip, J., Popp, T., Wiedemann, M., Schleinig und Tonn, F. (2017). In-situ-Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Bohrlochwellen zur Charakterisierung von Auflockerungszonen. Kali & Steinsalz, Heft 01/2017, 28 – 37
- [AU11] IBeWa: Präsentation zum 43. Projektgespräch CARLA, 02.07.2009
- [AU12] Teilbericht 5 zum Vorhaben CARLA: „Labor- und In-situ-Untersuchungen zu den im Konzept aufgeführten Verschlusselementen und Materialien – MgO-Beton“ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 31.12.2010.
- [AU13] Arifin, Y. F. (2008): Thermo-Hydro-Mechanical Behavior of Compacted Bentonite-Sand Mixtures: An Experimental Study. Dissertation. Bauhaus-University Weimar.
- [AU14] IBeWa (2011-2020): Laboruntersuchungen zur Qualitätssicherung von Sorelbeton. IBeWa-Ingenieurpartnerschaft im Auftrag der Asse GmbH und der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (unveröffentlicht)
- [AU15] Lobo, V. M. M.; Quaresma, J. L. (1989): Handbook of Electrolyte Solutions, Part B, Elsevier Science Publishers, Vol. 41, ISBN 0-444-98947-5.
- [AU16] Sachs, L.: Angewandte Statistik, Planung und Auswertung, Methoden und Modelle. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 5. Aufl., ISBN 0-387-6443-5, 1973
- [AU17] DIN 66133: „Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion“, Juni 1993.
- [AU18] Wenkel, S.; Bauermeister, J. Langefeld, O. (2018): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des
-

- Kontaktbereiches Phase II: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, Förderkennzeichen: 02E11597, TU Clausthal – Institut für Bergbau, im Druck.
- [AU19] Herold G. (1999): Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineralsauren Wässern, Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe Heft 36, Universität Karlsruhe, Dissertation.
- [AU20] Klopfer, H. (1974): Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen Wiesbaden.
- [AU21] Liesgang D. (1991): Zur Korrosionssicherheit des einbetonierten Bewehrungsstahls in Abhängigkeit von der Permeabilität des Betons; Dissertation.
- [AU22] Sosoro M. (1995): Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, 3-410-65.
- [AU23] Eberhardt W. (1995): Zusammenhänge zwischen Struktur und Dichtheit von Beton, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Dissertation.
- [AU24] Ercosplan (2014): Sorelbetone - Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten. Autoren: Lehmer, B. & Müller, D., unter Mitarbeit von: Freyer, D. (IfAC), Gutsch, A.-W. (MPA Braunschweig), Popp, T. (IfG). EGB 11-014.N01 (Stand: 15.06.2014).
- [AU25] Knöfel, S. (2017). Gebirgsmechanische Untersuchungen im Rahmen des BMWi Projektes „MgO-SEAL“. Studienarbeit am Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik der TU BAF, Freiberg, 20.01.2017.
- [AU26] Popp, T., Salzer, K., Weise, D. & Wiedemann, M. 2010. Hydraulische Barrierenintegrität von carnallititischen Salzgebirge, Kali und Steinsalz, Heft 2/2010, 16 – 23.
- [AU27] Topp, G. C.; Davis, J. L.; Annan, Aa. P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water resources research, 16. Jg., Nr. 3, S. 574-582.
- [AU28] Popp, T., Freyer, D., Rölke, C. & Gruner, M. (2018): Geochemical and hydro-mechanical characterization of MgO-based (“Sorel”) building materials for engineered barrier systems (EBS) in salt formations. In: The Mechanical Behavior of Salt IX; Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14 September 2018 (ISBN 978-3-9814108-6-0), 305-320.
- [AU29] Abschlussbericht: Weiterentwicklung eines TDR-Messverfahrens zur Quantifizierung von Feuchte- und Dichteverteilungen in Bentonitversuchsbauwerken; Förderkennzeichen: 02C1064.
- [AU30] Kupfer, Klaus (Hg.) (2005): Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10129459>, S.318.
- [AU31] Wendling, R.: QS-Programm zur Sicherstellung der Baustoffeigenschaften von Sorel-beton A1 für Strömungsbarrieren. Fachgespräch „Verschlussysteme – Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung“ Freiberg, 03.-04.05.2017, Materialienband, S. 340 – 362.
- [AU32] Pape, H; Clauser, Chr.; Iffland, J.: Permeability prediction based on fractal pore-space geometry. Geophysics (1999) Nr. 5, p. 1447 – 1460.
- [AU33] Kuhlmann, K.L.; Matteo, E.N.: Porosity and permeability: literature review and summary. Mechanical Behaviour of Salt IX, 2018, Proceedings (ISBN 978-3-9814108-6-0), p. 291 – 303.

