



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-S³:
MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse
für HAW-Endlager im Steinsalz**

Förderkennzeichen 02E11769A

Ausführende Stelle: Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Gustav-Zeuner-Str. 1a
D-09596 Freiberg

Projektleitung: Dr. Matthias Gruner und Prof. Dr. Wolfram Kudla

Autoren: M.Sc. Jennifer Arendt
Dr. Daniela Freyer
Dr. Matthias Gruner
Dr. Johannes Kulenkampff
Dr. Ute Effner
Dr. Christoph Lüdeling
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 02E11769A gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren

Freiberg - 24.01.2023

Projektpartner	Ansprechpartner	
TU Bergakademie Freiberg Institut für Bergbau und Spezial- tiefbau Gustav-Zeuner-Str. 1a 09599 Freiberg	Prof. Dr. Wolfram Kudla Dr. Matthias Gruner M.Sc. Jennifer Arendt Herr Martin Hofmann Herr Volker Beyer	
TU Bergakademie Freiberg Institut für Anorganische Chemie Leipziger Str. 29 09599 Freiberg	Dr. Daniela Freyer Dr. Iris Paschke	
IfG Leipzig Friederikenstraße 60 04279 Leipzig	Dr. Till Popp Dr. Christoph Lüdeling Dipl.-Geol. Dirk Naumann	
IBeWa Meißner Ring 10 09599 Freiberg	Dr. Thomas Wilsnack M.Sc. Patrick Abel B.Sc. Lysann Raebiger Dipl.-Ing. Wafiullah Noorhan Herr Johannes Flemming Herr Thomas Viertel	
TS Bau GmbH Niederlassung Jena Am Flugraben 1 07743 Jena	Dipl.-Ing. Olaf Einicke Herr Jürgen Schrade	
GTS GmbH & Co KG Straße der Einheit 9 06179 Teutschenthal	Dipl.-Ing. Jens Biegler	
MFPA Weimar Coudraystraße 9 99423 Weimar	Herr Bernd Müller	
Helmholtz Zentrum Dresden- Rossendorf Permoserstraße 15 04318 Leipzig	Dr. Johannes Kulenkampff	
Bundesanstalt für Materialfor- schung und -prüfung Unter den Eichen 87 12205 Berlin	PD Dr. Ernst Niederleithinger Dr. Tyler Oesch Dr. Vera Lay Dr. Ute Effner	

Inhalt

1	Vorbemerkungen	8
2	Kurzfassung	9
3	Abstract	10
4	Einleitung	11
5	Selektiver Rückbau des Funktionsbauwerkes GV2 (AP1).....	13
5.1	Aufnahme des Ist-Zustandes des MgO-Spritzbetons	13
5.1.1	Freilegung der Mantelfläche des GV2	13
5.1.2	Gewinnung von Kernmaterial von der Ortsbrust des GV2	22
5.1.3	Radiale Bohrungen an der rechten Mantelfläche des GV2	24
5.1.4	Kamerabefahrungen der Bohrlöcher	25
5.1.5	Ultraschalluntersuchungen mit der LAUS-Apparatur	26
5.1.5.1	Ultraschall-Echo-Prüfverfahren	26
5.1.5.2	Die LAUS-Apparatur	26
5.1.5.3	Auswerteverfahren.....	26
5.1.5.4	Messungen und Ergebnisse	27
5.1.6	Hydro-mechanische Interaktion Gebirge/Dammbauwerk – Spannungs- und Permeabilitätsmessungen	29
5.1.6.1	Ausgangssituation	29
5.1.6.2	HF-Wiederholungsmessung 2019.....	31
5.1.6.3	Permeabilität im Salzpfeiler und im Dammzentrum.....	34
5.2	Charakterisierung der Betonierabschnittsgrenzen	36
5.2.1	In situ Untersuchungen - Bohrungen B45, B46	36
5.2.1.1	Untersuchungsprogramm	38
5.2.1.2	Ergebnisse der in situ Permeabilität.....	39
5.2.2	Laborversuche/Untersuchungen am Kernmaterial – Bohrungen B42b und B48	45
5.2.2.1	Probenmaterial	45
5.2.2.2	Untersuchungsprogramm	46
5.2.2.3	Ergebnisse.....	46
5.2.2.3.1	Bemerkungen zum Feuchtegehalt (siehe auch Anlage 1.2).....	46
5.2.2.3.2	Trockendichte und Reindichte.....	47
5.2.2.3.3	Porosität	48
5.2.2.3.4	Porenraumsättigung	52
5.2.2.3.5	Gaspermeabilität.....	52
5.2.3	Charakterisierung von Betonierabschnittsgrenzen mittels μ CT.....	54
5.2.4	Beobachtung des Eindringens von Lösung mittels PET	58
5.2.5	Mechanische Charakterisierung der Kontaktflächeneigenschaften.....	61
5.2.5.1	Kernmaterial aus der Bohrung B47	61
5.2.5.2	Spaltzug- und Haftzugfestigkeit Übergänge B47.....	62
5.2.5.3	Betonfestigkeiten der Baustoffmatrix (Vergleich Spaltzug- und einaxiale Druckfestigkeit).....	64
5.2.5.4	Fazit zur Relevanz von BAG	64

5.3	Untersuchung des Bereichs, in dem ein Zutritt von Lösung erfolgte und Feststellen von Veränderungen des MgO-Betons infolge Lösungskontakt	65
5.3.1	Bauwerk inkl. umliegendem Gebirge nach Kontakt mit Lösung aus der Druckkammer.....	65
5.3.2	Bauwerk nach Kontakt mit Salzlösung in Bohrungen	75
6	Untersuchungen zur möglichen Variation der Spritzbetonrezeptur im Hinblick auf die technologische Verarbeitbarkeit (AP2).....	79
6.1	Vorbemerkungen.....	79
6.2	MgO-Sorte (Reaktivitätsspanne) und MgO-Gehalt.....	80
6.3	Zugabe von Fasern	81
6.4	Variation der Spritzbetonrezeptur	82
6.4.1	Reproduktion der GV2-Rezeptur im Labor	82
6.4.2	Technikumsversuche	85
6.4.3	Abschließende Betrachtungen zu den Technikumsversuchen.....	99
6.5	In-situ-Test zur Variation der Rezepturbestandteile	103
6.5.1	Einleitung	103
6.5.2	Großspritzbetonversuch 1 (GSBV1).....	104
6.5.2.1	Einleitung.....	104
6.5.2.2	Der Spritzprozess	106
6.5.2.3	Auswertung Bohrkerne	109
6.5.2.4	Auswertung Festigkeit	112
6.5.2.5	Direkte Zugfestigkeit.....	118
6.5.2.6	Permeabilitätsuntersuchungen in situ	120
6.5.2.7	Auswertung Temperaturentwicklung.....	121
6.5.2.8	Zusammenfassung GSBV1	124
6.5.3	Großspritzbetonversuch 2 (GSBV2).....	125
6.5.3.1	Der Spritzprozess	125
6.5.3.2	Auswertung Bohrkerne	126
6.5.3.3	Auswertung Festigkeit	126
6.5.3.4	Permeabilitätsuntersuchungen in situ	129
6.5.3.5	Zusammenfassung GSBV2	131
6.5.4	Großspritzbetonversuch 3 (GSBV3).....	131
6.5.4.1	Einleitung.....	131
6.5.4.2	Der Spritzprozess	133
6.5.4.3	Auswertung Bohrkerne	133
6.5.4.4	Auswertung Festigkeit	137
6.5.4.5	Hydro-mechanische Eigenschaften	142
6.5.4.6	Permeabilitätsuntersuchungen in situ	150
6.5.4.7	Auswertung Temperaturentwicklung.....	151
6.5.4.8	Zusammenfassung GSBV3	154
6.5.5	Großspritzbetonversuch 4 (GSBV4).....	154
6.5.5.1	Einleitung.....	154
6.5.5.2	Der Spritzprozess	156
6.5.5.3	Auswertung Bohrkerne	157
6.5.5.4	Auswertung Festigkeit	158

6.5.5.5	Hydro-mechanische Eigenschaften	164
6.5.5.6	Permeabilitätsuntersuchungen in situ	169
6.5.5.7	Auswertung Temperaturentwicklung	175
6.5.5.8	Zusammenfassung GSBV4	177
6.6	Dokumentation und Bewertung der Parameter für die Qualitätssicherung	178
6.7	Fazit der Festigkeitsuntersuchungen GSBV1, 3 und 4 im Vergleich zum GV2....	181
6.7.1	Spaltzug- und Haftzugfestigkeit von Materialübergängen (BAGs) im GV2....	181
6.7.2	Haftzugfestigkeit aus den Großspritzbetonversuchen GSBV1, 3 und 4	182
6.7.3	Triaxiale Druckfestigkeit unterschiedlicher Spritzbetonrezepturen	183
6.8	Permeabilitätsmessungen an Kernproben	184
6.8.1	Gaspermeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial	184
6.8.2	Permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial mit Lösung	188
7	Laboruntersuchungen zur Vervollständigung der Datenbasis für MgO-Spritzbeton (AP3)	197
7.1	Untersuchungen zur Frühfestigkeit des MgO-Betons.....	197
7.2	Zustand der Betonierabschnittsgrenzen (BAG).....	199
7.3	Untersuchung zum Kontakt zwischen MgO-Beton und Steinsalz.....	204
7.3.1	Ziele und Untersuchungsmethodik	204
7.3.2	Haftzugfestigkeit Kontakt Steinsalz / Spritzbeton.....	205
7.3.2.1	Ergebnisse.....	206
7.3.2.2	Fazit.....	210
7.3.3	Scherfestigkeit Kontakt Steinsalz / Spritzbeton.....	211
7.4	Untersuchungen zu Baustoffveränderungen – Phasenbestand und Einfluss von CO ₂ 214	
7.4.1	Phasenbestandsuntersuchungen an Spritzbetonbohrkernen.....	214
7.4.2	Untersuchungen zum Einfluss von CO ₂ und definierter Luftfeuchte auf den MgO-Spritzbeton	219
7.4.2.1	Methodik	219
7.4.2.2	Ergebnisse.....	221
7.5	Untersuchungen zum zeitabhängigen Verformungsverhalten der neuen Spritzbetonrezeptur mit Salzzuschlag	228
7.5.1	Einleitung	228
7.5.2	Ergebnisse zum Relaxationsverhalten	228
7.5.3	Wertung des Relaxations- und Kompaktionsverhaltens.....	229
7.6	Quantifizierung / Visualisierung des Porenraumes im MgO-Spritzbeton mit Salzzuschlag	231
7.6.1	Material	231
7.6.2	CT-Untersuchungen.....	232
7.6.2.1	GSBV3 (Proben MgO_04 und MgO_06).....	232
7.6.2.2	GSBV4 (Proben GSBV4-B17, B19)	235
7.6.3	PET-Untersuchungen.....	238
7.6.4	Schlussfolgerungen aus den PET/CT-Untersuchungen.....	244
7.7	Materialcharakterisierung durch Ultraschall	245
7.7.1	Mess- und Auswerteverfahren.....	245
7.7.2	Messungen und Ergebnisse	246
7.7.2.1	Messungen am GSBV1 mit dem MIRA-System	246

7.7.2.2	Messungen am GSBV3 mit dem MIRA-System	248
7.7.2.3	Messungen am GSBV4 mit dem MIRA-System	250
7.7.3	Fazit	263
7.8	Ableitung der optimalen Schichtmächtigkeit der MgO-Spritzbetonschicht in Abhängigkeit von der zulässigen Maximaltemperatur und vom Temperaturgradient im Spritzbeton	263
7.8.1	Problemstellung	263
7.8.2	Modellgrundlagen.....	265
7.8.3	Vergleichsrechnung zum in situ-Versuch GSBV4 zur Anpassung der Parameter	270
7.8.4	Prognoseberechnungen für ein zukünftiges in situ-Bauwerk mit Ableitung der optimalen Schichtmächtigkeit.....	272
8	Synthese/ Wissenschaftliches Programm für ein in situ-Verschlussbauwerk aus MgO- Spritzbeton im Steinsalz (AP4)	290
8.1	Synthese des Kenntnisstandes zu MgO-Spritzbeton	290
8.1.1	Bewertung der Eignung von MgO-Spritzbeton für ein HAW-Endlager im Steinsalz aus geochemischer Sicht im Zusammenhang mit den Veränderungen infolge Phasenumwandlung bei Lösungszutritt.....	290
8.1.2	Weiterentwicklung des geomechanischen Kenntnisstandes für den Integritätsnachweis von MgO-Spritzbeton-Abdichtungen im Steinsalz	291
8.1.3	Bewertung der hydro-mechanischen Eigenschaften von BAG bei einem MgO- Spritzbetonstreckenverschluss	295
8.2	Versuchsziele und Messgrößen für die Planung eines MgO- Spritzbetonstreckenverschlusses	296
8.3	Vorschlag für die begleitende Qualitätssicherung bzw. -dokumentation beim Bau eines MgO-Streckenverschlusses	299
8.3.1	Bauablauf und Dokumentation	299
8.3.2	Qualitätssicherung	301
8.4	Vorschlag bzw. Vorentwurf zum Aufbau eines MgO-Streckenverschlusses mit Instrumentierung	302
8.4.1	Einführung.....	302
8.4.2	Notwendige Gesamtlänge des Bauwerkes	302
8.4.3	Vorschlag für eine Instrumentierung.....	304
9	Zusammenfassung und Ausblick	307
	Literaturverzeichnis	312
	Abkürzungsverzeichnis.....	316
	Symbolverzeichnis	317
	Abbildungsverzeichnis.....	319
	Tabellenverzeichnis.....	332
Anlage 1	Methodik Laboruntersuchungen.....	336
Anlage 1.1	Lösungsgehalt und Trocknung	336
Anlage 1.2	Feuchtegehalt	337
Anlage 1.3	Dichte.....	338
Anlage 1.4	Porosität.....	340
Anlage 1.5	Spezifik des MgO-Baustoffes im Zusammenhang mit der Behandlung von Proben der Rezeptur D4 (mit der 5-1-8-Bindemittelphase) bei der Bestimmung von Materialparametern, in welche die Baustofffeuchte eingeht.	343

Anlage 1.6	Bestimmung der triaxialen Druckfestigkeit und weiterer Probenparameter	347
Anlage 1.7	Bestimmung der Haftzugfestigkeit	350
Anlage 1.8	Bestimmung der Scherfestigkeit	351
Anlage 1.9	Permeabilitätsmessungen an Kernproben	352
Anlage 2	In situ Permeabilitätsuntersuchungen	357
Anlage 2.1	Methodik in situ Permeabilitätsmessungen	358
Anlage 2.2	Bohrlochpackertests	358
Anlage 3	Untersuchungsprogramme	365
Anlage 3.1	in situ-Permeabilitätsuntersuchungen GV2	365
Anlage 3.2	Untersuchungsprogramm der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen am GSBV1, GSBV2, GSBV3 und GSBV4	366
Anlage 3.3	Untersuchungsprogramm Laboruntersuchungen	370
Anlage 4	Ergebnisse der Untersuchungen zur Gaspermeabilität an Kernproben	375
Anlage 5	Beschreibung MgO-Lieferware	376
Anlage 5.1	Datenblätter der MgO-LW von Styromag	376
Anlage 5.2	Pulverdiffraktogramme der MgO-LW:	379
Anlage 5.3	Messwertkurven zur MgO-LW-Reaktivitätsbestimmung (ZTW):	380
Anlage 6	Sichtbare Fehlstellen in den Kernmarschen der Bohrungen B33, B34 und B35 aus dem GSBV4	382

1 Vorbemerkungen

Das Forschungsvorhaben "MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (Kurztitel MgO-S³)" wurde als Verbundvorhaben unter der Projektnummer 02E11769 aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz gefördert und vom Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT) betreut.

Das Vorhaben MgO-S³ wurde mit einer Laufzeit vom 01.05.2019 bis 31.10.2021 mit Bescheid vom 22.03.2019 als Anschlussvorhaben zum Vorhaben MgO-SEAL (FKZ 02E11435) bewilligt.

Das Vorhaben wurde gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) als Verbundpartner und mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) als Partner auf Basis einer Zusammenarbeitserklärung bearbeitet.

Der vorliegende Abschlussbericht bezieht sich auf das Teilprojekt A der TU Bergakademie Freiberg (FKZ 02E11769A). Für die Teilprojekte des HZDR (FKZ 02E11769B) und der BAM (FKZ 02E11779) werden separate Abschlussberichte vorgelegt. Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse von HZDR im Abschnitt 7.6 und die Ergebnisse der BAM im Abschnitt 7.7 zusammengefasst. Für Einzelheiten wird in diesen Abschnitten auf die Abschlussberichte der Teilprojekte verwiesen [1], [2].

Aufgrund der zusätzlichen Untersuchungen "Bestimmung der optimalen Schichtmächtigkeit der MgO-Spritzbetonschicht in Abhängigkeit von der zulässigen Maximaltemperatur und vom Temperaturgradient im Spritzbeton" wurde das Teilprojekt A der TU Bergakademie Freiberg mit Bescheid vom 08.04.2021 aufgestockt und die Laufzeit bis 31.03.2022 verlängert. Die Ergebnisse dieser zusätzlichen Untersuchungen sind im Abschnitt 7.8 dargestellt. Die Bearbeitung erfolgte durch Mitarbeiter des Institutes für Bergbau und Spezialtiefbau und des Institutes für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg. Als Unterauftragnehmer für die zusätzlichen Arbeiten zur thermomechanischen Modellierung wurde das IfG Leipzig beauftragt.

2 Kurzfassung

Bereits 2008 wurde im Rahmen des FuE-Projektes CARLA [3] das Streckenverschlusselement GV2 aus MgO-Spritzbeton im Carnallitgebirge in der Grube Teutschenthal errichtet. Nach über acht Jahren Stand- und Reifezeit wurden im Rahmen des FuE-Projektes MgO-SEAL [4] die Arbeiten am GV2 fortgesetzt. Hierbei wurde das chemische, geomechanische und geohydraulische Langzeitverhalten des Spritzbetondammes nach Lösungskontakt untersucht und bewertet. Die Ergebnisse werden für den (Langzeitsicherheits-) Nachweis der Integrität von Verschlussbauwerken aus MgO-Beton für zukünftige HAW-Endlager im Salinar benötigt. In mehreren Bohrungen des GV2 wurden über 2,5 Jahre die Permeabilität mit MgCl₂-haltiger, NaCl-gesättigter Lösung regelmäßig gemessen. Die anfangs gemessene Lösungspermeabilität ($k_{\text{integral}} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bzw. $k_{\text{integral}} \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) verringerte sich 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 zeigte, dass sich MgO-Spritzbeton durch Phasenumwandlung selbst abdichten kann. Die damit verbundene Porositätsverringering bei Lösungszutritt wurde auch rechnerisch modellhaft beschrieben.

Für das aktuelle Projekt MgO-S³ wurde das Funktionsbauwerk GV2 teilweise zurückgebaut. Es wurde ein Teil seiner Mantelfläche freigelegt, um die Verteilung der Injektionsmittel in der Kontaktfuge zu begutachten. Die mit Lösung befüllten Bohrungen wurden überbohrt, um Veränderungen des Baustoffes nach Kontakt mit der Lösung feststellen zu können. Durch Permeabilitätsmessungen in den Bohrlöchern wurde gezeigt, dass bei Lösungszutritt in den Bereichen mit anfangs höherer Permeabilität sich die Permeabilität mit der Zeit auf weniger als 10^{-18} m^2 verringert. Damit konnte der Selbstabdichtungseffekt des MgO-Spritzbetons bei Lösungszutritt bestätigt und verifiziert werden.

An drei Flächen wurden Ultraschalluntersuchungen durchgeführt, um mögliche Fehlstellen im Bauwerk zu detektieren.

In zahlreichen Spritzbetonversuchen im Technikumsmaßstab wurden neue Rezepturvarianten für MgO-Spritzbeton erprobt. In situ in der Grube Teutschenthal wurde zunächst die Rezeptur des GV2 mit Spritzschichtmächtigkeiten von ca. 30 cm reproduziert und in zwei weiteren Versuchen wurde der Quarzzuschlag durch Salzzuschlag ersetzt. Die hohe Schichtmächtigkeit geht mit einer hohen Abbinde temperatur einher, die problematisch sein kann. Um ein gutes Spritzen und einen hochwertigen Spritzbetonkörper zu gewährleisten, müssen die richtige Technik und die korrekten Einstellungen an der Spritzbetonmaschine erprobt und gewählt werden.

An den Bohrkernen aus dem Spritzbeton wurden die Dichte, die Festigkeit, die Porosität, die Permeabilität gemessen sowie das zeitabhängige Verformungsverhalten untersucht. Außerdem wurde der Porenraum mittels CT und PET visualisiert. Die Spritzbetonkörper in situ wurden mit Ultraschall untersucht, um potenzielle Fehlstellen zu identifizieren.

Weiterhin wurde ein wissenschaftliches Programm für ein in situ Verschlussbauwerk aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz erarbeitet. Dieses Programm beinhaltet die Versuchsziele und die Messgrößen für die Planung eines zukünftigen MgO-Spritzbetonstreckenverschlusses, einen Vorschlag für die begleitende Qualitätssicherung bzw. –dokumentation beim Bau eines MgO-Streckenverschlusses und einen Vorschlag bzw. Vorentwurf zum Aufbau eines MgO-Streckenverschlusses mit Instrumentierung.

3 Abstract

As early as 2008, the drift sealing element GV2 made of MgO shotcrete was erected in the carnallite mountains at the Teutschenthal mine as part of the CARLA R&D project [3]. After more than eight years of standing and maturing time, work on GV2 was continued within the scope of the R&D project MgO-SEAL [4]. Here, the chemical, geomechanical and geohydraulic long-term behavior of the shotcrete dam was investigated and evaluated after contact with solution. These results are needed for the (long-term safety) verification of the integrity of closure structures made of MgO concrete for future HAW repositories in the salinar.

In several boreholes of GV2, permeability with MgCl₂-containing NaCl-saturated solution was measured regularly over 2.5 years. The solution permeability measured initially ($k_{\text{integral}} \sim 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ or $k_{\text{integral}} \sim 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) decreased by more than 4 orders of magnitude to the range $k_{\text{integral}} \leq 10^{-19} \text{ m}^2$. This value corresponds to the integral permeability level of the compact MgO concrete. This showed that MgO shotcrete can self-seal by phase transformation. This porosity reduction upon solution influx was also modeled computationally.

For the current MgO-S³ project, the GV2 functional structure was partially dismantled. A part of its side surface was exposed in order to survey the distribution of the injectives. The boreholes filled with solution were over-drilled to be able to determine changes in the building material after contact with the solution. Permeability measurements in the boreholes with initially higher permeability showed a decreasing of permeability by time to less than 10^{-18} m^2 . This confirmed and verified the self-sealing effect of the MgO shotcrete on solution access.

Ultrasonic examinations were carried out on three measuring areas to detect possible defects in the structure.

Various new shotcrete mixtures were tested in numerous pilot-scale shotcrete trials. In situ at the Teutschenthal mine, the GV2 formulation was first reproduced with sprayed layer thicknesses of approx. 30 cm, and in two further trials the quartz aggregate was replaced by salt aggregate. This high layer thickness is accompanied by a high setting temperature, which can be problematic. To ensure good spraying and a high-quality shotcrete block, the correct technique and settings must be tested and selected.

Density, strength, porosity, permeability were measured on the cores from the shotcrete, and the time-dependent deformation behavior was investigated. In addition, the pore space was visualized using CT and PET. The shotcrete blocks in situ were examined with ultrasonic to identify potential imperfections.

Furthermore, a scientific program for an in situ drift sealing element made of MgO shotcrete in rock salt was developed. This program includes the experimental objectives and the measured variables for the design of a future MgO shotcrete closure element, a proposal for the accompanying quality assurance or documentation during the construction of a MgO drift sealing element, and a proposal or preliminary design for the construction of a MgO closure element with instrumentation.

4 Einleitung

MgO-Beton ist beim Zutritt von Mg²⁺-haltigen Lösungen als Baustoff für den Einsatz in Verschlusselementen in Schacht- und Streckenverschlüsse für zukünftige HAW-Endlager im Salinar geeignet. Ein Meilenstein bei der Entwicklung des MgO-Baustoffes sind die im Rahmen des FuE-Vorhabens CARLA [3] (Förderkennzeichen: 02C1204, Laufzeit: 01.11.2004 bis 30.06.2010) in der Grube Teutschenthal errichteten Versuchsbauwerke aus MgO-Beton. Neben der traditionellen Herstellung in Ortbetonbauweise wurde auch in einem Großversuch (GV) ein Bauwerk in Spritzbetonbauweise errichtet, das ein maßgebliches Untersuchungsobjekt für den Nachweis von Funktionstüchtigkeit und Langzeitstabilität von MgO-Beton darstellt. Die Dammbauwerke GV1 (Ortbetonbauweise) und GV2 (Spritzbetonbauweise) mit einer Länge von 9,5 m und 10,25 m wurden 2007 bzw. 2008 nach mehrmonatiger Bauzeit fertiggestellt. Die Bauwerke wurden mit Flächendruckgebern und Feuchtesensoren instrumentiert.

Besonders vorteilhaft ist die Spritzbetonbauweise aufgrund der im Vergleich zur Ortbetonbauweise geringeren Maximaltemperatur beim Abbinden. Die verringerte Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur und damit auch der kleinere Temperaturgradient im Bauwerk führen zu geringeren thermisch induzierten Zugspannungen. Außerdem wird die thermische Kontraktion des Bauwerkes verringert, wodurch die Wahrscheinlichkeit verringert wird, dass Fugen im Kontaktbereich der Spritzbetonschichten entstehen.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens MgO-SEAL (Förderkennzeichen: 02E11435; Laufzeit: 01.10.2015 bis 30.04.2019) wurden in 4 Bohrlöchern Langzeitversuche zur Einwirkung von salinärer Lösung auf den MgO-Spritzbeton durchgeführt. Durch die lange Einwirkzeit konnte erstmals auch an einem technisch relevanten Großbauwerk belegt werden, dass sich bei Lösungseinwirkung von MgCl₂-Lösung die Permeabilität des MgO-Betons reduziert und damit sich der MgO-Baustoff D4 (in Spritzbetonbauweise) "selbst abdichtet". Begleitend dazu wurden aus dem MgO-Spritzbetonkörper Bohrkerns gewonnen, an denen Laboruntersuchungen (Phasenbestand, Festigkeits- und Kriechverhalten, Porosität, Permeabilität mit Gas und Lösung) durchgeführt wurden.

Weiterhin wurde nach einer Bestandsaufnahme und einem pneumatischen Permeabilitätstest die Druckkammer des Bauwerkes GV2 mit Lösung befüllt und das GV2-Bauwerk in 17 Druckstufen mit gesättigter CaCl₂-MgCl₂-Lösung beaufschlagt.

Die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des vorangegangenen Vorhabens MgO-SEAL [4] lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Bei den Langzeitbohrlochversuchen direkt im MgO-Beton wurden zwei Lösungen eingesetzt: Eine Endlager-relevante NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung (mit 2 mol Mg²⁺/kg H₂O) und eine Mg-freie gesättigte NaCl-Lösung. Die Wandungen der Bohrungen B40 und B41 hatten von Anfang an eine sehr geringe Permeabilität von $< 10^{-19} \text{ m}^2$, die sich durch die Beaufschlagung mit Lösung mit der Zeit weiter auf $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ verringerte. Diese Werte sind für den intakten MgO-Spritzbeton typisch. Hinsichtlich der Permeabilitätsreduzierung war zwischen beiden Lösungszusammensetzungen (B40: reine gesättigte NaCl-Lösung; B41: MgCl₂-haltige, gesättigte NaCl-Lösung) kein Unterschied zu erkennen.
2. Die Bohrungen B38 und B39 sind länger als B40 und B41 und schneiden nachweislich lokale Bereiche mit höherer Permeabilität an. Die Anfangspermeabilität des MgO-Betons betrug bei beiden Bohrungen etwa 10^{-15} m^2 . Auch in diesen beiden Bohrungen hat sich 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. Die Langzeitbohrlochversuche in den Bohrungen B38, B39, B40 und B41 zeigten, 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.

3. Aus dem injizierten Lösungsvolumen wurde die Eindringtiefe der Lösung in den MgO-Beton abgeschätzt. Bei der Bohrung B40 wurde eine radiale Eindringtiefe, integral über das Testintervall von 3,15 m, von ca. 7,8 cm ermittelt (angenommene Porosität 4,4 %), d.h. 7,8 cm dick ist der Ring um die Bohrlochkontur, in den die Lösung eingedrungen ist. Für die Bohrung B41 betrug die Eindringtiefe 8,1 cm (Länge Testintervall 3,2 m). Aufgrund eines Lösungsverbrauches durch Phasenumwandlungen, eine ggf. inhomogene Verteilung der Permeabilität und/oder der Porosität im Testintervall ist die reale, radiale Eindringtiefe lokal im intakten MgO-Beton mit hoher Wahrscheinlichkeit geringer als dieser Mittelwert. Im Bereich der Betonierabschnittsgrenzen kann die Eindringtiefe dann höher als der Mittelwert sein.
4. Die in der Kontaktzone des Bauwerkes zum umliegenden Gebirge eingebauten TDR-Feuchtesensoren der MFPA Weimar haben auch nach der langen Standzeit nach 10 bis 11 Jahren zuverlässig einen Feuchtezutritt orts aufgelöst detektiert.

Da das Bauwerk GV2 für eine andere Aufgabenstellung (C-Vorhaben 02C1204) im Carnallit errichtet wurde, wird im Vorhaben auf Ergebnisse, die durch diese Spezifik bedingt sind und nicht Endlager-relevant sind, nur soweit eingegangen, wie sie für das Verständnis des Verhaltens des MgO-Baustoffes bei Einwirkung von MgCl₂-Lösung wichtig sind.

In der Bearbeitung und Auswertung der bisherigen Versuchsergebnisse ([3] und [4]) ergaben sich neue wissenschaftliche Fragestellungen, die in diesem vorliegenden Projekt beantwortet werden sollten.

Die Ziele des Vorhabens MgO-S³ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Selektiver Rückbau des Großversuches GV2 zur Gewinnung von Kernmaterial und zur Begutachtung der Verteilung der Injektionsmittel im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Carnallit.
2. Überprüfung durch Labor- und in-situ-Versuche, wie sich die Permeabilität des MgO-Betons der Rezeptur D4 aus dem GV2 bei Lösungszutritt im Laufe der Zeit entwickelt.
3. Test einer Spritzbetonrezeptur und -technologie in einer Art und Weise, dass dickere Schichten gespritzt werden können und sich damit die Anzahl der Betonierabschnitte verringert. Die sogenannten Betonierabschnittsgrenzen können eventuell durchlässigere Bereiche sein, da Bereiche mit Betonierabschnittsgrenzen eventuell eine höhere Permeabilität und eine geringere Festigkeit aufweisen können als Bereiche aus dem Inneren einer Spritzschicht. Dabei muss jedoch auch die Temperaturentwicklung beim Abbinden im Spritzbeton beachtet werden.
4. Erweiterung der Datenbasis zu mechanischen Kennwerten für MgO-Spritzbetonbauwerke im Steinsalz.

Bei der Rezepturanpassung ist der Ersatz des silikatischen Zuschlages durch Salzzuschlag von besonderem Interesse bzw. eine Kombination aus beiden Zuschlägen.

5 Selektiver Rückbau des Funktionsbauwerkes GV2 (AP1)

5.1 Aufnahme des Ist-Zustandes des MgO-Spritzbetons

5.1.1 Freilegung der Mantelfläche des GV2

Das Versuchsbauwerk GV2 wurde 2008 in Spritzbetonbauweise errichtet. Dieses besteht aus insgesamt 104 Spritzschichten mit einer mittleren Schichtmächtigkeit von knapp 10 cm. Der GV2 ist mit einem 1,82 m langen Widerlagerzahn in der Bauwerksmitte ausgestattet. In diesem Bereich wurden meist nur geringer mächtige Schichten von 4 cm bis 8 cm gespritzt, sodass es mehr Betonierabschnittsgrenzen und somit mehr potenzielle Fehlstellen im Zahnbereich gibt. [3] Bei den Untersuchungen wurde daher besonderes Augenmerk auf die Betonierabschnittsgrenzen (BAG) im MgO-Spritzbeton gelegt. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau des GV2 mit den Betonierabschnittsgrenzen (grau), den Injektionsebenen (Denepox in blau und Bitumen in rot), den TDR-Feuchtesensoren (gelb) und den Flächendruckgebern (grün) dargestellt.

Bereits während des Baus wurde der Kontaktbereich zwischen GV2 und umgebendem Carnallit abschnittsweise mit 2K-Bitumen und Denepox verpresst. Die Abstände zwischen zwei Verpressebenen betragen zwischen 0,55 m und 1,1 m. Zunächst wurden nur die jeweiligen Verpressebenen mit dem 2K-Bitumen verpresst und im Nachgang die dazwischenliegenden Verpressebenen mit Epoxidharz (Denepox) vergütet. [3] Beim Rückbau wurde insbesondere die Verteilung der Injektionsmittel in der Kontaktfuge begutachtet.

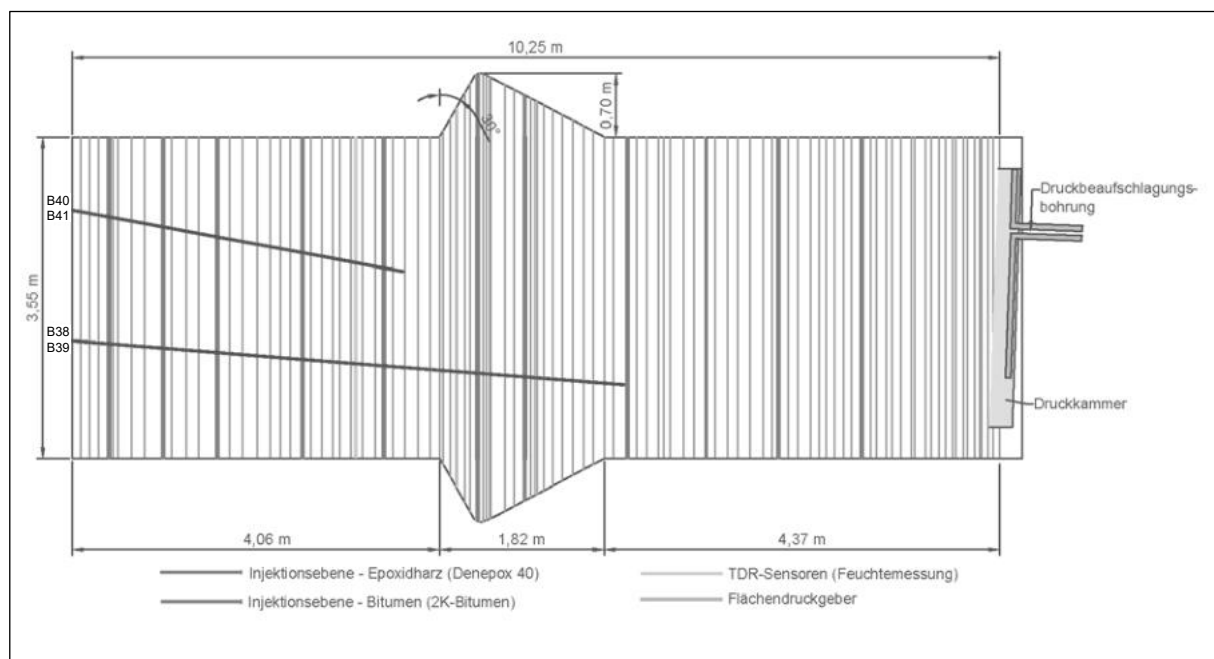


Abbildung 1: schematischer Längsschnitt GV2

Nach 8 Jahren Stand- und Reifezeit wurde im Projekt MgO-SEAL [4] der Damm über die Druckkammer mit MgCl₂/CaCl₂-Lösung beaufschlagt. Die eingesetzte Lösung musste aufgrund der Mineralogie des Teutschenthaler Carnallits (Tachyhydrit und Kieserit als Nebenbestandteile) so zusammengesetzt sein. Vor den Druckbeaufschlagungen wurde der Lösung der Farbtracer Fluorescin zugesetzt, um beim späteren Rückbau die Lösung unter UV-Licht detektieren zu können.

An der Messebene mit den TDR-Feuchtesensoren wurde während der Druckbeaufschlagungen der Zutritt von Lösung im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge in 7,1 m Entfernung zur Druckkammer detektiert. Der Zustand und die Umgebung der Feuchtesensoren wurden im Rahmen des Rückbaus untersucht und dokumentiert.

Mit der stufenweisen Befüllung der Druckkammer wurde am 06.10.2016 begonnen, mit den Druckbeaufschlagungen am 02.11.2016. Bereits am 17.11.2016 wurde eine Feuchtigkeitzunahme in der Messebene der TDR-Bänder am rechten unteren Stoß registriert. Während der nächsten Druckbeaufschlagungen wurde kein weiterer Flüssigkeitszutritt registriert. Erst nach der 14. Druckbeaufschlagung mit 9,6 bar im September 2018 wurde erneut eine erhöhte Feuchtigkeit am rechten unteren Stoß detektiert. Im Februar 2019 war hier auch erstmals durchgetretene Lösung zu erkennen. Da im rechten Bereich die Lösung zuerst durchgetreten war und gemessen wurde, wurde festgelegt, die rechte Seite des Bauwerkes teilweise freizulegen.

Mit den Rückbauarbeiten im Rahmen von MgO-S³ wurde im September 2019 begonnen. Am Versuchsort wurde der Carnallit auf der rechten Seite des GV2 zunächst mittels Mini-Bagger mit Fräskopf auf einer Länge von 6,2 m, einer Breite von ca. 2,5 m und einer Höhe von etwa 3,0 m durch die Firma TS-BAU abgetragen. Das Volumen der Auffahrung betrug inklusive der Schräge vor dem Bauwerk ca. 90 m³. In Abbildung 2 ist der Freischnitt schematisch und in Abbildung 3 der ausgeführte Freischnitt dargestellt.