- [AU34] Sinn, C.J.A.; Giacomel, P.; Peach, C.J.; Hangx, S.J.T., Spiers, Chr. J.: Effekt of plastic deformation on the transport properties of rocksalt. Mechanical Behaviour of Salt IX, 2018, Proceedings (ISBN 978-3-9814108-6-0), p. 101 – 120.
- [AU35] Mezger, T.G.: Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. Vincentz Network, Hannover, 2016.
- [AU36] Thermo Fisher Scientific: Betriebsanleitung HAAKE MARS, Version 1.4.
- [AU37] Kulenkampff, J.: μ CT-Voruntersuchungen GV2. Unterlagen zur 10. Projektsitzung des Vorhabens MgO-SEAL. 26.4.2018.
- [AU38] Maidl, B.; von Diekem, U.: Frühfestigkeit von Spritzbeton. Untersuchungen im Spritzbetonversuchsstand. Beton (1988) Nr. 7, S. 271 – 273.
- [AU39] Sika Spritzbeton – Handbuch. Sika Schweiz AG, 4. Ausgabe 02/2012.
- [AU40] Mohajerani, A.; Rodrigues, D.; Ricciuti, Chr.; Wilson, Chr.: Early-Age Strength Measurement of Shotcrete. Journal of Materials (2015), <http://dx.doi.org/10.1155/2015/470160>
- [AU41] Knabe, Ph.: Vergleich der Druck- und Zugfestigkeit unterschiedlicher MgO-Betonrezepturen. Studienarbeit, Studienrichtung Bergbau, TU Bergakademie Freiberg, 31.3.2019, unveröffentlicht.

Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
AP	Ansatzpunkt
BAG	Betonierabschnittsgrenze
CT	Computertomographie
DB	Druckbeaufschlagung
DK	Druckkammer
Fa.	Firma
F _R	relative (Luft-) Feuchtigkeit
FS	Feinsalz
GV	Großversuch
HAW	hoch radioaktiver Abfall ("high active waste")
HVZ	Haftzugversuch
KAB	Konturabstand
KS	Kernstück
LD	Luftdruck
ME	Messebene
MP	Messpunkt
OK	Oberkante
OM	Optische Mikroskopie
PV	Pneumatischer Vortest
SZ	Spaltzugversuch
TC	Triaxialer Kompressionsversuch
TCMS	Triaxialer Mehrstufen-Kompressionsversuch
UK	Unterkante
VWZ	Verwitterungszone

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage und Anordnung der in situ Großversuche GV1, GV2 und GV3 am Versuchsort (Grundriss)	11
Abbildung 2:	Versuchsbauwerk GV1 im Profilschnitt	12
Abbildung 3:	Versuchsbauwerk GV2 im Profilschnitt	13
Abbildung 4:	Permeabilität bei PV 1 bis PV 15	16
Abbildung 5:	Druckabfallkurven bei den pneumatischen Vortests beim GV2	16
Abbildung 6:	Tracergasaustritte beim PV 15	17
Abbildung 7:	Tracergasaustritte beim PV 16	17
Abbildung 8:	verwitterte Kontur [AU6]	20
Abbildung 9:	Entwicklung des Kontaktdruckes und der Temperatur beim GV2-Bauwerk seit Messbeginn (20.10.2008) bis zum 30.12.2016.....	21
Abbildung 10:	Entwicklung der Kontaktdrücke im GV2-Bauwerk nach Wiederaufnahme der in situ-Arbeiten seit März 2016 sowie die Messwerte für Feuchte-, Temperatur und Luftdruckänderungen. Das Inset zeigt die Messposition der Druckkissen im Bereich des Zahns.	23
Abbildung 11:	Ansicht der Ortsbrust des GV2 mit Lage der Bohransatzpunkte.....	24
Abbildung 12:	Längsschnitt zu den Bohrungsverläufen	25
Abbildung 13:	Kernfotos der Bohrung B40 mit Probenahmebereichen.....	29
Abbildung 14:	Kernfotos der Bohrung B41 mit Probenahmebereichen.....	30
Abbildung 15:	Kernfotos der Bohrung B44 mit Probenahmebereichen.....	30
Abbildung 16:	Synthese aus Beobachtungen der (li.) Video-Kamera-Befahrung und (re.) Ultraschall-Vermessung: Geschwindigkeitsverlauf entlang der Bohrung B39.	31
Abbildung 17:	Messprinzip der neu-entwickelten Ultraschallsonde mit ihren Kenndaten (links) sowie die für den Bohrlocheinsatz vorbereitete Sonde mit den drei Messköpfen (rechts).....	32
Abbildung 18:	Auswertung Ultraschallmessungen in B39	33
Abbildung 19:	GV2-Ortsbrust und angrenzendes Salzgebirge mit krustenartigen Überwachungen, welche phasenanalytisch an Bohrkernen und Bruchstücken untersucht wurden.	35
Abbildung 20:	Diffraktogrammausschnitte nach Messungen am Bruchstück der Verkrustung auf dem Salzgebirge in Kontakt mit dem GV2 (Probestück rechts unten in Abbildung 19).	36