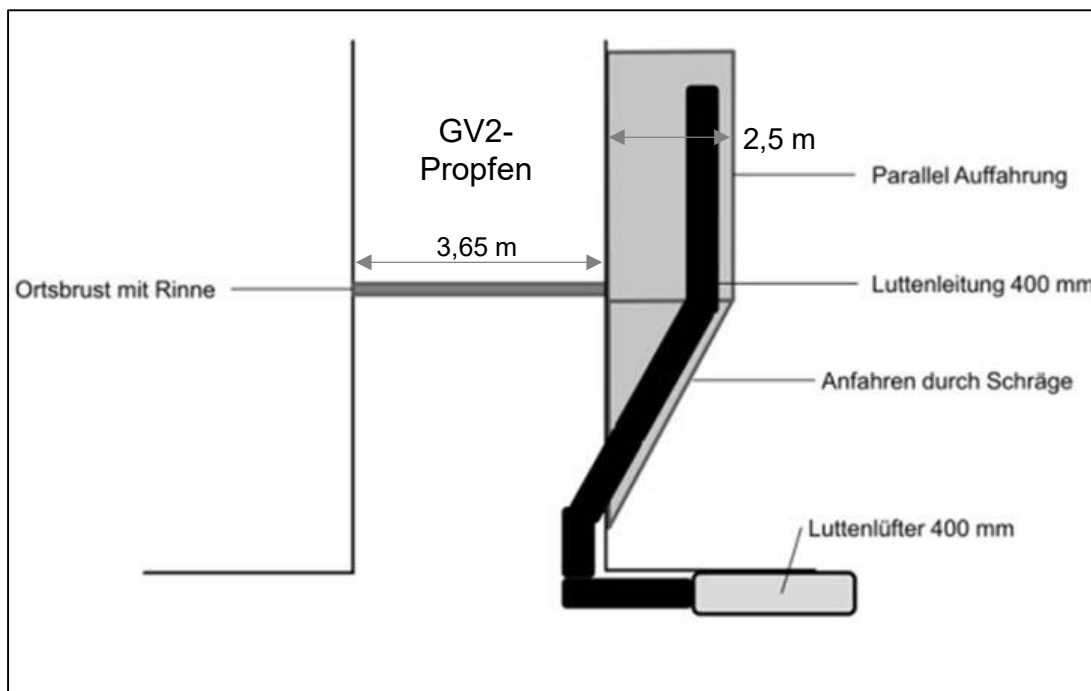


Abbildung 2: Schema zum Anfahren des Freischnittbereiches am GV2 (Draufsicht)



Abbildung 3: Versuchsbauwerk GV2 mit seitlicher Auffahrung

Beim Abtragen des Carnallitits mittels Bagger wurden in Bauwerksnähe zunächst 10 cm bis 20 cm Salz stehengelassen (Abbildung 4). Diese Salzsicht wurde unter UV-Licht betrachtet, um zu prüfen, ob die getracerte Lösung in diesem Bereich nachweisbar ist. Auf der gesamten Fläche der Auffahrung haben jedoch nur sehr vereinzelt und sehr kleine Stellen unter dem UV-Licht grün geleuchtet. Im Zuge der weiteren Freilegung wurde festgestellt, dass nicht nur die getracerte Lösung unter UV-Licht leuchtet, sondern auch das Denepox unabhängig vom Lösungskontakt. So kennzeichnet das Leuchten unter UV-Licht nicht nur den Lösungszutritt, sondern auch das Denepox und dessen Verbreitung.

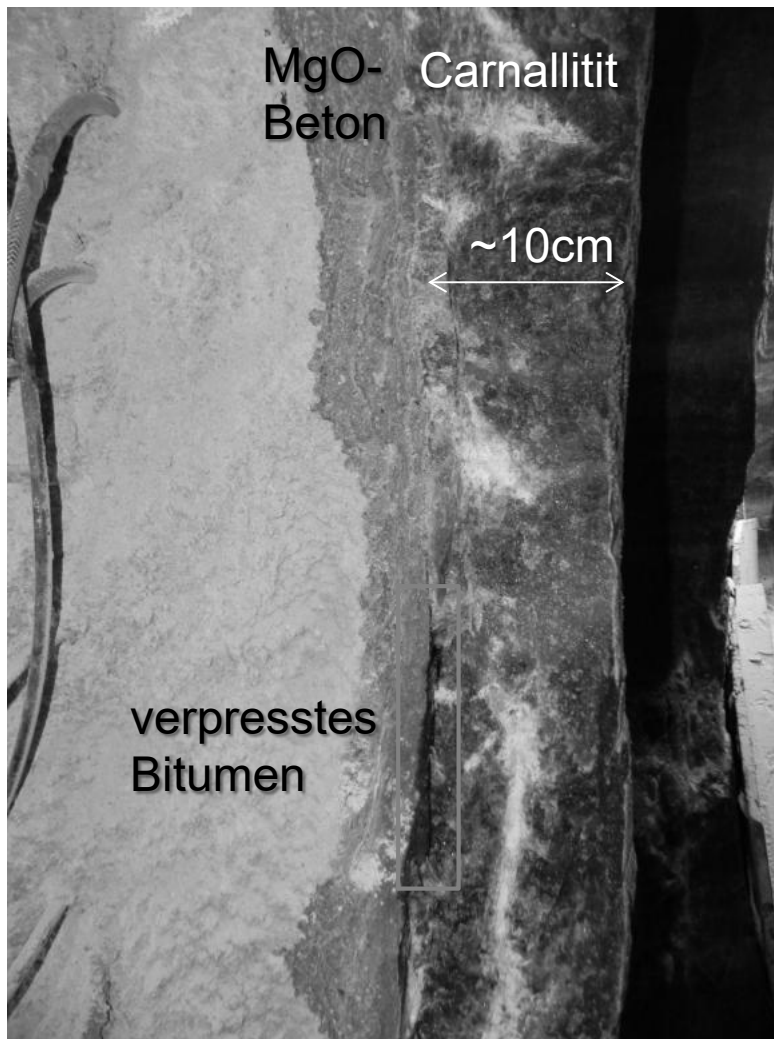


Abbildung 4: Kontaktbereich MgO-Beton und Carnallit mit Verpressmaterial

Durch das Institut für Bergbau und Spezialtiefbau wurde die Salzschrift mittels Schlagmeißel und -bohrmaschine weiter bis auf die verpressten Injektionsmittel abgetragen (Abbildung 5). Das abzutragende Carnallitgestein wurde zunächst geschnitten und die einzelnen Platten nacheinander vorsichtig gelöst (Abbildung 6). So wurde bis zum Widerlagerzahn ein ca. 70 cm hoher und 4,0 m breiter Bereich vom Salz befreit und bis zu den Verpressmaterialien freigelegt.

Auf diesen 4 m wurden drei Verpressebenen mit 2K-Bitumen (in 0,39 m, 1,59 m und 3,43 m Tiefe) und zwei Verpressebenen mit Denepox (in 0,99 m und 2,53 m Tiefe) erfasst.



Abbildung 5: Abtragen der Salzschrift mittels Bohrmeißel

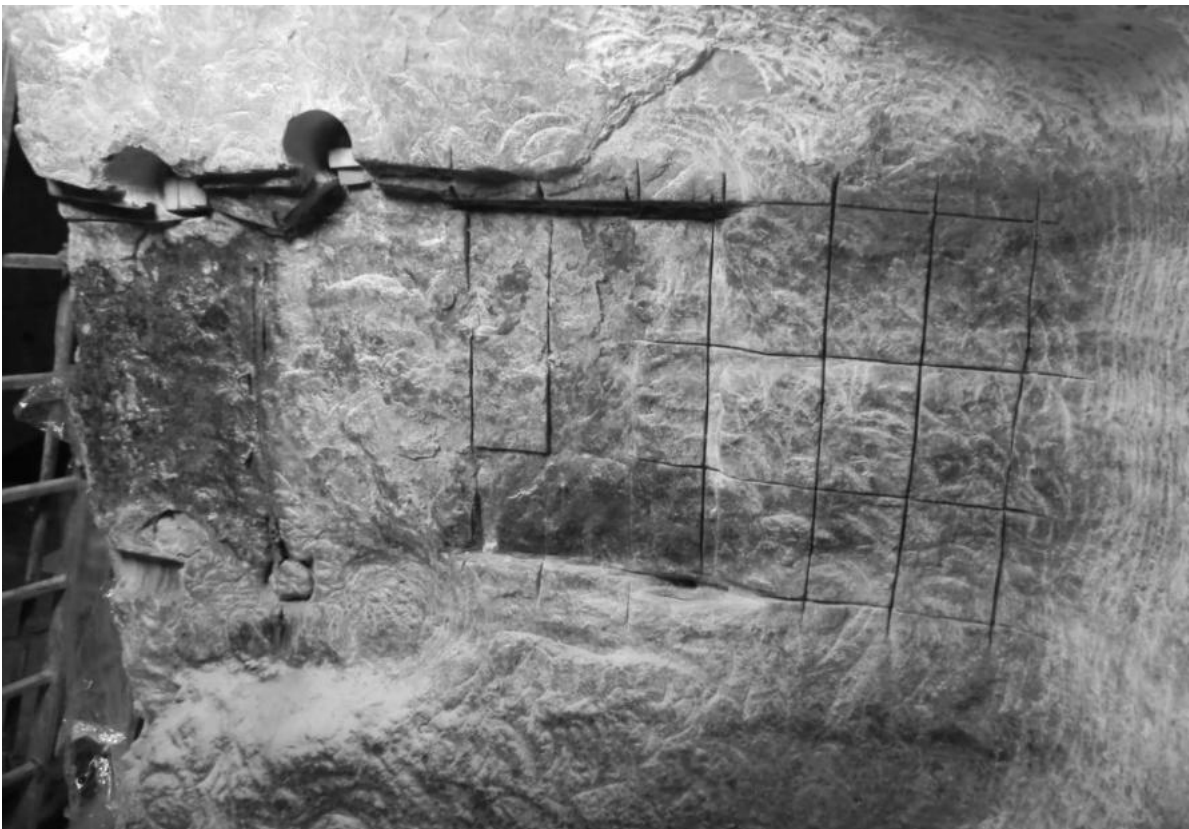


Abbildung 6: freigelegter Bereich

Das Salz oberhalb der Bitumenschicht ließ sich leichter entfernen als bei den Denepoxver-
presseebenen. Das 2K-Bitumen hatte sich hauptsächlich in einer einzigen Schicht zwischen
Betonkörper und Carnallit ausgebreitet, während das Denepox in mehreren sehr feinen
Schichten schuppenartig übereinander verteilt war (Abbildung 7 und Abbildung 8). Unter UV-
Licht leuchtete das Denepox eigenständig ohne den vorherigen Kontakt mit der getracerten
Lösung aus den durchgeführten Druckbeaufschlagungen.



Abbildung 7: Denepox (gelb) in Schuppen



Abbildung 8: freigelegte Kontur mit Denepox unter UV-Licht

Das zuerst eingebrachte 2K-Bitumen hatte sich bei mehreren Verpressebenen bis zu den benachbarten Denepox-Verpressebenen in ca. 60 cm Entfernung verteilt (Abbildung 9). Das im Rahmen von CARLA [3] später eingebrachte Denepox war ebenfalls sehr gut flächig ausgebreitet, teilweise auch unterhalb des 2K-Bitumens. Insgesamt war der gesamte freilegte Bereich mit den Verpressmaterialien augenscheinlich vollständig vergütet worden. Es gab keinen Bereich, in dem kein Injektionsmittel vorhanden war.

Beim Ablösen des Salzgesteins über dem Bitumen war noch ein kräftiger typischer Bitumen-geruch wahrnehmbar.

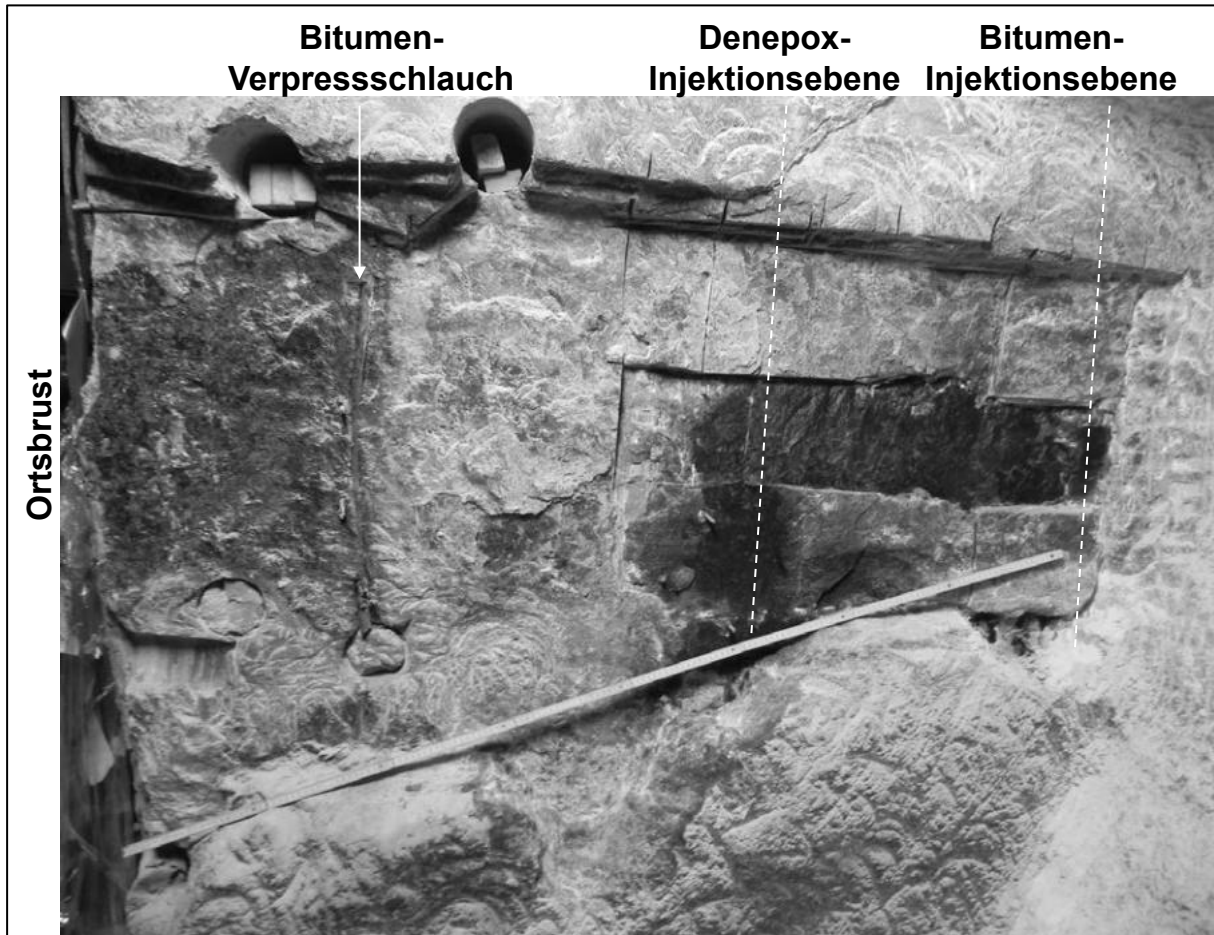


Abbildung 9: freigelegter Bereich mit Verpressebenen und -materialien

Auf der Ortsbrust des GV2 (Luftseite) wurden durch die BAM zerstörungsfreie Ultraschallmessungen durchgeführt, um potenzielle Schwachstellen und Risse zu detektieren. Dafür wurde der linke obere Bereich der Ortsbrust eben geschliffen. Diese Messfläche auf der Ortsbrust wird als Messfeld 1 bezeichnet (s. Abbildung 11).

Außerdem wurden auf der freigelegten Mantelfläche des Dammbauwerkes zwei weitere Flächen untersucht. Dazu wurden auf den jeweiligen Flächen an der Mantelfläche das Salzgestein und die Injektionsmittel abgetragen und die Betonoberfläche eben geschliffen (s. Abbildung 10 und Abbildung 12).

Auf der Mantelfläche wurde zum einen der Bereich vor dem Widerlagerzahn (Messfeld 2) ausgewählt, in dem sich auch die Messebene mit den TDR-Feuchtesensoren befand. Das Messfeld 2 beginnt in ca. 3,1 m Tiefe und ist 0,86 m breit. Die Höhe des Messfeldes beträgt 2,0 m und beginnt ca. 0,2 m über der Sohle. Zum anderen wurde die hintere Fläche auf dem Widerlagerzahn gewählt. Das Messfeld 3 ist ca. 1,4 m breit und 2,0 m hoch und beginnt 0,2 m über der Sohle.

Bei der Freilegung der Mantelfläche wurde auch besonders der Zustand der TDR-Feuchtesensoren und deren Anbindung an den Beton, das Salzgestein und die Injektionsmittel (2K-Bitumen und Epoxidharz Denepox) bewertet.



Abbildung 10: freigelegte Mantelfläche und Messfeld 2 für Ultraschalluntersuchungen der BAM

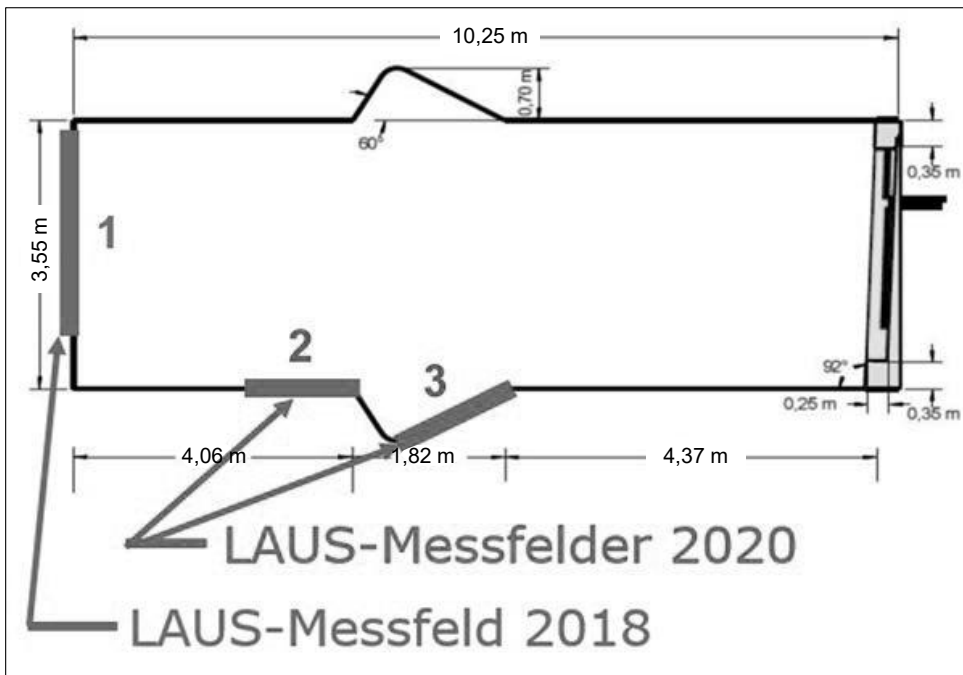


Abbildung 11: Lage der drei Messfelder der BAM für das Messsystem LAUS am Großversuch GV2

Auf der freigelegten Mantelfläche des Dammbauwerkes wurden durch die BAM den Messfeldern 2 und 3 zerstörungsfreie Ultraschallmessungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen sind im Abschnitt 5.1.5 beschrieben.

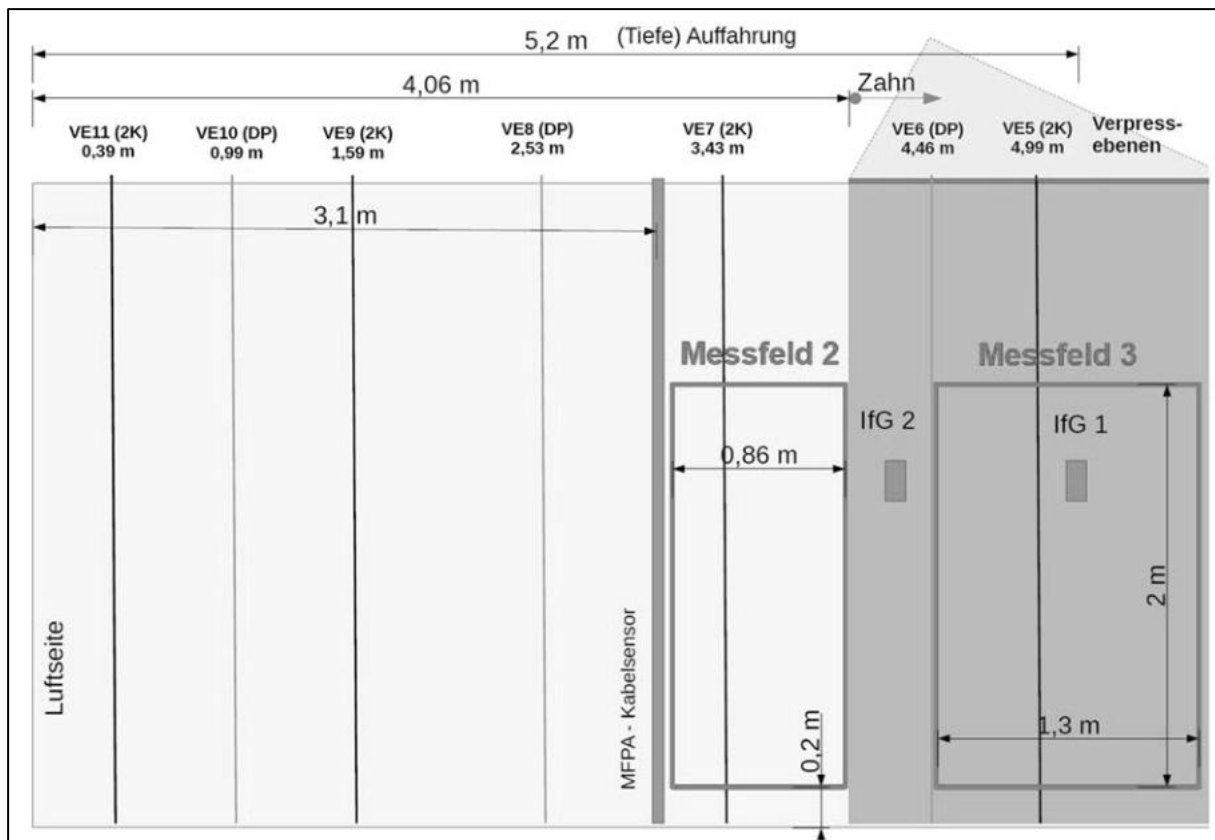


Abbildung 12: Seitenansicht der Ultraschallmessfelder der BAM an der rechten Mantelfläche des Bauwerkes GV2

5.1.2 Gewinnung von Kernmaterial von der Ortsbrust des GV2

Aus dem Vorhaben MgO-SEAL [4] gab es bereits mehrere Bohrungen, die weiter genutzt und bearbeitet wurden. Dies sind die Bohrungen B38, B39, B40 und B41 (Tabelle 1 und Abbildung 13). Zwischen 2016 und 2019 wurde in den vier Bohrungen die Permeabilität mit zwei verschiedenen Salzlösungen gemessen. Die Bohrlöcher B38 und B40 waren mit gesättigter NaCl-Lösung befüllt und die Bohrungen B39 und B41 mit einer NaCl-gesättigten, MgCl₂-haltigen Lösung. Die Bohrlöcher wurden dauerhaft beaufschlagt. Die Entwicklung der Permeabilität wurde dabei zeitabhängig über 2,5 Jahre bewertet. Die Bohrungen B38, B40 und B41 wurden im Rahmen des Vorhabens MgO-S³ überbohrt. Ziel des Überbohrens dieser mit Salzlösungen beaufschlagten Bohrungen war es, zu messen, wie weit die Lösung radial eingedrungen war. Die Durchmesser zum Überbohren wurden so gewählt, dass in der Bohrung B38 der Ringkern eine Breite von 29 mm und in den Bohrungen B40 und B41 der Ringkern eine Breite von 30 mm hatte.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Bohrungen B42, B42a, B42b, B44, B44a und dem Kernmaterial aus diesen Bohrungen sind im Abschlussbericht zum Projekt MgO-SEAL [4] beschrieben. Auf diese Ergebnisse wird hier nicht eingegangen.

Tabelle 1: vor 2019 ausgeführte Bohrungen an der Ortsbrust des GV2

Bohrung	Länge [m]	Durchmesser [mm]	Eingebrachte Lösung
B38	6,00	42	gesättigte NaCl-Lösung (982 Tage)
B39	6,00	42	NaCl-gesättigte, MgCl ₂ -haltige (2 molal) Lösung (982 Tage)
B40	3,65	70	gesättigte NaCl-Lösung (602 Tage)
B41	3,70	70	NaCl-gesättigte, MgCl ₂ -haltige (2 molal) Lösung (602 Tage)
B34Ü	1,0	300	CaCl ₂ -MgCl ₂ – Lösung (drucklos mehrere Jahre)

Die Bohrung B40 wurde über die gesamte Länge von 3,7 m mit einem Bohrdurchmesser von 100 mm überbohrt. Diese Überbohrung wurde mit B40Ü bezeichnet.

Die Bohrung B38 konnte nicht überbohrt werden, da ein festsitzender Packer das Überbohren verhinderte. Es wurde daher direkt unterhalb der Bohrung B38 eine weitere Bohrung (B38R) angesetzt, um den Randbereich der B38 zu erfassen. Hier wurde zunächst mit einem Bohrdurchmesser von 200 mm begonnen. Da hier der Bohrfortschritt jedoch zu gering war, wurde der Durchmesser auf 160 mm reduziert. Bei allen Überbohrungen wurde nur Luft als Spülung verwendet.

Weiterhin wurde eine zusätzliche Bohrung (B47) an der Ortsbrust mit einer Länge von 6,0 m geplant, um den Kern hinsichtlich Oberflächenbeschaffenheit, Materialdefekten und Lösungszutritt zu untersuchen. Diese Bohrung musste nach einer Bohrtiefe von 3,1 m wegen eines Gestängebruchs abgebrochen werden. Es konnten nur 2,5 m Bohrkern gewonnen werden, sodass eine weitere Bohrung (B48) mit 6,3 m Länge ausgeführt wurde.

In Tabelle 2 sind die im vorliegenden Projekt MgO-S³ neuen axialen Bohrungen aufgeführt. Eine Übersicht über die Lage der Bohrungen auf der Ortsbrust (Luftseite) des Bauwerkes GV2 zeigt Abbildung 13.

Tabelle 2: nach 2020 ausgeführte Bohrungen an der Ortsbrust des GV2

Bohrung	Länge [m]	Durchmesser [mm]	Bemerkung
B38R	6,03	200/160	Bohrung im Randbereich der B38
B40Ü	3,70	130	Überbohrung der B40, Kerngewinn 3,70 m
B47	3,15	100	Vollkern, Kerngewinn: 2,5 m
B48	6,30	100	Vollkern, Kerngewinn; 6,3 m

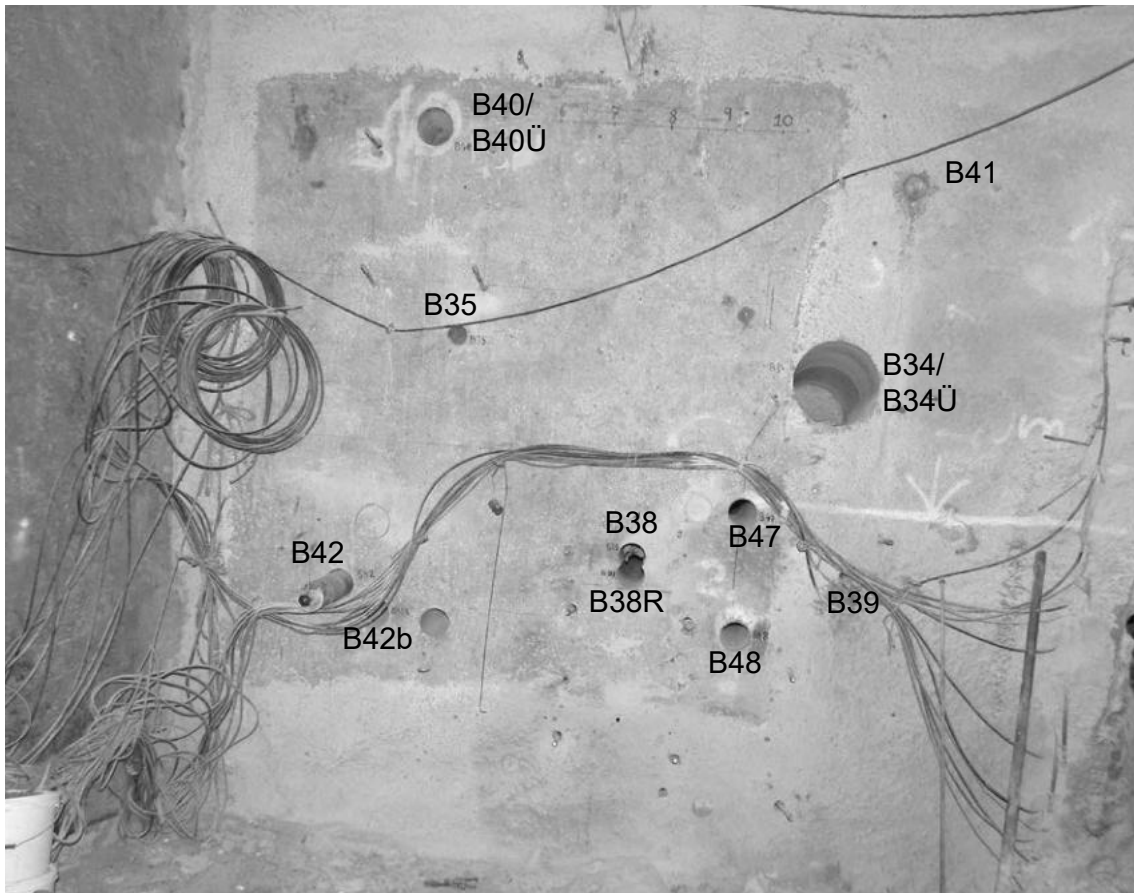


Abbildung 13: Ortsbrust des GV2 mit Bohrungen

5.1.3 Radiale Bohrungen an der rechten Mantelfläche des GV2

An der freigelegten Mantelfläche wurden fünf radiale Bohrungen ausgeführt. Die Bohrungen B45 und B46 dienen dem Kerngewinn und in den Bohrlöchern wurde die Permeabilität untersucht (siehe Abschnitt 5.2.1 und Abbildung 26). Die Bohrung B49 befindet sich auf dem Messfeld 2 der BAM, um die Befunde aus den zuvor durchgeführten Ultraschalluntersuchungen zu verifizieren. Die Bohrung B57 liegt auf dem Messfeld 3 auf der hinteren Seite des Widerlagerzahns.

Tabelle 3: Radiale Bohrungen an der rechten Mantelfläche des GV2

Bohrung	Länge [m]	Durchmesser [mm]	Bemerkung
B45	2,36	70	Tiefe ab Ortsbrust: 1,26 m; Höhe über Sohle: 2,30m
B46	3,2	70	Tiefe ab Ortsbrust: 2,3 m; Höhe über Sohle: 2,0m
B49	3,0	160	Auf dem Messfeld 2 der BAM
B57	0,7	100	auf dem Messfeld 3 der BAM

Die ursprünglich angedachten Bohrungen B50 bis B56 sind nicht ausgeführt worden und deshalb in Tabelle 3 nicht aufgeführt.

5.1.4 Kamerabefahrungen der Bohrlöcher

Alle neu erstellten Bohrungen wurden am 09.02.2021 mit der Bohrlöcherkamera befahren und der entsprechende Zustand dokumentiert.

Wichtigstes Ergebnis ist der Nachweis von lösungsführenden Rissen in der Bohrung B48 (Abbildung 14) in einer Teufenlage von ca. 5 m, d.h. im Bereich des Widerlagerzahns des Dammes.

Damit wurden vorläufige Einschätzungen aus MgO-SEAL [4] bestätigt. Dort gab es aufgrund von Lücken in den teufenabhängigen Durchschallungsmessungen (intervallweise Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen entlang der Bohrlochoberfläche mittels der Bohrlochsonde des IfG) Hinweise auf Fehlstellen im Bereich des Zahns, die aber durch die damals durchgeführten Kamerabefahrungen noch nicht sicher bestätigt werden konnten. Ebenfalls wurden durch die BAM in diesem Bereich multiple Reflektoren mittels des Echo-Schallverfahrens beobachtet.

Von der Fehlstelle in B48 abgesehen wurde in allen Kamerabefahrungen ein homogener Spritzbetonkörper festgestellt.

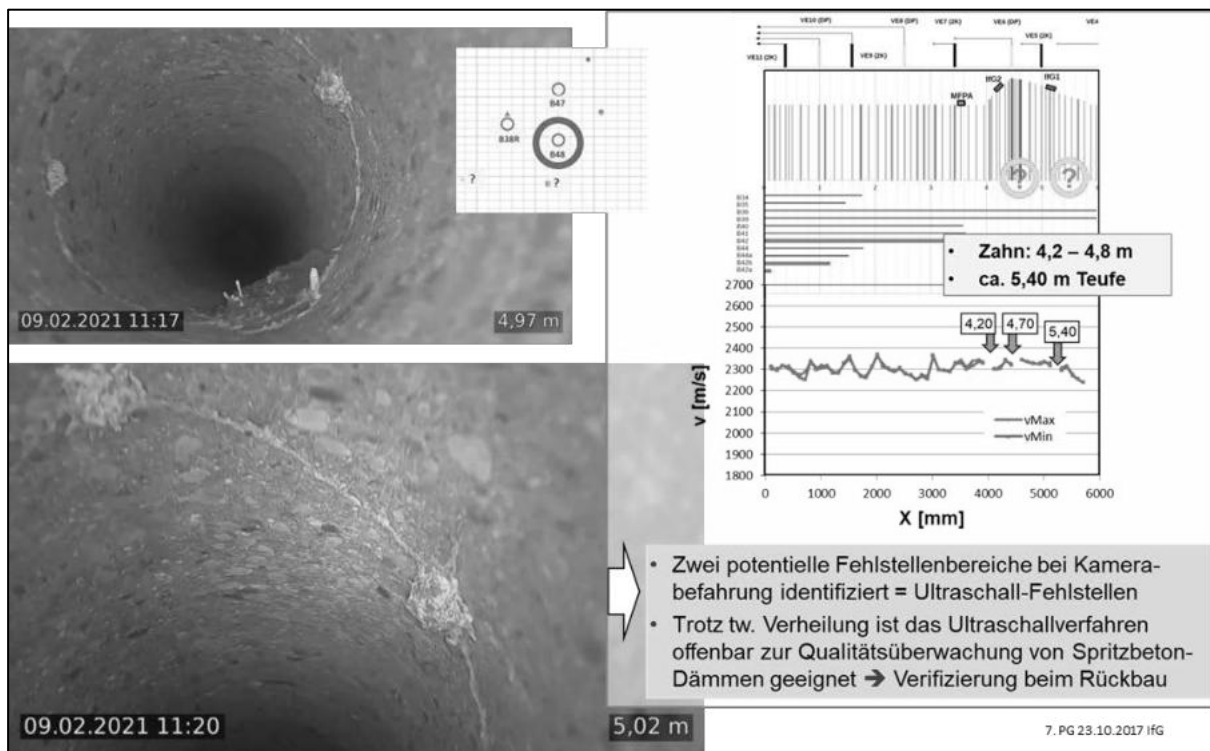


Abbildung 14: Ergebnisse der Kamerabefahrung B48 (Länge: 6,30 m, Durchmesser: 100 mm, Neigung: 0,0°) – lösungsführende BAG bzw. Risse. (li.) Bohrlochfotos; (re.) Ergebnisse aus Bohrloch-Durchschallungsmessungen mittels der Bohrlochsonde des IfG

5.1.5 Ultraschalluntersuchungen mit der LAUS-Apparatur

5.1.5.1 Ultraschall-Echo-Prüfverfahren

Das Ultraschall-Echo-Verfahren gehört zu den Impuls-Echo-Methoden und beruht auf der gerichteten Einkopplung von Ultraschall-Impulsen in das Bauteil. Eine eingehende Beschreibung der Methode ist dem separaten Endbericht der BAM zu dem MgO-S³-Projekt zu entnehmen [2] und beruht auf Grundlagen, die in [7] erläutert werden und im Merkblatt B 04 der DGZfP [6] beschrieben sind.

5.1.5.2 Die LAUS-Apparatur

Die experimentelle Apparatur (LAUS, Large Aperture Ultrasonic System) [8] verfügt über leistungsstarke Prüfköpfe, die bei den hier durchgeführten Messungen mit einer Frequenz von 25 kHz arbeiten (Abbildung 15). Hiermit lassen sich sehr hohe Eindringtiefen erzielen (derzeit theoretisch 10 m, verifiziert bisher 5 m [9] in stark bewehrtem Beton und 9,6 m in Salzbeton [10], [11]).



Abbildung 15: LAUS-Prüfkopf mit 32 zusammenschalteten Einzelprüfköpfen, einsetzbar als Sender oder Empfänger

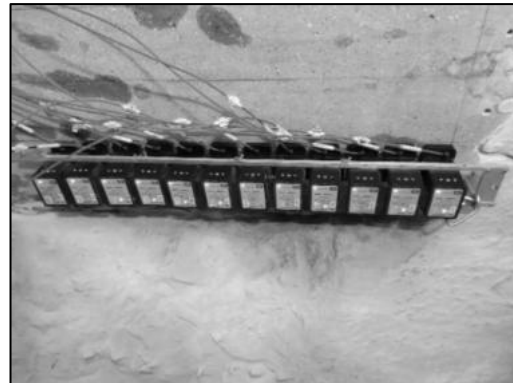


Abbildung 16: Montage der LAUS am Abdichtbauwerk mit Vakuum-Saugfüßen in einer Messschablone

Zur genaueren und sicheren Montage des Messsystems wurde eine Schablone entwickelt, in die die Prüfköpfe montiert werden. Dadurch beträgt der Abstand zwischen den einzelnen Prüfköpfen konstant jeweils 11 cm (Abbildung 16). Die Schwingungsrichtung der einzelnen Sensoren ist senkrecht zu den Viererreihen in der Anordnung (d.h. horizontal entlang der Messoberfläche für die Konfiguration in Abbildung 16). Alle 32 Sensoren eines Prüfkopfs werden parallel angesteuert.