Abbildung 21:	REM-Aufnahmen am Bruchstück der Verkrustung auf dem Salzgebirge in Kontakt mit dem GV2 (Probestück rechts unten in Abbildung 19): Verwachsung von Chlor-artinit und Carnallit.	36
Abbildung 22:	Diffraktogrammausschnitte der luftseitigen Probenanalyse des GV2 im Vergleich mit Messungen ins Bauwerk tiefer hinein.	37
Abbildung 23:	Bohrkern mit luftseitiger Oberfläche aus GV2 mit Messlokalitäten der REM-Aufnahmen (der Bohrkern wurde für XRD und REM-Messungen zerschlagen).	37
Abbildung 24:	Diffraktogrammausschnitt zur Identifizierung des Phasenbestandes GV2 anhand von pulverisiertem Bohrkernmaterial aus B41 und B42 im Vergleich mit dem eingesetzten MgO der Fa. Styromag sowie dem Sand/Kies-Zuschlag.	38
Abbildung 25:	Kernstück mit Riss nach achsenparalleler Halbierung (B41 Kernfoto)	41
Abbildung 26:	Injizierter Rissbereich (B41 Auflichtmikroskopie)	41
Abbildung 27:	Injizierter Rissbereich (B41 Durchlichtmikroskopie)	42
Abbildung 28:	Injizierter Kontaktbereich B44 (Auflichtmikroskopie)	43
Abbildung 29:	Grenzbereich zwischen Baustoff und Gebirge in der B44 (Durchlichtmikroskopie)	43
Abbildung 30:	Injektionsharz Denepox 40 im Kontaktbereich B44 (Auflichtmikroskopie)	44
Abbildung 31:	Betonierabschnittsgrenze im Schlibbereich B44 (Auflichtmikroskopie)	44

Abbildung 32:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse an einem Probestück aus dem Übergangsbereich Bauwerk/Salzgebirge mit injiziertem Kontaktbereich (Bohrung B44).	45
Abbildung 33:	Lage der Betonierabschnittsgrenzen mit Pausen zwischen zwei Betonagen (in Tagen)	46
Abbildung 34:	Länge der Pause zwischen zwei Betonagen.....	47
Abbildung 35:	Betonierabschnittsgrenzen bzw. Trennbrüche in der Bohrung B42 (mit Klassifizierung). Die rot markierten Bereiche zwischen ca. 143 cm und 235 cm bzw. zwischen 317 cm und 362 cm wurden beim Bohren des Kerns geschädigt.....	47
Abbildung 36:	Makroskopisches Erscheinungsbild von Betonierabschnittsgrenzen an Kernmaterial der B42 (Detailaufnahmen)	48
Abbildung 37:	Ortsaufgelöste, röntgenographische Untersuchungen der optisch sichtbaren Betonierabschnittsgrenzen (BAGs) am Beispiel eines Bohrkerns aus der B44.	49
Abbildung 38:	Mittlere Massenänderung der Proben bei unterschiedlicher Luftfeuchte (Werte in Tabelle 11).	50
Abbildung 39:	Pulverdiffraktogramme der bei unterschiedlicher Luftfeuchte gelagerten Bruchproben nach Versuchsende im Vergleich zu unbehandeltem GV2-Ausgangsmaterial.....	51
Abbildung 40:	Massenänderung der Bruchproben bei Lagerung in Gegenwart konstanter relativer Luftfeuchte F_R	52
Abbildung 41:	Pulverdiffraktogramme der bei konstanter relativer Luftfeuchte gelagerten Bruchproben im Vergleich zu unbehandeltem Probematerial	53
Abbildung 42:	Relative Massenänderung der Proben bei Lagerung in den 3 Versuchslösungen	54
Abbildung 43:	Relative Volumenänderung der Proben bei Lagerung in den 3 Versuchslösungen	55
Abbildung 44:	Diffraktogrammausschnitte zur Identifizierung des Bindemittelphasenbestandes des MgO-Betons (GV2, 5-1-8 Rezeptur) vor und nach Behandlung bei 105°C für 2,5 h sowie 15 h (mit Zersetzung der 5-1-8 Phase bei 105°C wurde parallel ein Masseverlust von 9,8 % für die Bindemittelmatrix bestimmt).	58
Abbildung 45:	Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe und dem Trocknungsverfahren bei den Bohrungen B40, B41 und B44	61
Abbildung 46:	Trockendichte in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe mit unterschiedlichen Trocknungsmethoden bestimmt	63
Abbildung 47:	Reindichte in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe mit unterschiedlichen Trocknungsmethoden bestimmt	64