5.1.5.3 Auswerteverfahren

Datenvorbereitung

Die Messdaten müssen vor einer Umsetzung in Bilder vorbearbeitet werden. Dazu gehören folgende Schritte:

- Positionszuordnung
- Aussortieren von Fehlmessungen (etwa bei mangelhafter Ankopplung)
- Filterung der Einzelsignale (hier: Bandpass 10 kHz – 70 kHz)

Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) Abbildungsverfahren

Aus einer Vielzahl von Einzelmessungen kann mittels Abbildungsverfahren die Lage von Reflektoren im Bauwerk rekonstruiert werden. In der Ultraschallprüfung werden dabei vorwiegend Verfahren aus der SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) - Familie genutzt. Für die Auswertung wird eine spezielle Version der Abbildungssoftware InterSAFT genutzt, die von der Universität Kassel entwickelt wurde [12], [13].

Ausgangspunkt der SAFT-Rekonstruktion sind die einzelnen A-Bilder (gemessene Einzelsignale) mit den zugehörigen Prüfkopfpositionen. Das geprüfte Objekt wird im Rechner in kleine quadratische (2D, "Pixel") bzw. würfelförmige Elemente (3D, "Voxel") unterteilt, die bei der Rekonstruktion im Rechner als einzelne mögliche Streuer betrachtet werden. Für jeden Pixel/Voxel werden die einzelnen A-Bilder entsprechend der jeweiligen Sende- und Empfangspositionen sowie einer angenommenen Ultraschall-Wellengeschwindigkeit amplituden- und phasenrichtig zugeordnet und überlagert. An den Positionen tatsächlicher Reflektoren überlagern sich die einzelnen Echoamplituden konstruktiv und man erhält im Vergleich zu den Pixeln/Voxeln ohne Reflektoren große Amplitudenwerte. Durch das Aufsummieren der Signale wird auch das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert. Das Schallfeld wird rechnerisch auf bestimmte Bereiche im Prüfkörper fokussiert. Aus linienhaften Messungen (2D) ergibt sich ein vertikaler Schnitt durch das geprüfte Objekt (B-Bild). Aus flächenhaften Messungen ergibt sich ein rekonstruiertes Volumen, aus dem wiederum Vertikalschnitte in beiden Richtungen (B-Bilder, D-Bilder) und Horizontalschnitte (Tiefenschnitte, C-Bilder) berechnet werden können [14], [15], [16].

Die InterSAFT-Rekonstruktionen der LAUS-Messdaten wurden unter Annahme einer Scherwellengeschwindigkeit von $v_T = 2430$ m/s durchgeführt. Diese Scherwellengeschwindigkeit wurde auf der Grundlage von Laufzeitmessungen an Bohrkernen des Großversuches GV2 berechnet.

5.1.5.4 Messungen und Ergebnisse

5.1.5.4.1 Messungen am Großversuch GV2 mit dem LAUS-System

Mithilfe des LAUS-Messsystems wurden am Großversuch GV2 insgesamt 3 Messflächen untersucht. Zunächst wurde 2018 die Stirnseite (Messfeld 1) im Rahmen des Projekts MgO-SEAL [4] untersucht. Zur Verifizierung dieser früheren Untersuchungen und zur Identifikation von Variationen im Material, die nachfolgend untersucht werden sollen, wurden im Rahmen von MgO-S³ ergänzend zerstörungsfreie Ultraschalluntersuchungen vom seitlichen Aufschluss des Bauwerks GV2 her durchgeführt (Abbildung 11 und Abbildung 12). Die Messflächen hatten die Dimensionen von ca. 0,86 m x 2 m (Messfeld 2) und 1,3 m x 2 m (Messfeld 3). Diese wurden mit dem LAUS-Gerät im Juni 2020 untersucht.

LAUS-Messfeld 2 des Großversuches GV2 (Messfeld 2, vor der Verzahnung)

Diese Zusammenfassung zeigt beispielhaft Ergebnisse des Messfelds 2. Weitere Details werden im gesonderten Teil-Ergebnisbericht erläutert. Für diese Messungen wurde das LAUS-Messsystem mit der langen Achse vertikal positioniert. Messungen wurden auf 6 vertikalen Messlinien mit 14 cm horizontalem Abstand der Messlinien durchgeführt. Pro Messlinie wurden zwei LAUS-Messungen mit einer vertikalen Verschiebung von 40 cm vorgenommen. Dies ergab die Messfläche (x, y) von 2,0 x 0,86 m. Abbildung 17 zeigt die Messlinien der LAUS-Ultraschall-Echo-Messung im Messfeld 2 und Abbildung 18 zeigt das Messfeld mit der montierten LAUS. Zu beachten ist, dass die x-Achse senkrecht zur Sohle nach unten verläuft und die y-Achse horizontal dazu nach rechts. Die z-Achse verläuft mit negativen Werten in das Bauwerk hinein, die Messfläche ist bei $z = 0$ m.

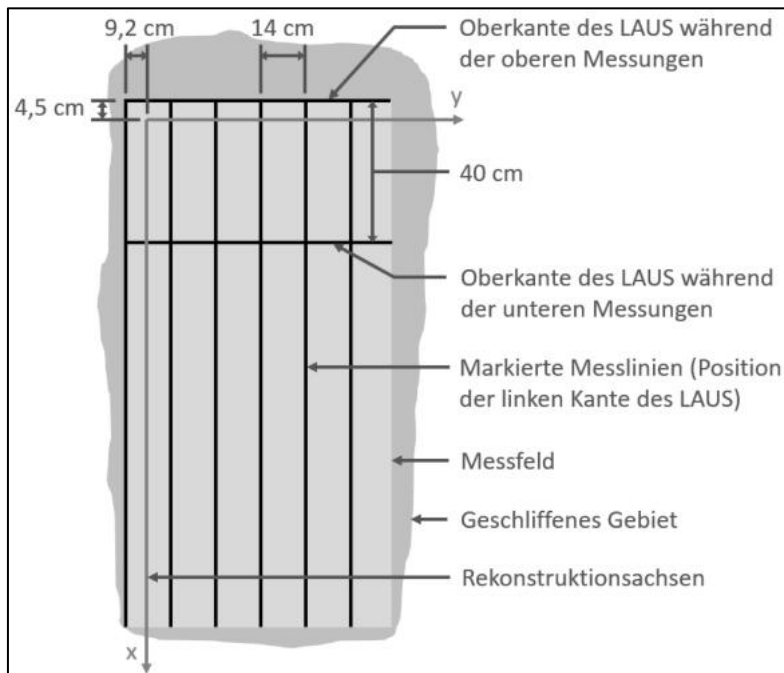


Abbildung 17: Zeichnung der Rekonstruktionsachsen relativ zum markierten LAUS-Messfeld 2



Abbildung 18: Messfeld 2 mit montierter LAUS

Durch den Öffnungswinkel der Schallausbreitung werden auch Echos oberhalb und unterhalb der Messanordnung empfangen. Daher geht die x-Achse über den vom Messkopffarray überdeckten Bereich hinaus. Allerdings ist am Rand mit Verzerrungen des Reflektorbildes zu rechnen.

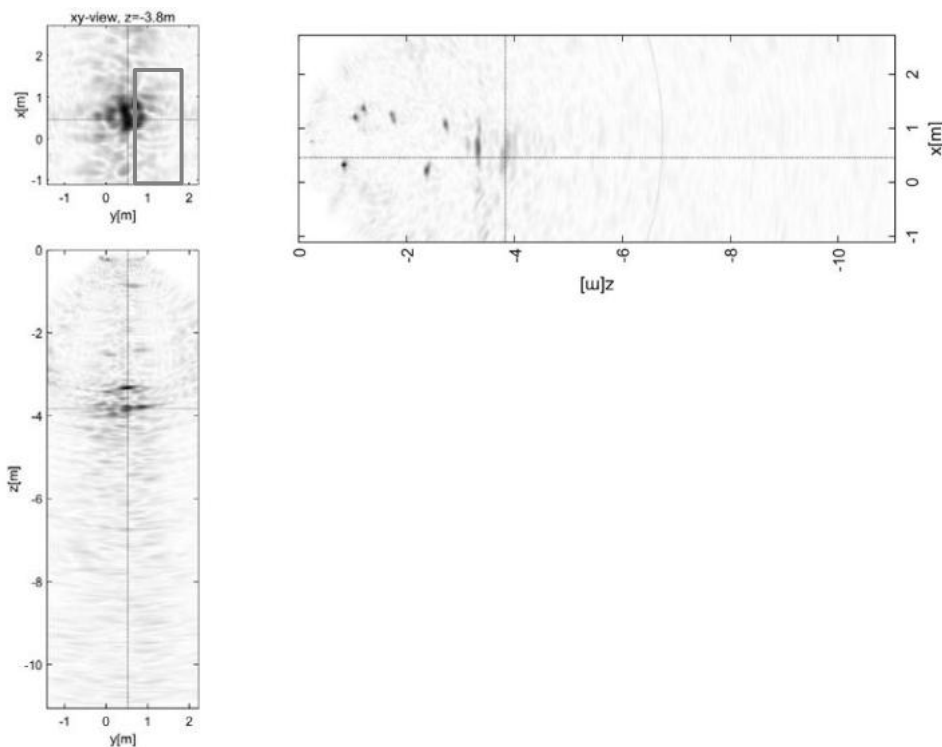


Abbildung 19: 3D-Rekonstruktion der LAUS-Messergebnisse für das Messfeld 2 am GV2. Der xy-Schnitt oben links liegt parallel zur Messfläche in $z = -3,80$ m Tiefe. Die Schnitte zeigen xz- und yz-Profile.

Abbildung 19 gibt beispielhaft einen Überblick über die im Messfeld 2 im GV2 detektierten Reflektoren. Bis zu einer Tiefe von etwa 4 m sind mehrere Reflektoren erkennbar, wobei die größten Amplituden tendenziell bei geringeren (negativen) z-Werten auftraten. Der tiefste signifikante Reflektor in Abbildung 19 hat eine Tiefe von ungefähr $z = -3,8$ m und ist im Tiefenschnitt (xy-Schnitt, Abbildung 19 oben links) abgebildet. Das entspricht in etwa der erwarteten Grenze zwischen MgO-Beton und dem Carnallitgebirge. Weitere Reflektoren sind im Bereich von $x = 1,1$ m in verschiedenen Tiefen festzustellen. Diese sind möglicherweise den querlaufenden Bohrlöchern von der Stirnseite des GV2 abgeteufte Bohrungen zuzuordnen. Eine exakte Zuordnung kann jedoch aufgrund der Vielzahl der zum Teil sehr nahe beieinander liegenden Reflektoren nicht vorgenommen werden. Die Reflektoren könnten jedoch auch auf die Heterogenität des Spritzbetons hindeuten. Die detektierten Reflektoren werden in dem separaten Teil-Endbericht der BAM [2] über die Ultraschall-Messungen in dem MgO-S³-Projekt genauer diskutiert.

5.1.6 Hydro-mechanische Interaktion Gebirge/Dambauwerk – Spannungs- und Permeabilitätsmessungen

5.1.6.1 Ausgangssituation

Entscheidende Randbedingungen für die Wirksamkeit eines Verschlussbauwerkes im Salzgebirge sind die Dichtheit des umgebenden Gebirges sowie der vorherrschende Spannungszustand, der zeitabhängig zu einem Aufkriechen des Gebirges (Konvergenz) auf das Abdichtungsbauwerk führt. Infolgedessen verschließen sich die Wegsamkeiten in der unvermeidlich vorhandenen Auflockerungszone (ALZ) der Hohlraumkontur bzw. der technisch bedingten Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge. Nach dem Aufkriechen des Gebirges verringert sich die Permeabilität der dilatanzbedingten ALZ; die Permeabilität der ALZ verringert sich mit der Zeit. Die Konvergenz ist abhängig vom Spannungszustand entsprechend der vorhandenen Teufenlage sowie den Kriecheigenschaften des Salzgebirges.

Zum Nachweis der Wirksamkeit des Aufkriechens des Gebirges waren die MgO-Bauwerke GV1 und GV2 mit verschiedenen Sensoren, im Wesentlichen acht Glötzi-Flächendruckgeber, auf der Kontaktfuge in verschiedenen Messebenen (jeweils senkrecht zum Verlauf der Streckenstummel, mit Gebern an den Stößen, auf der Sohle und an der Firste) im jeweiligen Dammbauwerk instrumentiert worden (vgl. Messkonfiguration GV2, Abbildung 20).

Der Messzeitraum für den GV2 reichte, wie in Abbildung 20 dargestellt, von 2008 bis 2019; während für den GV1 mit den in situ-Messungen bereits 2007 begonnen wurde und diese noch bis 2021 fortgesetzt wurden. Damit liegen, abgesehen von kurzzeitigen Messunterbrechungen, zwei vollständige Messserien für Dammbauwerke im carnallitischen Salzgebirge bis zu annähernd 14 Jahre vor. Für den GV2 bzw. entsprechend für den GV1, zeigten gemäß Abbildung 20 alle Messgeber einen positiven Trend (d.h. der Gebirgsdruck nimmt zu). Allerdings baute sich die konvergenzbedingte Spannung deutlich langsamer und damit weniger effektiv auf, als sie in den im Vorhaben CARLA durchgeführten Modellrechnungen prognostiziert wurde [35]. In 2019 wurden (vor der Lösungsdruckbeaufschlagung) max. 2,5 bar als Kontaktdruck auf der Kontur gemessen, was deutlich geringer war als bei der üblichen Konvergenz entsprechend der Teufenlage im Salinar mit einem Grundspannungszustand von ca. 18 MPa zu erwarten war.

Ursache für dieses Verhalten ist, dass das Gebirge am Versuchsort CARLA, wie in [35] ausgeführt wurde, aus dem für die Grube Teutschenthal bekannten Carnallit aufgebaut ist. Im Kaligestein liegt neben Carnallit als Hauptmineral noch eine quasi-schichtartige Verteilung der Minerale Tachyhydrit und Kieserit vor mit Mineralanteilen von 0 bis lokal 40 % und vorwiegend nestartiger Verteilung. Die einzelnen Nester treten i.d.R. voneinander isoliert auf und können Ausdehnungen von einigen Millimetern bis Dezimetern haben. Infolge der starken

Hygroskopizität der verschiedenen Minerale, insbesondere des Tachyhydrits, kommt es über die vorhandene ALZ aufgrund der stattfindenden, wechselseitigen Löse- und Fällungsprozesse von Tachyhydrit und Kieserit zusätzlich noch zur Bildung einer Verwitterungszone (VWZ), die entlang von Mineralschichten zu einer tiefgründigen Mineralauflösung, u.a. von Kieserit mit Bildung sehr weicher SO₄-haltiger Rückstände (entweder Bassanit: CaSO₄·0,5 H₂O oder Gips: CaSO₄·2 H₂O) führt.

Als Konsequenz aus dem Auftreten der nachgiebigen VWZ kriecht das Gebirge sehr verzögert auf, weshalb die Kontaktfuge als Wegsamkeit lange erhalten bleibt, was auch durch die integralen Permeabilitätsmessungen mit Druckbeaufschlagung über die Druckkammer am Bauwerk GV2 mittels Lösung mit entsprechender Reaktion eines Druckanstiegs an den Druckkissen bestätigt wurde (vgl. Abbildung 22).

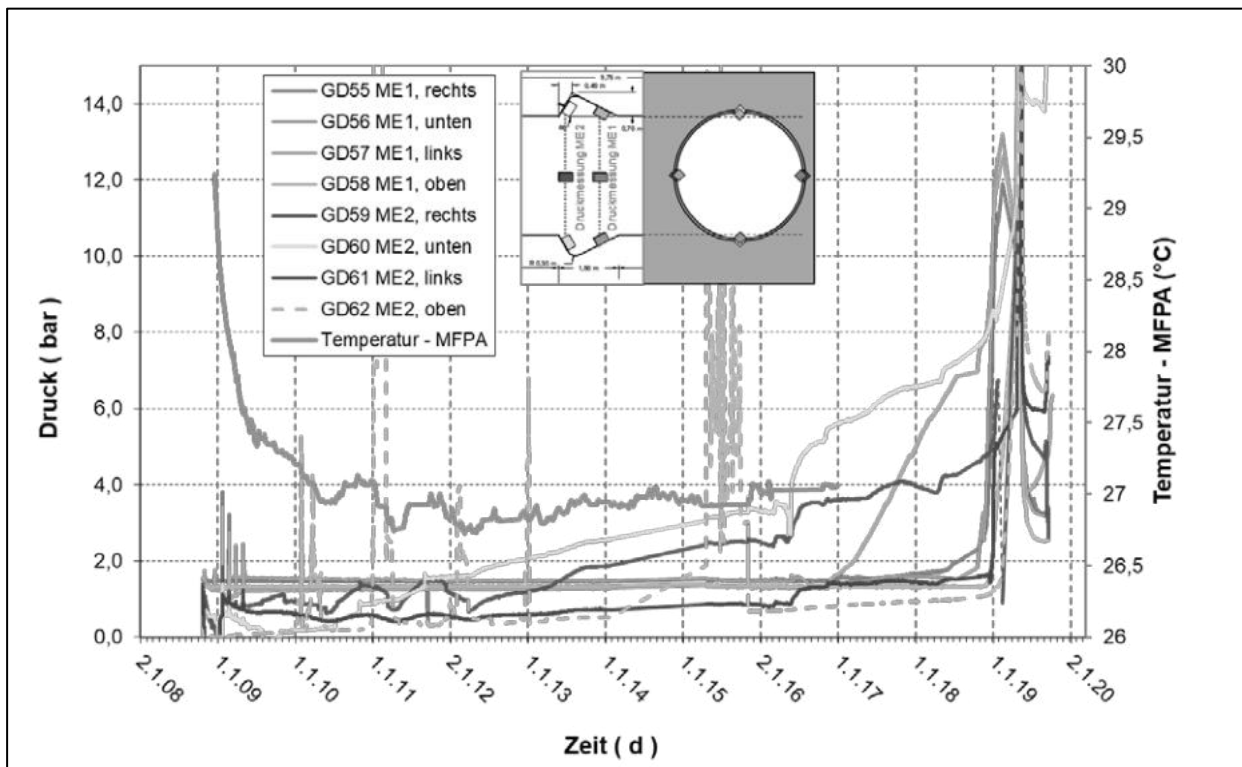


Abbildung 20: Auswertung des Langzeit-Monitorings am GV2 im Zeitraum vom 20.10.2008 bis 07.10.2019; das Inset zeigt die Anordnung der Messgeber im Bereich des „Zahns“

Unabhängig davon war bereits nach der Auffahrung des Versuchsfeldes (Versuchsstrecke mit den drei angrenzenden Streckenstummeln als Versuchsorte) mittels Hydrofracmessungen (HF) im Projekt CARLA [3] nachgewiesen worden, dass der Versuchsort weiträumig entlastet war. Die neuen Spannungsmessungen im Projekt MgO-S³ erfolgten in einem Vertikalprofil (ca. 10 m hinter dem Streckenbeginn in der Versuchsstrecke) quer durch den Pfeiler zwischen dem GV2 und GV3 in drei Bohrungen (horizontal, 45° in die Ulme und vertikal) auf Basis des Hydrofrac-Verfahrens, wobei jeweils der teufenabhängige Spannungsverlauf für die kleinste Hauptspannung bestimmt wurde.

Die 2009 initial (vor Einbau des Dammkörpers) im Projekt CARLA [3] gemessenen Spannungsverläufe sind in Abbildung 21 für den Pfeiler zwischen GV2 und GV3 mit den beiden Hohlraumkonturen dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Teufe in allen Bohrungen innerhalb eines Konturbereichs von ca. 5 m die minimale Hauptspannung deutlich zunimmt, wobei in der Bohrung in die Ulme erwartungsgemäß die Hauptspannung am schnellsten ansteigt. Danach wird in allen drei Bohrungen annähernd ein Spannungsplateau allerdings nur

mit einem maximalen kleinsten Hauptspannung von ca. 16 MPa erreicht, was niedriger als die lithostatische Spannung von ca. 18 MPa ist. Dies spiegelt die Entlastung dieses Baufeldbereichs wider.

Anmerkung: Das Prinzip der Frac-Methode bzw. des hydraulischen Aufreißens besteht in der künstlichen Risserzeugung im Gebirge in der Umgebung eines abgepackerten Bohrlochabschnittes und der Ermittlung des Druckgleichgewichtes zwischen Innendruck (Riss) und der senkrecht zur Rissfläche wirkenden Gebirgsdruckkomponente. Nach Erstellung einer 42 mm-Messbohrung wird über eine 2-fach-Packer-Bohrlochsonde mittels einer schrittweisen Vorgehensweise ((1) Dichtigkeitsnachweis des Messsystems, (2) Aufreißen des Gebirges mit Bestimmung des Gleichgewichtsdrucks im erzeugten Riss ($=\sigma_{\min}$), (3) erneuter Nachweis der Dichtheit, wenn der Fluidruck knapp unterhalb des Gleichgewichtsdrucks liegt, sowie (4) mehrere Refracs mit Bestimmung des Gleichgewichtsdrucks) die kleinste Hauptspannung σ_{\min} zuverlässig bestimmt.

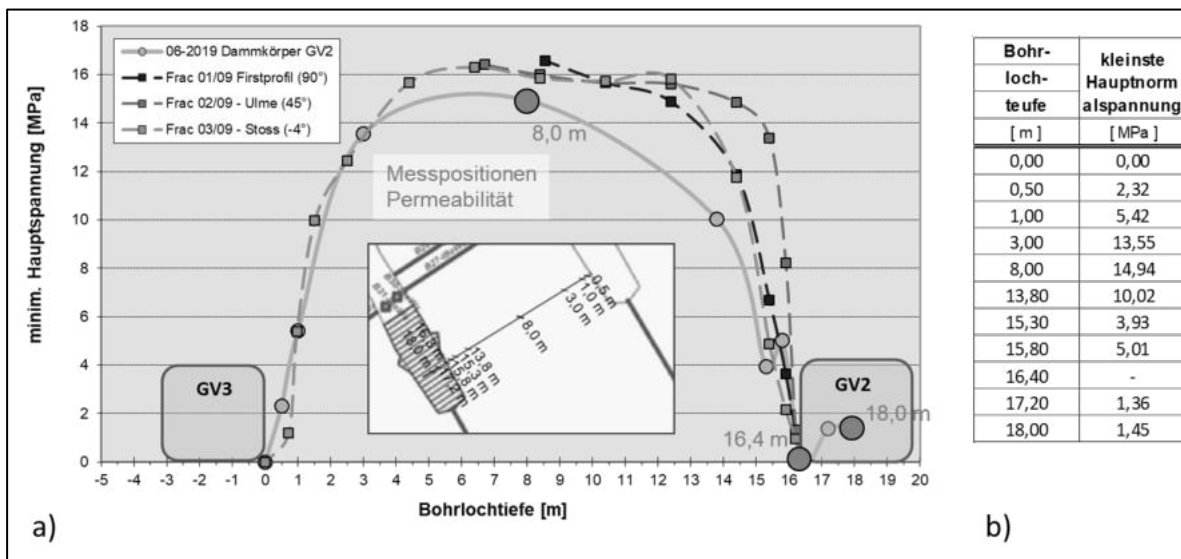


Abbildung 21: a) Spannungsverteilung im Salzpfeiler zwischen GV2 und GV3 in der Horizontalbohrung 2019 sowie entsprechend den früheren Messungen 2009 in drei Bohrungen mit unterschiedlicher Richtung. Das Inset zeigt die Lage der Bohrung 2019 mit den verschiedenen Messpunkten; b) Tabellarische Auflistung der teufenabhängigen Spannungswerte

5.1.6.2 HF-Wiederholungsmessung 2019

Für die Wiederholungsmessung zur Bestimmung des Spannungszustandes im Pfeiler sowie erstmalig im Bauwerk wurde im Jahr 2019 durch das IfG eine ca. 19 m lange Horizontalbohrung mit einem Durchmesser von 42 mm erstellt. Sie wurde aus dem GV3 so gestoßen, dass sie rechtwinklig auf den MgO-Spritzbetondamm GV2 zulief. Das Spritzbetonbauwerk wurde bei 16,4 m Teufe erreicht. Die Bohrung wurde bis in die Mitte des Spritzbetondammes (bei 18 m) abgeteuft. Mittels Kamerabefahrung wurde dies verifiziert. Beim Anbohren der Kontaktfuge trat Lösung aus (mutmaßlich infolge der vorhandenen Umläufigkeit um das Bauwerk bei der zeitlich parallel stattfindenden Lösungsdruckbeaufschlagung). Die Bohrung wurde dann bis zur Mitte des Bauwerks (bei ca. 18 m) weitergeführt.

In der neuen Horizontalbohrung wurden insgesamt 9 HF-Messungen erfolgreich durchgeführt (einschließlich der Messung im Damm), wobei unmittelbar auf der Kontaktfuge wegen der vorhandenen Durchlässigkeit keine Spannungsmessung möglich war. Die in Abbildung 21 dargestellten Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Der Maximalwert der kleinsten Hauptspannung im Zentrum des Pfeilers ist mit 15 MPa gegenüber der gemessenen kleinsten Hauptspannung σ_{\min} im Jahr 2009 (16 MPa) etwas kleiner.
- Die Spannungsverteilung ist unsymmetrisch, d.h. in Richtung Dammkörper verringert sich die kleinste Hauptspannung σ_{\min} , was mutmaßlich auf eine Spannungsverteilung in Richtung Damm hindeutet.
- Die Kontaktfuge ist relativ durchlässig und lösungsführend.
- Im Dammkörper beträgt σ_{\min} ca. 1,5 MPa und ist damit höher als die mit den Druckgebern gemessene Spannung in der Kontaktfuge.

Insbesondere mit dem Messwert von 1,5 MPa für σ_{\min} im Dammzentrum wird nachgewiesen, dass das Gebirge auf den Dammkörper aufkriecht, wobei allerdings nach den Ergebnissen aus [35] dieser Zustand bereits nach wenigen Jahren hätte erreicht sein sollen. Das bedeutet, die Kriecheigenschaften wurden in den Simulationsrechnungen um etwa einen Faktor 5 überschätzt. Infolgedessen hat sich in der Kontaktfuge nur eine im Vergleich zur Prognoserechnung wesentlich geringe Normalspannung aufgebaut. Meist 0,15 MPa und maximal 0,55 MPa wurden Anfang 2017 über die Druckkissen gemessen (Abbildung 22). Infolge des vergleichsweise geringen Kontaktdruckes ist die Kontaktfuge zwischen Bauwerk und Gebirge sowie die angrenzende Auflockerungs-/Verwitterungszone nicht vollständig geschlossen, sondern teilweise noch umläufig, wie bei der Druckbeaufschlagung des Bauwerks mit Lösung durch Lösungsaustritt, aber auch durch Messungen mit den Druckkissen nachgewiesen wurde.

Bei der schrittweisen Druckbeaufschlagung bis 12,5 bar stieg die mit den Flächendruckgebern GD55, GD56, und GD57 gemessene Spannung gegenüber ihrem jeweiligen Ausgangswert ab einem Druck von etwa 9,5 bar erheblich an. Dies deutet darauf hin, dass das Fluidruckkriterium in der Kontaktfuge ab etwa 9,5 bar in der Druckkammer überschritten wurde. Bei einem Druck von 12,5 bar in der Druckkammer wurde nach etwa 6 Wochen (01.12.2018 bis 15.01.2019) mit den Flächendruckgebern GD55, GD56, und GD57 in etwa die gleiche Spannung gemessen (Abbildung 23). Damit kann angenommen werden, dass das Fluidruckkriterium ab einer Druckbeaufschlagung von 9,5 bar an einigen Stellen der Kontaktfuge und ab 12,5 bar Druck sicher bei GD55, GD56 und GD57 überschritten wurde. Die Kontaktfuge war damit bei 12,5 bar durchlässig.

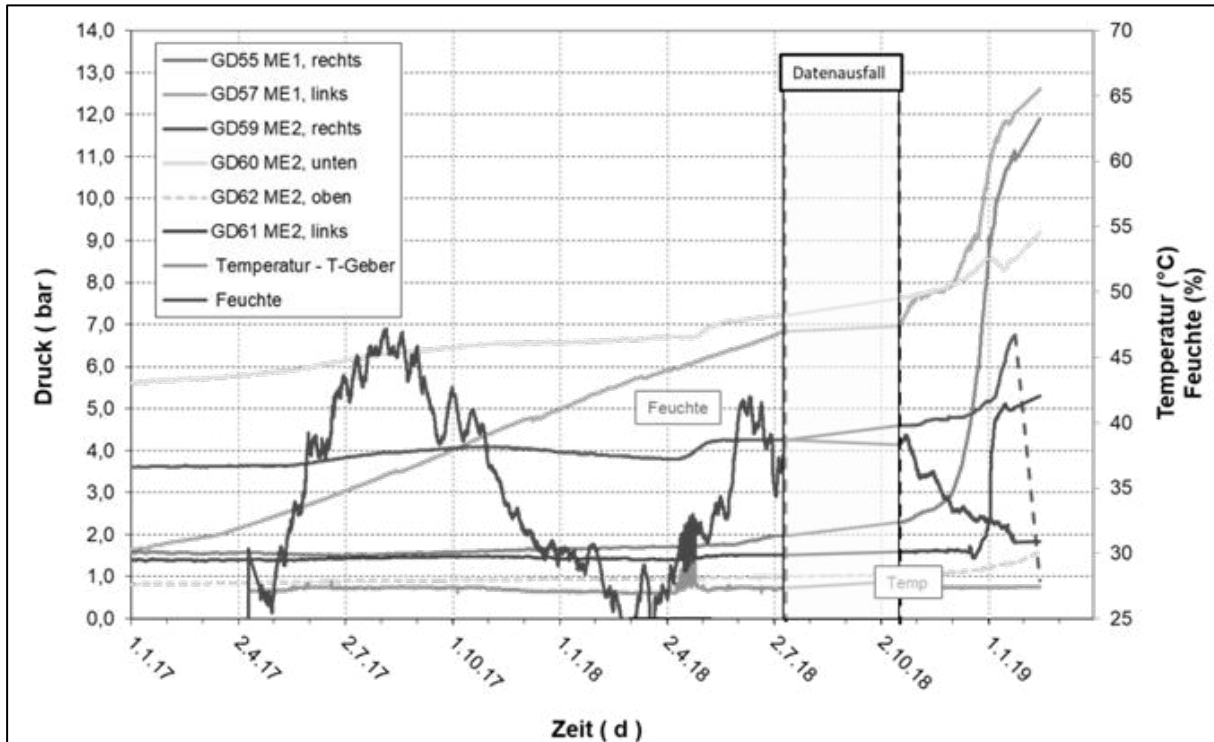


Abbildung 22: Monitoring der Flächendruckgeber während der Druckbeaufschlagungen des GV2 mittels Lösung im Zeitraum Anfang 2017 bis Frühjahr 2019

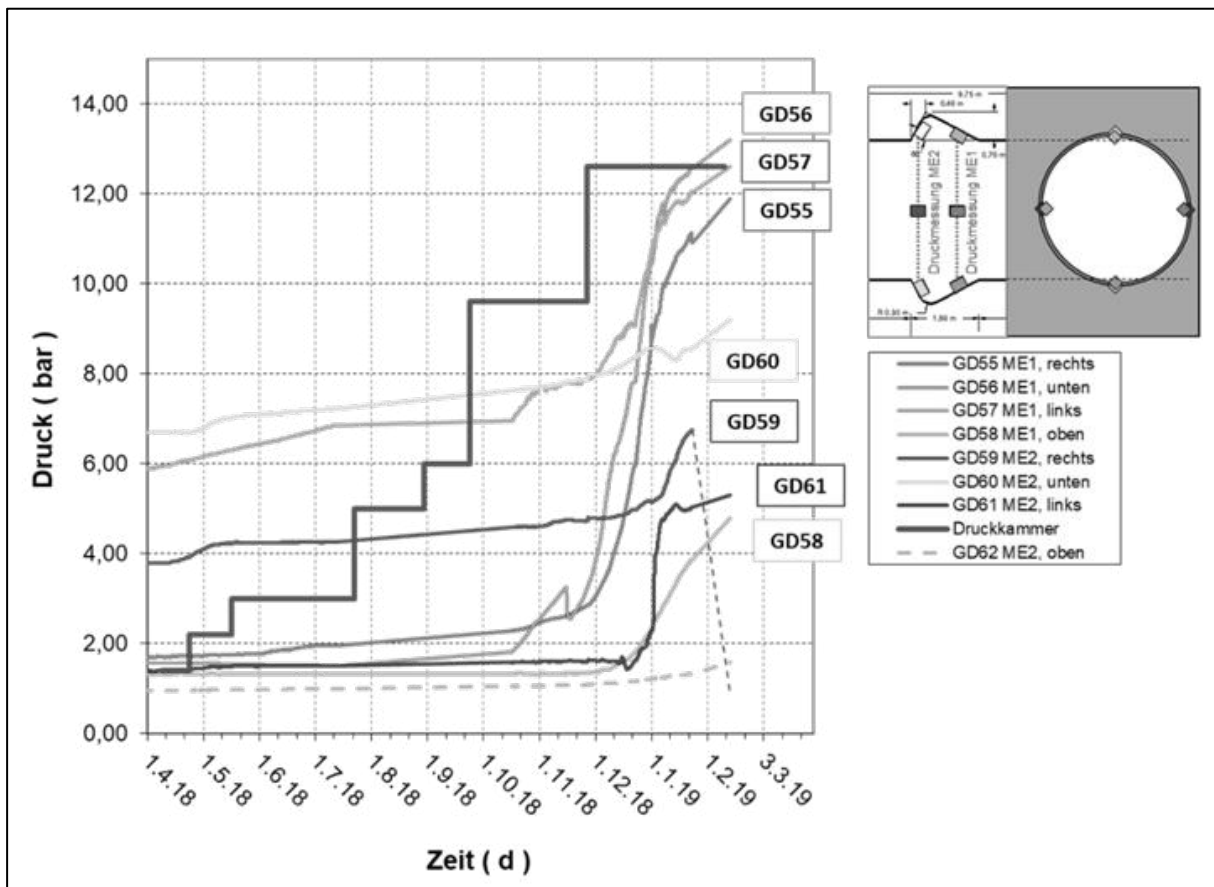


Abbildung 23: Detailausschnitt der Druckbeaufschlagungen am GV2 über schrittweise erhöhte Druckstufen

Damit stellte sich heraus, dass die Verwitterungszone aufgrund der Zersetzung des Gebirges noch weicher und nachgiebiger und in Folge dessen auch durchlässiger war, als dies im Jahr 2010 bei den gebirgsmechanischen Berechnungen angenommen wurde. Unter den Standortbedingungen der Grube Teutschenthal (Carnallitit mit Tachyhydrit und Kieserit) ist es deshalb nicht einfach (wenn nicht sogar ausgeschlossen) hinreichend dichte Abdichtungsbauwerke zu errichten. Infolgedessen wurden derartige Bauwerke für die 2. Fortschreibung des Langzeitsicherheitsnachweises auch nicht berücksichtigt [36].

5.1.6.3 Permeabilität im Salzpfeiler und im Dammzentrum

Der Nachweis der geomechanisch/-hydraulischen Integrität der geologischen Salzbarriere ist zwingende Voraussetzung für den Langzeitsicherheitsnachweis sowohl für Endlager für radioaktive Abfallstoffe als auch für Untertagedeponien zur Entsorgung chemisch- und radiotoxischen Abfalls sowie für Versatzbergwerke, in die u.a. mineralische Abfallstoffe zur Sicherung der Hohlräume eingebracht werden. Um einen dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der Schadstoffe in tiefen geologischen Formationen zu gewährleisten, muss sowohl eine nur geringe Permeabilität des Gebirges als auch ein entsprechend wirksamer Dammkörper nachgewiesen werden. Entsprechende Permeabilitätsmessungen wurden im GV2 bereits im vorherigen Vorhaben MgO-SEAL [4] durchgeführt und hier nochmals verifiziert, wobei allerdings der Schwerpunkt auf der Charakterisierung der Betonierabschnittsgrenzen lag (vgl. Kap. 5.2).

Mit der in 2019 neu gestoßenen Frac-Bohrung bestand in Ergänzung der übrigen Bohrlochmessungen auch die Möglichkeit, im Pfeiler und der Kontaktfuge sowie im Dammzentrum bei jeweils bekannter Einspannung die Permeabilität zu bestimmen.

Dafür wurde eine 2-fach-Packersonde eingesetzt. Die Mess- und Auswertemethodik ist beispielhaft in Abbildung 24 für den 5-tägigen Druckstoßtest im Dammzentrum dargestellt. Ausgehend vom gemessenen Initialdruck von ca. 1,5 MPa fiel der Druck nach dem Schließen des Messventils in der Druckkammer allmählich ab und ging mit dem Abströmen des Testfluids (NaCl-gesättigte MgCl₂-Lösung) gegen Null.

An drei Messpositionen (bei ca. 8 m im Zentrum des Carnallitit-Pfeilers; bei 16,4 m in der Kontaktfuge und bei 18 m im Dammzentrum) wurde die Permeabilität mittels Druckstoßtests, entsprechend der zuvor beschriebenen Vorgehensweise, quantitativ bestimmt.

In Abbildung 25 sind die Druckabfallkurven an den drei Messpositionen (bei ca. 8 m im Zentrum des Carnallitit-Pfeilers; bei 16,4 m in der Kontaktfuge und bei 18 m im Dammzentrum) gegenübergestellt. Daraus sind bereits erhebliche Unterschiede festzustellen. Der geringste Druckabfall für das Gebirge wurde im Zentrum des Carnallititpfeilers gemessen.