Abbildung 48:	Vorgehensweise für die Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen laut [AU13].....	67
Abbildung 49:	Berechnete totale Porosität in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe (für 105°C Trocknung und Trocknung bei 25°C bei 32,5% rel. Luftfeuchte)	68
Abbildung 50:	Totale Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für beide Trocknungsmethoden und Porendurchmesser bis 100 μm	70
Abbildung 51:	Porenvolumenanteil in Abhängigkeit des Porendurchmessers – Ergebnisse der Untersuchungen für beide Trocknungsmethoden und Porendurchmesser bis 100 μm	71
Abbildung 52:	Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für die Trocknung bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$ für große (gD, blau) und kleine (kD, rot) Dilatometer	72
Abbildung 53:	Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für Trocknung bei ca. 25°C und ca. $F_R = 32,5\%$ sowie maximale Porendurchmesser bis 100 μm , bis 300 μm und bis 900 μm	74

Abbildung 54:	Porosität aus Dichten und Hg-Porosimetrie in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe bei unterschiedlichen Trocknungsmethoden	75
Abbildung 55:	Berechnete Sättigung in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe (aus unterschiedlichen Trocknungsmethoden resultierend)	77
Abbildung 56:	Bohrkern der Überbohrung der B34	82
Abbildung 57:	Optische Veränderung am Beispiel der Bohrkernscheibe bei 0,4 m; links: unmittelbar nach der Herstellung (Schnitt aus Bohrkern, Abbildung 56); rechts: „vermeintliche Lösungsfront“, welche sich erst mit der Zeit auf der frisch geschnittenen Oberfläche der Scheibe gebildet hat.	82
Abbildung 58:	Zeitabhängige orts aufgelöste Phasenuntersuchungen der Lösungsfront der Bohrkernscheibe bei 0,678 m aus der Bohrung B34.	83
Abbildung 59:	Ablagerung auf dem Bohrlochinneren und zugehöriges Pulverdiffraktogramm aus Bohrung B34.	84
Abbildung 60:	Zeitabhängige orts aufgelöste Phasenuntersuchungen entlang einer Betonierabschnittsgrenze (vertikal in Probenmitte) der Bohrkernscheibe 0,678-0,782 m der B34.	85
Abbildung 61:	MOHR-COULOMB-Diagramm (σ_1 vs. σ_3) für die zwei untersuchten Proben (609-TC-MS2 und 609-TC-MS1) im Vergleich mit den Grenzkurven für Modellrechnungen für Ort- und Spritzbeton aus dem Forschungsvorhaben CARLA sowie im Vergleich mit den MOHR-COULOMB-Geraden für die MgO-Beton-Varietäten A1, B2, C3 und D4 aus Ercosplan (2014) [AU24].	89
Abbildung 62:	Spaltzug- und Haftzugfestigkeiten. (li.) Säulendiagramm mit Haftzugfestigkeiten (13 Proben, wobei bei 624-HZV1 zwei und 624-HZV2 ein zusätzlicher Zugversuch am Restkernstück durchgeführt wurde, s. Farbmarkierung); (re.) Säulendiagramm der Spaltzugfestigkeit zur Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit an Proben aus dem Inneren einer Spritzschicht (5 Proben).	90
Abbildung 63:	Isostatische Kompaktion von Spritzbetonproben aus dem GV2: Spannungs-/Verformungskurven bei schneller und langsamer Belastungsrate.	91
Abbildung 64:	Mehrphasiger Relaxationsversuch (Test Rel2). Für Erläuterung s. Text).	92
Abbildung 65:	Relaxationsverhalten von zwei Spritzbeton-Proben (609-TC/Rel1 und 2); Transformierter Spannungsverlauf vs. log Kriechrate.	93
Abbildung 66:	Zeitliche Veränderung der Lösungspermeabilität im MgO-Spritzbeton in der Bohrung B34 mit $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung [AU2]	95
Abbildung 67:	Gaspermeabilität in situ in B40, B41 und B44	97
Abbildung 68:	Gaspermeabilität von Kernproben aus den Bohrungen B40, B41 und B44	99
Abbildung 69:	Lösungspermeabilität von Kernmaterial aus den Bohrungen B40 und B41	101
Abbildung 70:	Entwicklung der Permeabilität mit Lösung 2 in Abhängigkeit von der Zeit (Messung der Gaspermeabilität vor der Befüllung des Bohrloches).	103
Abbildung 71:	Mobile Druckregelanlagen für einen Lösungsangriff mit konstantem Druck	104
Abbildung 72:	Druckhaltephase von 267 d bis 602 d nach Befüllung (B40).....	104
Abbildung 73:	Temperatur und Luftdruck am Versuchsort während der Druckhaltephase in Bohrung B40	105
Abbildung 74:	Druckhaltephase von 267 Tagen bis 427 Tagen nach Befüllung (B41) ..	106
Abbildung 75:	Orientierende Ultraschalluntersuchungen und Lagebeziehungen zu Betonierabschnittsgrenzen (senkrechte Linien = Betonierabschnittsgrenzen; farbig = Reflexionen der	

	Ultraschallmessungen; schräge gestrichelte Linien = Bohrungsverlauf B34, B40, B41).....	107
Abbildung 76:	Versuchsanordnung und Bestimmung der Gaspermeabilität bei (a) axialer und (b) radialer Durchströmung.....	108
Abbildung 77:	Gaspermeabilität einer Betonierabschnittsgrenze bei direkter, radialer Injektionsgeometrie (TC PE2).....	109
Abbildung 78:	Permeabilitätstest mit Gas (TC PE3 bzw. fortgesetzt als Fracversuch mit Salzlösung) bei radialer Durchströmung an einer Betonierabschnittsgrenze; (li.) Versuchsgeometrie und Auswertung; (re.) Schrittweise Druckbeaufschlagung unter quasi-isostatischer Einspannung.....	109
Abbildung 79:	Lösungsdruckbeaufschlagung in B38 und B39: (li.) Ortsbrust mit den Bohrungen B38 und B39; (Mitte) Seitenansicht des Damms mit Spritzbetonabschnitten (violett) und Injektionsbereichen (grün bzw. blau); (re.) Packeranordnung.....	111
Abbildung 80:	Erstmalige Lösungsdruckbeaufschlagung (23.06.2016) in den Bohrungen B38 (Lösung 1: gesättigte NaCl-Lösung) und B39 (Lösung 2: NaCl-gesättigte, MgCl ₂ -haltige Lösung).....	112
Abbildung 81:	Bestimmung der Lösungspermeabilität mittels eines Bürettensystems an den Bohrungen B38 und B39: a) schematische Messanordnung; b) in situ-Situation an der Ortsbrust von GV2.....	113
Abbildung 82:	Messkurven aus „Constant-pressure“-Test. a) Bohrloch B39 (gesättigte NaCl-Lösung mit MgCl ₂ -Anteil; pi = 4,1 bar); b) Bohrloch B38 (gesättigte NaCl-Lösung; pi = 4,8 bar).	113
Abbildung 83:	Zeitliche Veränderung der Lösungspermeabilität (Startwert: 10.05.2016) in den Bohrungen B38 und B39.	115
Abbildung 84:	Scheinbare Permeabilitäts-/Porositätsbeziehung für die Auswertung zweier Druckabfallkurven nach Anpassung mit unterschiedlichen Porositätsdaten (beide Kurven liegen aufeinander).....	116
Abbildung 85:	Lösungsdruckbeaufschlagung (23.06.2016) in den Bohrungen B38 (Lösung 1: gesättigte NaCl-Lösung) und B39 (Lösung 2: NaCl-gesättigte, MgCl ₂ -haltige Lösung).	117
Abbildung 86:	Ergebnisse der Langzeitbohrlochversuche: Permeabilität in Abhängigkeit der Zeit (Messungen von IBeWa und IfG)	120
Abbildung 87:	Darstellung der Abflussrinne an der luftseitigen Ortsbrust des GV2	121
Abbildung 88:	Schema zum Versuchsstand in der Begleitstrecke (nicht maßstäblich) ..	122
Abbildung 89:	Entwicklung der Kontaktdrücke während der Vorbereitungen zu den Druckbeaufschlagungen (PV = Gasdrucktest).	123
Abbildung 90:	Druckkammerbefüllung Stufe 1 (06.10.2016).....	125
Abbildung 91:	Druckkammerbefüllung Stufe 2 (17.10.2016).....	126
Abbildung 92:	Druckkammerbefüllung Stufe 3 (24.10.2016).....	127
Abbildung 93:	Druckkammerbefüllung Stufe 4 (02.11.2016).....	128
Abbildung 94:	1. Druckbeaufschlagung (DB 1) am 02.11.2016	131
Abbildung 95:	2. und 3. Druckbeaufschlagung (DB 2, DB 3) am 08./09.11.2016	132
Abbildung 96:	4. Druckbeaufschlagung (DB 4) am 29.11.2016	133
Abbildung 97:	5. Druckbeaufschlagung (DB 5) am 04.01.2017	134
Abbildung 98:	6. Druckbeaufschlagung am 16.03.2017	135
Abbildung 99:	7. Druckbeaufschlagung (DB 7) am 24.07.2017	136
Abbildung 100:	8. Druckbeaufschlagung (DB 8) am 27.09.2017	137