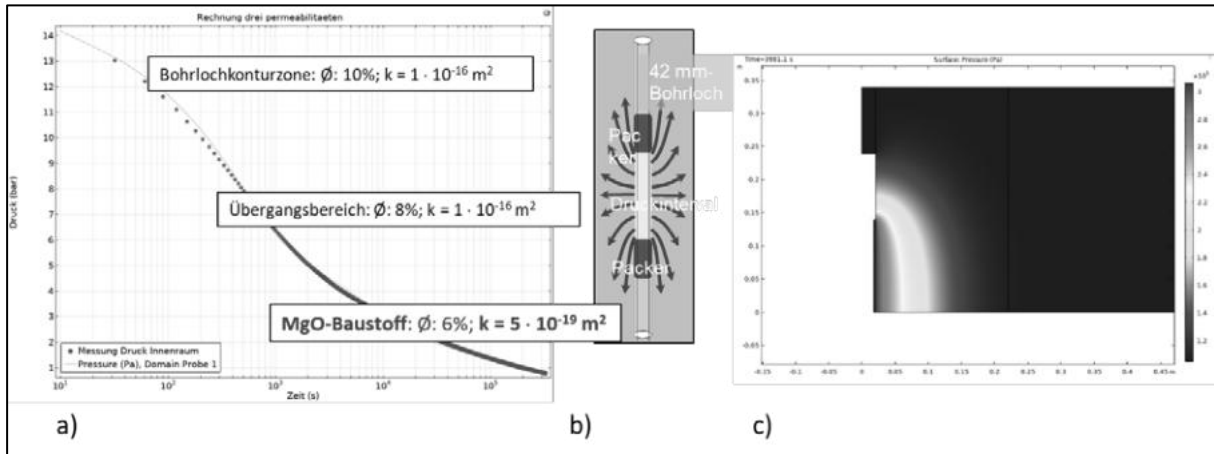


Abbildung 24: Druckstoßtest zur Permeabilitätsbestimmung im Dammkern (ca. 18 m); a) gemessene Druckabfallkurve mit schrittweiser numerischer Anpassung (3 Bereiche mit abnehmender Porosität); b) schematische Fluidausbreitung um die 2-fach-Packer-Messsonde; c) 2D-Druckverteilung im Porenraum am Ende des Injektionstests (Auswertung mittels COMSOL)

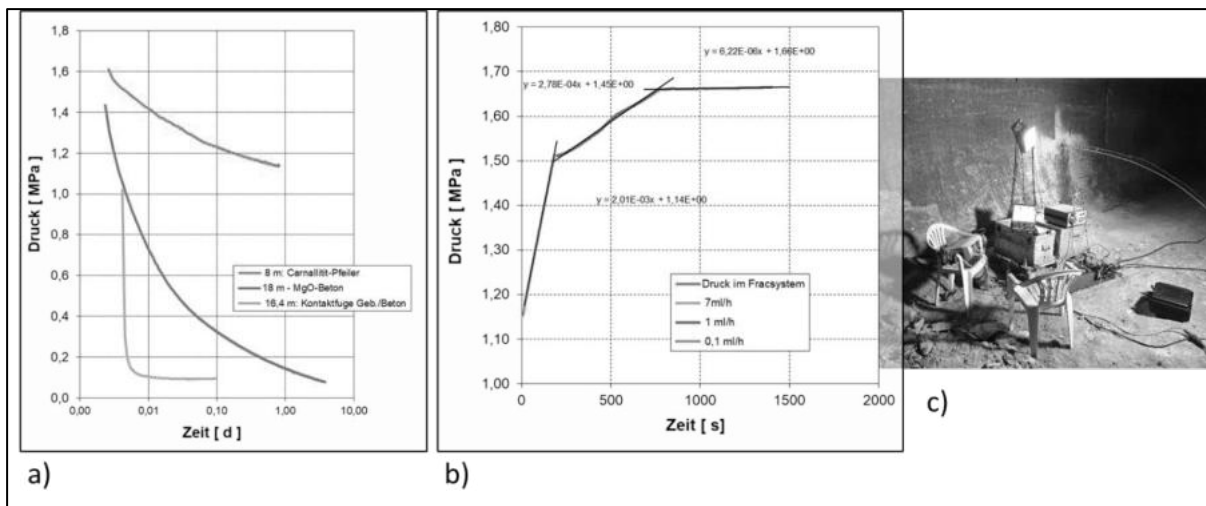


Abbildung 25: Permeabilitätsmessungen in der HF-Horizontalbohrung 2019; a) Druckstoßtests: 8 m – Carnallit-Pfeiler, 16,4 m – Kontaktfuge Gebirge/Beton, 18 m - im Zentrum des Damms; b) Bestimmung der Steifigkeit der Messanordnung; c) Messort (u.a. Datenlogger mit Injektionspumpe K3)

Die Druckfallkurve ergibt sich aus der Fluidausbreitung im Gebirge, wobei mit fortschreitender Tiefe im Gebirge sich Porosität (\emptyset) und Permeabilität (k) ändern, vgl. hierzu [37]. Inhaltliche Grundlage zur Bestimmung der Fluidpermeabilität bildet die numerische Lösung der Umkehraufgabe der rotations-symmetrischen zweidimensionalen Strömung und der Parameteridentifikation aus einem Pulstest entsprechend der zeitlichen Entwicklung des Druckes im Bohrloch und entsprechend der Stoffdaten des verwendeten Messfluides und der geometrische Versuchskonfiguration.

Dabei wird simuliert, wie die in das Gebirge abströmende Salzlösung das Ausgangsvolumen V_0 im Druckraum mindert und so dort der Druck absinkt, wobei V_0 zu Beginn der Shut-In-Phase mit p_0 auch das Hydrauliköl in den Druckleitungen umfasst und in Abhängigkeit von der Leitungslänge über die experimentell für jede Bohrlochkonfiguration bestimmte Systemkompressibilität berücksichtigt wird (vgl. Abbildung 25b). Die weitere Fluidausbreitung

im Gebirge wird als Raum-Diskretisierung über schalenartig angeordnete Bilanzelemente (Zellen) beschrieben, die mehrere Materialbereiche mit unterschiedlicher Permeabilität (k) und/oder Porosität (\emptyset) abbilden (Abbildung 24). Dies umfasst zunächst die Aufsättigung der Konturzone um das Bohrloch (Bohrloch-ALZ) und den sukzessiven Übergang ins durch die Bohrung nicht beeinflusste Gebirge. Die letztendlich ausgewiesene Permeabilität entspricht dem angepassten letzten Ast der Druckabfallkurve.

Die Auswertung der drei Messkurven lieferte folgende Ergebnisse:

- ❖ Bei ca. 8 m (Carnallit): angenommene Porosität für die Ausbreitung der Lösung: $\emptyset \approx 1\%$; $k = \ll 10^{-19} \text{ m}^2$ (Versuchsdauer: ca. 1 Tag)
Unter Berücksichtigung der geringen Dauer der Messung, mit der lediglich ein Maximalwert der Permeabilität ausgewiesen wird, der nur bedingt repräsentativ für das Gebirge ist, wird zumindest qualitativ die Dichtheit des anstehenden carnallitischen Salzgebirges gezeigt. Messungen von [37] weisen für den gleichen Versuchsort mit zeitlich sehr langen Messungen in bis zu 16 m langen, abgepackten Bohrlochintervallen eine integrale Permeabilität im anstehenden Gebirge deutlich kleiner als 10^{-22} m^2 aus.
- ❖ Bei ca. 16,4 m (Kontaktfuge): Aufgrund der Tatsache, dass das Testfluid integral nicht gleichmäßig abfließt, sondern eine diskrete Wegsamkeit entlang der Kontaktfuge besteht, war eine quantitative Auswertung des vorliegenden Druckabfalltests nicht möglich. Die Tatsache, dass der Druck innerhalb weniger Minuten abfiel, weist allerdings auf eine sehr hohe Durchlässigkeit hin.
- ❖ Bei ca. 18 m MgO-Baustoff: Im Dammkörper wurde nach 5 Tagen Versuchsdauer eine Permeabilität von $5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ (Porosität: 6 %) gemessen.

Die ermittelte Permeabilität im Dammkern ist sehr niedrig und liegt am unteren Rand des in [4] ausgewiesenen Permeabilitätsspektrums. Damit ist der Baustoff nur sehr gering durchlässig. Allerdings konnte nicht eindeutig festgestellt werden, ob bei der Messung eine Betonierabschnittsgrenze im von der Messung beeinflussten Bereich lag oder nicht. Aufgrund der nur geringen Spritzschichtdicke von etwa 10 cm, und dem Bohrdurchmesser von 42 mm wird davon ausgegangen, dass eine Betonierabschnittsgrenze zumindest in dem von der Durchströmung beeinflussten Bereich lag. Trotz der im Dammkern nahen (angenommenen) Betonierabschnittsgrenzen war die Permeabilität mit $5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ sehr gering.

5.2 Charakterisierung der Betonierabschnittsgrenzen

5.2.1 In situ Untersuchungen - Bohrungen B45, B46

Im Verlauf der Projekte CARLA [3] und MgO-SEAL [4] wurden die Bohrungen B38 bis B41 von der Ortsbrust des Spritzbetonbauwerkes GV2 in den Bauwerkskörper gestoßen und in situ sowie an Kernproben die Porosität und die Gas- und Lösungspermeabilität ermittelt. In diesen Bohrungen wurden mehrere Betonierabschnittsgrenzen (BAG) senkrecht zur Bohrlochachse durchteuft.

Die Bohrungen B45 und B46 verlaufen zur Bauwerksachse radial und schneiden eine BAG an. An den Kernproben aus den Bohrungen B45 und B46 wurde die Permeabilität im Bereich der BAG laborativ ermittelt.

In den radialen Bohrungen B45 und B46 wurde zusätzlich entlang einzelner BAG in situ die Permeabilität mit Gas und in der Bohrung B45 mit einer MgCl_2 -haltigen, NaCl-gesättigten Lösung ermittelt (siehe Abschnitt 5.2.1.2).

Die Permeabilitätsuntersuchungen in den Bohrungen B45 und B46 sind Bestandteil der im Kapitel 5.3.2 erläuterten Untersuchungen zur strömungstechnischen und geomechanischen Charakterisierung des GV2. Die Bohrungen wurden mit einem Abstand zur Ortsbrust des GV2 von 1,26 m für die Bohrung B45 und einem Abstand von 2,30 m für die Bohrung B46 aus der seitlichen Auffahrung entlang des Bauwerkes senkrecht in das Bauwerk gestoßen. Die Abbildung 26 und die Abbildung 27 geben eine Übersicht zur Lage der Bohrungen. Die Bohrung B45 wurde in einer Höhe von 2,3 m und die Bohrung B46 in einer Höhe von 2,0 m über der Streckensohle angesetzt. Die Bohrungen verlaufen parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen im Bauwerk.

Die Bohrungen wurden von der TS Bau GmbH mit einem Durchmesser von 70 mm im Trockenbohrverfahren unter Verwendung von trockener Druckluft als Spülfluid gestoßen. Die Bohrungen fallen mit 11,5° gegen die Horizontale in das Bauwerk ein. Die Bohrung B45 hat eine Gesamtlänge von 2,36 m, die Bohrung B46 von 3,20 m.

Das Kernmaterial aus den Bohrungen wurde nach der Entnahme aus den Bohrlöchern in Schlauchfolie verpackt, beschriftet und unter Tage bis zur Übergabe/Abholung für die Laboruntersuchungen gelagert. Eine Übersicht des Kernmaterials wird im Zusammenhang mit dem Arbeitsprogramm der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen in Anlage 3.1 gegeben. Anhand des Kernmaterials wurden die Testintervalle für die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen ausgewählt.

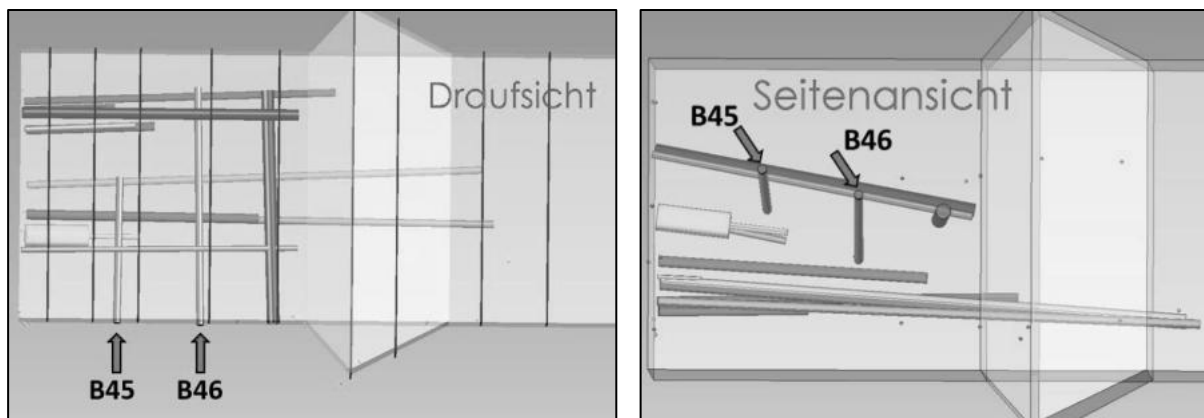


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Lage der Bohrungen B45 und B46 im Streckenverschlussbauwerk GV2 – links: Draufsicht, rechts: Seitenansicht



Abbildung 27: Lage der Bohrungen B45 und B46 im Streckenverschlussbauwerk GV2

5.2.1.1 Untersuchungsprogramm

In den beiden Bohrungen B45 und B46 wurde in situ die Permeabilität mit Gas bestimmt. In Auswertung der Ergebnisse dieser Permeabilitätsuntersuchungen wurden zusätzlich Permeabilitätsuntersuchungen mit MgCl₂-haltiger, NaCl-gesättigter Lösung in der Bohrung B45 durchgeführt.

Die effektive Gaspermeabilität des MgO-Betons am GV2 wurde für mehrere Testintervalle im Verlauf der beiden Bohrungen über Impulstest entsprechend der Testmethodik laut Anlage 2.1 durch Druckbeaufschlagung ermittelt. Die Gaspermeabilitätsuntersuchungen wurden mit trockener Druckluft als Testfluid durchgeführt.

Für die in situ-Permeabilitätsuntersuchung mit Salzlösung wurde die Bohrung B45 über den Teufenbereich von 0,43 m bis zum Bohrlochtieftsten in 2,36 m konstant mit einem Flüssigkeitsdruck beaufschlagt. Über den Zeitraum des Tests wurden der Druck und der Volumenstrom der Salzlösung erfasst. Die dafür eingesetzte Versuchsanordnung ist in Abbildung 28 dargestellt. Der Druck wurde mit einem konstanten Gasdruck aufgebracht, der über einen Phasentrenner (Hydrauliköl) auf die Salzlösung übertragen wurde. Der Volumenstrom wurde für das Hydrauliköl mit einem Coriolis-Sensor (Messbereich: 0 - 60 ml/h, Messunsicherheit: 0,01 ml/h) der Firma Bronkhorst gemessen (siehe Abbildung 28).

Eine Übersicht der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen für die Bohrungen B45 und B46 wird in Anlage 3.1.1 gegeben. Die Ergebnisse zu den Permeabilitätsuntersuchungen werden im Kapitel 5.2.1.2 erläutert.



Abbildung 28: Verwendete Versuchsausrüstung für die Testung der Bohrung B45 mit MgCl₂-haltiger, NaCl-gesättigter Lösung im Teufenbereich 0,43 m bis 2,36 m

5.2.1.2 Ergebnisse der in situ Permeabilität

Die Ergebnisse der in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt und in Abbildung 30 in Abhängigkeit von der Position des Messintervalls entlang des Bohrlochverlaufes dargestellt. Die horizontalen Balken in der Darstellung kennzeichnen die Länge des Testintervalls des jeweiligen in situ-Testes.

In der **Bohrung B45** wurde an den Messpunkten B45_100_G1 im Teufenbereich 1,00 m bis 1,20 m und B45_120_G1 im Teufenbereich 1,20 m bis 1,40 m eine Gaspermeabilität von etwa $2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ gemessen. Dies ist, im Vergleich zu den Erfahrungswerten für das Material und im Vergleich zu den weiteren Ergebnissen im Bohrungsverlauf, eine höhere Permeabilität (Tabelle 4). Es ist davon auszugehen, dass diese durch die im Bereich der Messpunkte B45_100_G1 und B45_120_G1 schräg angeschnittene Betonierabschnittsgrenze verursacht wurde. Gemäß Kernansprache erfasst der Prüfraum von Messpunkt B45_100_G1 den Kernbereich von 0,80 m bis 1,00 m - siehe Abbildung 29. In diesem Teufenbereich läuft die Bohrung schräg aus der BAG heraus. Im Bereich 0,97 m bis 1,26 m ist am Kern eine schräge Bruchkante vorhanden. Diese wird als höher permeabler Bereich und damit als Ursache für die erhöhte Permeabilität angesehen.

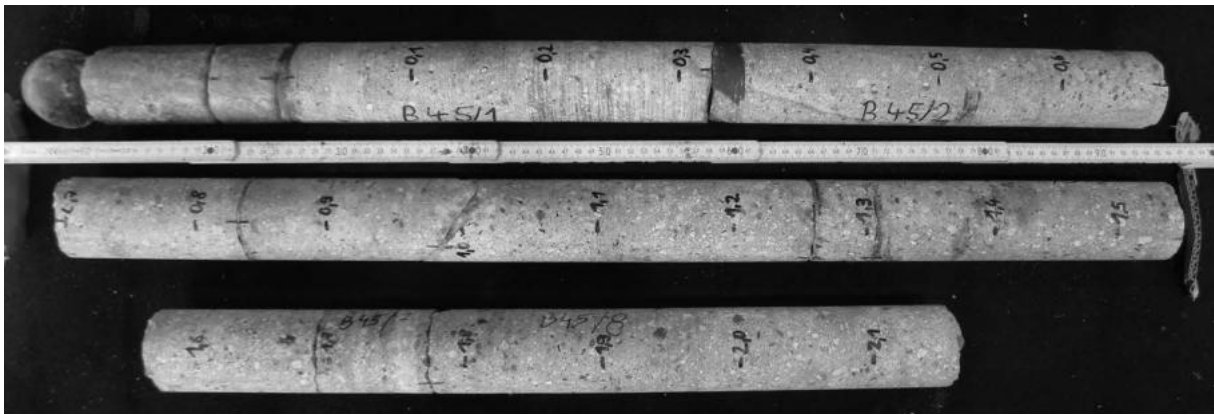


Abbildung 29: Kern aus der Bohrung B45

Bei den weiteren Messpunkten wurde eine Permeabilität $< 2,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ gemessen (Abbildung 30 und Tabelle 4).