Abbildung 101:	Druckbeaufschlagung bei 3 bar mit schwankendem bzw. leicht fallenden Druck	139
Abbildung 102:	9. Druckbeaufschlagung vom 09.04. bis 24.04.2018	140
Abbildung 103:	10. Druckbeaufschlagung vom 24.04. bis 17.05.2018	141
Abbildung 104:	11. Druckbeaufschlagung vom 17.05. bis 23.07.2018	142
Abbildung 105:	12. Druckbeaufschlagung vom 23.07. bis 23.08.2018	143

Abbildung 106:	13. Druckbeaufschlagung vom 24./30.08. bis 24.09.2018	144
Abbildung 107:	14. Druckbeaufschlagung vom 24.09. bis 07.11.2018	145
Abbildung 108:	15. Druckbeaufschlagung vom 27.11.2018 bis 15.04.2019	146
Abbildung 109:	Lösungsdurchtritt und Vernässung an der Auffangrinne im rechten unteren Bereich vor dem Bauwerk. Bild a): Überblick zur Position des Durchtrittes. Bild b) Vernässungsbereich (Aufnahmedatum: 14.03.2019).	147
Abbildung 110:	16. Druckbeaufschlagung vom 23.04.2018 bis 14.05.2019	148
Abbildung 111:	Durchtrittsstelle am linken Stoß (Aufnahmedatum: 15.05.2019)	149
Abbildung 112:	Durchtrittsstelle am linken Stoß (Aufnahmedatum: 13.06.2019)	149
Abbildung 113:	Lösungsaustritt an der Bohrung B38 (Aufnahmedatum: 15.05.2019)	150
Abbildung 114:	Lösungsaustritt am rechten Rand des GV2 (Aufnahmedatum: 15.05.2019)	150
Abbildung 115:	Auffangrinne und Wägeeinrichtung zum Erfassen der durchgetretenen Lösungsmenge	151
Abbildung 116:	17. Druckbeaufschlagung vom 14.05.2018 bis 13.06.2019	152
Abbildung 117:	Gemessener Kontaktdruck 2017 bis 2019	153
Abbildung 118:	Gemessener Kontaktdruck während der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung der Druckkammer	154
Abbildung 119:	Gemessener Kontaktdruck bei den Druckbeaufschlagungen DB 16 und DB 17	155
Abbildung 120:	Entwicklung der Kontaktdrücke zu Druckbeaufschlagung DB 17 (maximaler Lösungsdruck von 28,4 bar)	156
Abbildung 121:	kurzzeitige Druckentlastung von 12,6 bar auf 7,0 bar	160
Abbildung 122:	Massezunahme der $MgCl_2/CaCl_2$ -Lösung im Klimaschrank bei 27°C und 47 % Luftfeuchtigkeit	162
Abbildung 123:	Position der TDR-Feuchtesensoren im Bauwerk GV2	163
Abbildung 124:	Anordnung der TDR-Sensoren in der Messebene; Blick auf die Messebene von der luftseitigen Ortsbrust	164
Abbildung 125:	Blick auf die Messebene mit Sensor 1 (linker Stoß), Sensor 2 (Mitte oben), Sensor 3 (rechter Stoß)	164
Abbildung 126:	Messprinzip des TDR-Verfahrens und entsprechende Signalverläufe [AU31]	165
Abbildung 127:	Schematische Darstellung des Messaufbaus zu TDR-Messungen	165
Abbildung 128:	TDR-Messkasten am 18.10.2016	166
Abbildung 129:	Messsignale am Sensor 1A zwischen dem 06.10.2016 und dem 05.07.2017	167
Abbildung 130:	Messsignale am Sensor 2A am 06.10.2016 und am 05.07.2017	167
Abbildung 131:	Messsignale am Sensor 3B, Messung von der Seite B (von unten nach oben), am 16.11.2016, 23:32 Uhr (rot) im Vergleich zur Messung am 18.10.2016, 14:54 Uhr (schwarz)	168
Abbildung 132:	Beginn der Feuchtigkeitszunahme am Sensor 3B am 17.11.2016, um 06:32 Uhr	168
Abbildung 133:	maximale Feuchtigkeitszunahme am Sensor 3B am 24.11.2016, 23:45 Uhr	169
Abbildung 134:	maximale Feuchtigkeitszunahme am Sensor 4A am 24.12.2016, 23:53 Uhr	169
Abbildung 135:	Lagen der Sensoren 3 und 4, von der Luftseite betrachtet mit dem eingekreisten Bereich, in dem die Feuchtigkeitszunahme detektiert wurde	170
Abbildung 136:	Messsignale am Sensor 3 zwischen dem 18.10.2016 und dem 05.07.2017	171

Abbildung 137:	Messsignale am Sensor 3B zwischen dem 18.10.2016 und dem 05.01.2017; Zuordnung der Druckstufen und Feuchtedetektionen	171
Abbildung 138:	Messsignale am Sensor 1 zwischen dem 06.07.2017 und dem 13.11.2018	172
Abbildung 139:	Messsignale am Sensor 2 zwischen dem 06.07.2017 und dem 13.11.2018	172
Abbildung 140:	Messsignale am Sensor 3 zwischen dem 06.07.2017 und dem 25.10.2018	173
Abbildung 141:	Messsignale am Sensor 4 zwischen dem 06.07.2017 und dem 25.10.2018	173
Abbildung 142:	Messsignale am Sensor 3A zwischen dem 25.10.2018 und dem 13.11.2018.....	174
Abbildung 143:	Messsignale am Sensor 3B zwischen dem 25.10.2018 und dem 13.11.2018.....	174
Abbildung 144:	Messsignale am Sensor 4A zwischen dem 25.10.2018 und dem 13.11.2018.....	175
Abbildung 145:	Messsignale am Sensor 1A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019.....	176
Abbildung 146:	Messsignale am Sensor 2A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019.....	176
Abbildung 147:	Messsignale am Sensor 3A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019.....	177
Abbildung 148:	Messsignale am Sensor 4A zwischen dem 13.11.2018 und dem 05.06.2019.....	178
Abbildung 149:	Entwicklung der Temperatur im Bereich der TDR-Sensoren im GV2.....	180
Abbildung 150:	Längsschnitt des Bauwerkes GV2 (Luftseite unten).....	182
Abbildung 151:	Schema zum Anfahren des Freischnittbereiches am GV2 (Draufsicht) ..	183
Abbildung 152:	Abmessungen des Bereiches der Auffahrung für den Rückbau (Ansicht)	183
Abbildung 153:	Geplante „radiale“ Bohrungen B45 und B46	184
Abbildung 154:	Korngrößenverteilung des Sand-Kies-Zuschlages 0-8 mm.....	188
Abbildung 155:	Dynamisches Scherrheometer Haake MARS I	191
Abbildung 156:	Messgeometrie Platte-Platte, mit Drehkörper PP20TIPR und Messspalt	191
Abbildung 157:	Prinzip der Deformation einer Probe im Messspalt am Plattenrand.....	192
Abbildung 158:	Viskositätsmessungen – 1. Versuchsreihe Viskositätsverläufe	196
Abbildung 159:	Anteile des komplexen Schubmoduls in Abhängigkeit von der Deformation	198
Abbildung 160:	Viskosität in Abhängigkeit der Zeit bei den Bindemittelsuspensionsproben der 2. Messreihe, (Parameterbezeichnung: „MgO-Produkt – Lösungsverhältnis (1,357; 1,1; 1,2) – Probennummer (M01; M02; M03) Viskositätsmessungen).....	200
Abbildung 161:	Viskosität der Bindemittelsuspensionsproben bei 2. Messreihe (Ausschnitt aus Abbildung 160) – Parameterbezeichnung: „MgO-Produkt - Lösungsverhältnis (1,357; 1,1; 1,2) - Probennummer (M01; M02; M03) .	201
Abbildung 162:	Änderung des Phasenverschiebungswinkels über die Zeit bei verschiedenen MgO-Bindemittelsuspensionen	202
Abbildung 163:	Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit der Rezepturen SBn und SBn-F in Abhängigkeit vom Probenalter	206
Abbildung 164:	Spaltzugfestigkeit der Rezepturen SBn und SBn-F in Abhängigkeit vom Probenalter	207

Abbildung 165:	Direkte Zugfestigkeit der Rezepturen SBn und SBn-F und Haftzugfestigkeit der Rezeptur SBn auf Steinsalz in Abhängigkeit vom Probenalter.....	208
Abbildung 166:	Abhängigkeit der Porosität im MgO-Beton der Rezeptur D4 in Abhängigkeit von der Menge an eingedrungener Lösung.....	212
Abbildung 167:	Abhängigkeit der relativen Porosität im MgO-Beton der Rezeptur D4 in Abhängigkeit von der Menge an eingedrungener Lösung.....	213
Abbildung 168:	Änderung der relativen Permeabilität in Abhängigkeit von der Verringerung der Rissbreite Δb bei unterschiedlichen Anfangsspaltbreiten b_0	215

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnisse der pneumatischen Vortests am GV2; nach [AU2].....	15
Tabelle 2:	Ergebnisse der pneumatischen Vortests am GV1; nach [AU2].....	18
Tabelle 3:	Vergleich der gemessenen Permeabilität an GV1 und GV2	19
Tabelle 4:	Abgeleitete strömungstechnische Kennwerte für die Großversuche 1 und 220	
Tabelle 5:	Übersicht zu den Bohrungen im GV2.....	24
Tabelle 6:	Kernansprache B40	26
Tabelle 7:	Kernansprache B41	27
Tabelle 8:	Kernansprache B44	28
Tabelle 9:	Rezepturkomponenten, aus denen im Jahr 2008 das MgO-Spritzbetondammbauwerk GV2 errichtet wurde.....	34
Tabelle 10:	Dynamische Viskosität der verwendeten Lösungen	40
Tabelle 11:	Mittlere Massenänderung der Proben bei unterschiedlicher Luftfeuchte	51
Tabelle 12:	Fotos der Proben vor und am Ende der Lagerungsversuche mit Lösung 1 ..	55
Tabelle 13:	Fotos der Proben vor und am Ende der Lagerungsversuche mit Lösung 2 ..	56
Tabelle 14:	Fotos der Proben vor und am Ende der Lagerungsversuche mit Lösung 3 (keine Rissbildung nach 2200 Stunden).....	57
Tabelle 15:	Ergebnisse der Feuchtegehalte	60
Tabelle 16:	Ergebnisse der Trockendichtebestimmung	62
Tabelle 17:	Ergebnisse der Reindichtebestimmung	63
Tabelle 18:	Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe	67
Tabelle 19:	Ergebnisse der Porositätsberechnung aus der Dichtemessung	68
Tabelle 20:	Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie	69
Tabelle 21:	Übersicht zu den Ergebnissen der Laboruntersuchungen des GV2-Bohrkernmaterials	79
Tabelle 22:	Lösungskonzentrationen der aus der B34 entnommen MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lösung im Vergleich zur Ausgangskonzentration.....	84
Tabelle 23:	Untersuchungsprogramm an Kernstücken aus der Kernbohrung B42 (für die Kurzbezeichnungen der Testspezifikationen s. Text).....	87
Tabelle 24:	Ergebnisse der in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen.....	97
Tabelle 25:	Ergebnisse der Gaspermeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial.....	99
Tabelle 26:	Ergebnisse der Lösungsp permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial ...	100
Tabelle 27:	Ergebnisse der in situ-Lösungsp permeabilitätsuntersuchungen in B40 und B41 mit Lösung 2.....	102
Tabelle 28:	Auswertung der stationären Injektionstests in den Bohrungen B38 und B39	114
Tabelle 29:	Stufen der Druckkammerbefüllung.....	124
Tabelle 30:	Stufen der Druckbeaufschlagung mit Druckabfall (DB 1 bis D B8)	130
Tabelle 31:	Druckabfall nach den jeweiligen Druckstufen	130
Tabelle 32:	Stufen der Druckbeaufschlagung ohne Druckabfallmessung (DB 9-DB 17)..... ..	138
Tabelle 33:	Druck an den Druckkissen in Messebene 1 zu verschiedenen Zeitpunkten während DB 17.....	156
Tabelle 34:	Druck an den Druckkissen in Messebene 2 zu verschiedenen Zeitpunkten während DB 17.....	157
Tabelle 35:	berechnete Anfangsgasvolumina V_0 in der Druckkammer aus Druckerhöhungen.....	159
Tabelle 36:	berechnetes Anfangsgasvolumen V_0 in der Druckkammer aus Druckentlastung	160
Tabelle 37:	geplante Überbohrungen an den Bohrungen B38, B39, B40 und B41	181
Tabelle 38:	verwendete MgO-Chargen	193
Tabelle 39:	MgO und Feinsalz bei erster Versuchsreihe zum rheologischen Verhalten von verschiedenen MgO-Bindemittelsuspensionen	194

Tabelle 40:	erste Versuchsreihe – Ablauf der Probenherstellung und des Probeneinbaus.	195
Tabelle 41:	MgO-Produkte und Anzahl der Messungen der zweiten Versuchsreihe zum rheologischen Verhalten von MgO-Bindemittelsuspensionen.....	199
Tabelle 42:	zweite Versuchsreihe – Ablauf der Probenherstellung und des Probeneinbaus	199
Tabelle 43:	Rezepturen für die Herstellung von Probekörpern	204
Tabelle 44:	Mittelwerte aus 3 Messwerten der einaxialen Druckfestigkeit und Standardabweichung aus je 3 Versuchen der Rezepturen SBn (ohne Fasern) und SBn-F (mit Fasern UCF) – nach Ergebnissen von [AU41].....	206
Tabelle 45:	Mittelwerte (aus 3 Messwerten) der Spaltzugfestigkeit und zugehörige Standardabweichung der Rezepturen SBn (ohne Fasern) und SBn-F (mit Fasern UCF) – nach Ergebnissen von [AU41].....	207
Tabelle 46:	Mittelwerte (aus je 3 Messwerten) der direkten Zugfestigkeit und ihrer Standardabweichung der Rezepturen SBn (ohne Fasern) und SBn-F (mit Fasern UCF) – nach Ergebnissen von [AU41].....	208