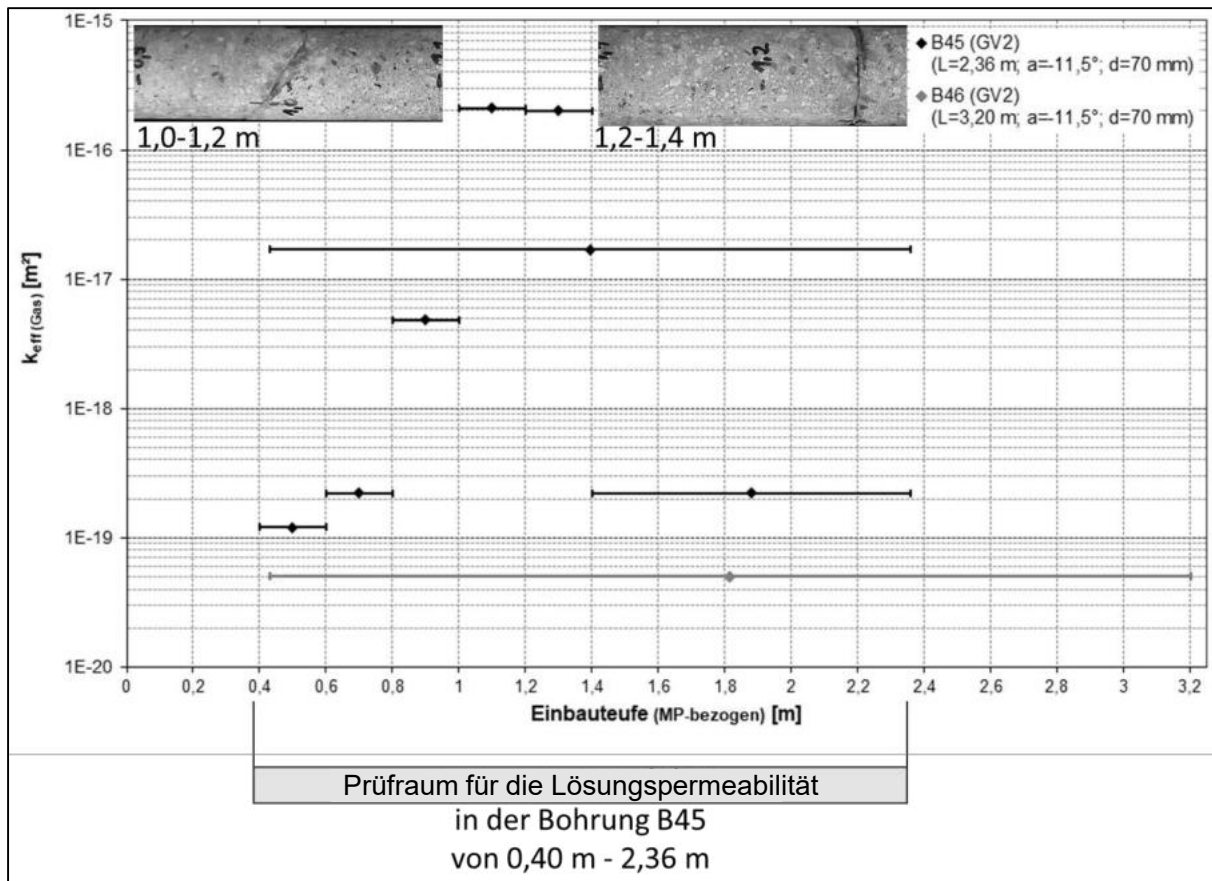


Abbildung 30: In-situ ermittelte Permeabilität für Gas in den Bohrungen B45 und B46

In der **Bohrung B46** wurden die in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen mit der integralen Messung über die Bohrlochlänge von 0,43 m bis zum Bohrlochtiefsten in 3,2 m Tiefe begonnen. Es wurde für diese 2,77 m lange Strecke eine effektive Gaspermeabilität von $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ gemessen. Vor diesem Hintergrund wurde die Permeabilität für diskrete Testintervalle entlang des Bohrungsverlaufes nicht weiter untersucht.

Eine Besonderheit des vorliegenden Baustoffes ist das **Verhalten beim Trocknen**. Der MgO-Spritzbeton mit der 5-1-8-Bindemittelphase enthält keine Restporenlösung, ist also für die stöchiometrische Zusammensetzung "trocken". Je nach Lagerungsbedingungen (primär der Wasserdampfpartialdruck) kommt es je nach Porengrößenverteilung und dem daraus resultierenden Kapillardruck des Materials (siehe Abschnitt 5.2.2.3.3, u.a. Abbildung 36 und Abbildung 37) zur Aufnahme von Wasser aus der umgebenden Atmosphäre - Absorption, Kapillarkondensation. Dieses Wasser kann in Wechselwirkung mit der 5-1-8-Bindemittelphase und mit dem NaCl-Zuschlag (sofern vorhanden) treten. Für den GV2 wurde jedoch silikatischer Zuschlag verwendet. Daraus kann man schlussfolgern, dass sich formell eine Lösung in den zugänglichen Poren an der Baustoffoberfläche bildet.

Verändert sich der Gehalt an freiem, nicht chemisch gebundenem Wasser in den oberflächennahen Poren mit Bezug zu dem stöchiometrisch begründeten „trockenen“ Ausgangszustand, kann man formell von einem Feuchtegehalt¹ ausgehen. Aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Feststoffes wird jeder Feuchtegehalt / jedes freie, chemisch nicht gebundene Wasser zu Lösungsprozessen im Kontakt zum Feststoff führen. Daher wird jede wasserbasierte Flüssigkeit im Porenraum als Salzlösung angesehen. Für die Betrachtung des Flüssigkeitsvolumens im Porenraum ist daher der Salzlösungsgehalt die maßgebende Größe. Dazu ist zu berücksichtigen, dass jede Änderung des Feuchtegehaltes / des Lösungsgehaltes immer mit der Aufnahme oder der Abgabe von reinem Wasser einhergeht. Über einen langen Zeitraum wird jedoch alles verfügbare Wasser mit der fortschreitenden Hydratisierung des Baustoffes und der Bildung von Hydratphasen verbraucht werden.

Aufgrund des Fließgleichgewichtes der 5-1-8-Bindemittelphase wurden die Proben für die „Trocknung“ bzw. „Wassergehaltsbestimmung“ unter standardisierten Grubenbedingungen (25 °C und 32,5 % rel. Feuchte) gelagert. Durch diese Bedingungen wird der Zustand des Baustoffs am Einbauort (vor einem angenommenen Flüssigkeitszutritt) wieder eingestellt. Diese Bedingungen können in einem Exsikkator oder in einem Klimaschrank realisiert werden. In der weiteren Bearbeitung ist es dann als sinnvoll angesehen worden, die Proben bei **45 °C und 8 % rel. Feuchte** im Klimaschrank zu trocknen bzw. zu lagern. Diese Bedingungen sollten bei zukünftigen Untersuchungen eingehalten werden.

In früheren Untersuchungen wurde vor Bestimmung der Reindichte und der Trockendichte auch noch nach anderen Verfahren getrocknet – meist im Trockenschrank bei 105 °C oder bei 60 °C. Diese Trocknungsbedingungen sind aber aus aktueller Sicht nicht adäquat für die Fragestellung, wie groß der Feuchtigkeitsgehalt / Wassergehalt der Probe ist.

Die Trockendichte und die Reindichte und die daraus errechnete Porosität wurden also ermittelt, nachdem die Proben unter den o.g. Bedingungen (25 °C und 32,5% rel. Feuchte) gelagert waren. Angaben zu einem so genannten „Wassergehalt“ und einem „Sättigungsgrad“ sollten zukünftig entsprechend kommentiert und die zugrundeliegenden Trocknungsbedingungen angegeben werden.

Aufgrund der Baustoffeigenschaften (5-1-8-Bindemittelphase) hat das Material für die Lagerungsbedingungen 25 °C und 32,5 % relative Luftfeuchte theoretisch einen Wassergehalt $w = 0$ und damit eine Anfangssättigung $S = 0$. Das Abweichen dieses Wertes von $S = 0$ wird durch eine durch die Umgebungsbedingungen bedingte nachträgliche Aufnahme von Wasserdampf im Ergebnis der Kapillardruckbedingungen im Randbereich des Materials verursacht.

Im Ergebnis der Untersuchungen an dem Kernmaterial aus den beiden benachbarten Bohrungen B42b und B48 ergibt sich ein **Feuchtegehalt** von $0,31 \pm 0,07$ Ma.% (0,22 - 0,43 Ma.%, $N = 10$), für eine Trocknung bei 45 °C und einer relativen Luftfeuchte von ~8 %. Für diesen Feuchtegehalt ergibt sich eine **Porenraumsättigung** von $13,6 \pm 3,7$ Vol.% (9,8 -

¹ Feuchtegehalt – siehe Anlage 1.2

23,2 Vol.%, N = 10). Deshalb wird die ermittelte Gaspermeabilität als effektive Permeabilität, für die ein Einfluss des Salzlösungsvolumens im Porenraum nicht ausgeschlossen werden kann, angesehen.

Die **Porengrößenverteilung** wurde an einzelnen Proben mit einem kleinen und einem großen Dilatometer bestimmt. Für die Kenntnisse zur Porengrößenverteilung des Materials (siehe Abbildung 34 sowie Abbildung 36) und die Erläuterungen im Kapitel 5.2.2.3.4 ist davon auszugehen, dass der für die Lagerungsbedingungen nachgewiesene Lösungsgehalt maßgeblich in den Poren mit den kleinsten Porendurchmessern und dem höchsten Kapillardruck enthalten ist. Für den Gasströmungsprozess ist jedoch von einer Konzentration auf die strömungstechnisch verbundenen Poren mit den maximalen Porendurchmessern auszugehen. Vor diesem Hintergrund wird der Einfluss der abgeschätzten Flüssigkeitssättigung von $13,6 \pm 3,7$ Vol.% (9,8 - 23,2 Vol.%, N = 10, Trocknung bei 45 °C und 8 % rel. Feuchte) auf die Gaspermeabilität als gering angesehen.

Ausgehend von den Ergebnissen der in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen wurde in der **Bohrung B45 ein in situ-Permeabilitätstest mit Salzlösung** durchgeführt. Als Testlösung wurde eine 2 molale MgCl₂-haltige, NaCl-gesättigte Lösung verwendet. Am 17.06.2021 wurde das Bohrloch mit ca. 9 Liter Salzlösung befüllt. Über die Standzeit der Salzlösung in der Bohrung bis zum Beginn des Permeabilitätstests am 12.07.2021 ist die Salzlösung in das Bauwerk unter dem Einfluss des Kapillardruckes eingedrungen. Unter Berücksichtigung der Kapillardruckkurve in Abbildung 37 ist für die initiale Sättigung des Materials von $13,6 \pm 3,7$ Vol.% (9,8 - 23,2 Vol.%, N = 10, Trocknung bei 45 °C und 8 % re. Feuchte) von anfänglichen Kapillardrücken in der Größenordnung von 30 MPa und höher auszugehen.

Ausgehend von dieser Annahme kann angenommen werden, dass in der Standzeit der Salzlösung in der Bohrung die Salzlösung in den Porenraum eingedrungen ist und sekundäre Wechselwirkungen zwischen Salzlösung und Feststoffmatrix eingetreten sind. Es wird vermutet, dass es dabei zu Sekundärreaktionen von unvollständig ausreagiertem Magnesiumoxid und zu einer Umkristallisation der 5-1-8-Phase zur 3-1-8-Phase gekommen ist. Dabei kann angenommen werden, dass das Volumen der Feststoffmatrix zunimmt und sich das Porenvolumen reduziert. Durch diese Prozesse nimmt die Permeabilität entlang des Bohrungsverlaufes ab.

Der in situ-Test mit Salzlösung wurde als Test mit konstantem Flüssigkeitsdruck durchgeführt. Über die Testdauer wurde der Volumenstrom der Salzlösung gemessen. Die über den Testverlauf erfasste Druck- und Volumenstromganglinie ist in Abbildung 32 dargestellt. Der Versuch wurde über einen Zeitraum von 1750 Stunden (73 Tage) durchgeführt. Im Versuchsverlauf wurde der Testdruck von 0,4 MPa am Beginn des Versuches nach 580 Stunden auf 0,5 MPa und nach 1250 Stunden auf 0,8 MPa erhöht. Die einzelnen Peaks in der relativen Luftfeuchte sind auf die Anwesenheit von Mitarbeitern am Standort zurückzuführen. Dies wird aus der guten Übereinstimmung mit den Zeitpunkten der Druckerhöhung deutlich.

Die Darstellung der Volumenstromganglinie in Abbildung 32 zeigt, abgesehen von einem anfänglich etwas höheren Volumenstrom bei der Druckbeaufschlagung, einen Volumenstrom in der Nähe des Messbereiches des verwendeten Volumenstromsensors von 0,01 ml/h. Über den gesamten Testverlauf wurde ein Volumen von 0,052 l injiziert. Für dieses Salzlösungsvolumen und die geometrischen Bedingungen in der Bohrung ergibt sich eine Permeabilität von kleiner $1 \cdot 10^{-21}$ m² unter Annahme eines Abstroms über die gesamte Mantelfläche der Bohrung. Unter Berücksichtigung der Kenntnisse aus den Gaspermeabilitätsuntersuchungen ist davon auszugehen, dass anfänglich in Abschnitten der Bohrung (MP B45_100_G1 (1,0 – 1,2 m) und B45_120_G1 (1,20 m bis 1,40 m)), siehe Tabelle 4, eine höhere Permeabilität vorhanden war. Aus dem integralen Versuch über die gesamte Bohrlochlänge ist ein solches Ergebnis nicht identifizierbar. Der Testverlauf weist für das gesamte Testintervall die genannte geringe Permeabilität nach.

Für eine Beurteilung der Strömungsprozesse wurde das Volumen der abgeströmten Salzlösung in die Poren berechnet. Aus Voruntersuchungen wurden aus Dichtemessungen nach der Trocknung bei 45 °C eine Porosität von $5,2 \pm 0,8$ Vol.% (4,1 - 6,7 Vol.%, N = 10) ermittelt. Die Trocknung bei 25 °C und 0 % relativer Luftfeuchte über Calciumchlorid ergibt eine Porosität von $9,6 \pm 0,2$ Vol.% (9,5 - 9,8 Vol.%, N = 2).

Für eine Porosität von 5,2 Vol.% ergibt sich eine theoretische Eindringtiefe der Sättigungsfront von maximal 7,3 mm um die Bohrung. Dies ist eine theoretische Abschätzung. Diese soll verdeutlichen, wie wenig Porenraum bei der geringen Permeabilität des Materials theoretisch angeschlossen wird. Für die in situ-Bedingungen ist davon auszugehen, dass die Salzlösung lokal, z.B. entlang von angeschnittenen BAG, tiefer in den Bauwerkskörper eindringt. Insgesamt ist das eingedrungene Lösungsvolumen als sehr gering anzusehen.

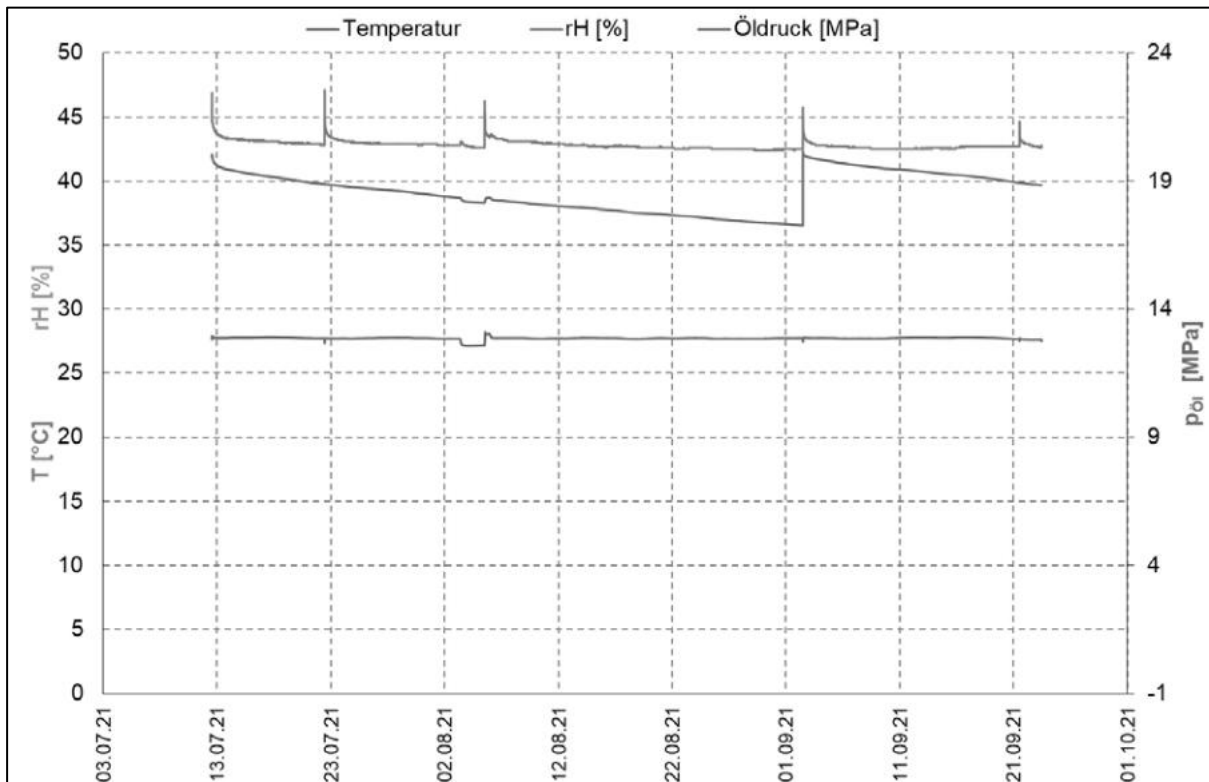


Abbildung 31: Temperatur und rel. Luftfeuchte während der Druckhaltephasen

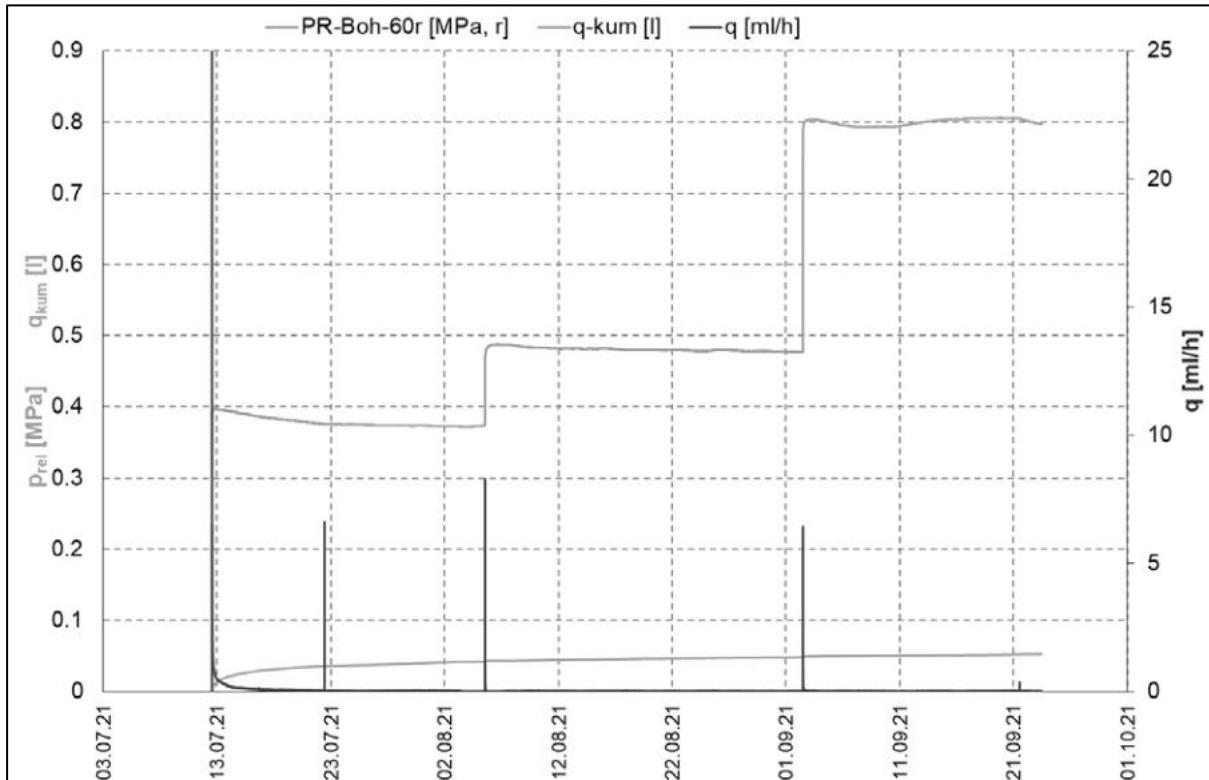


Abbildung 32: Volumenstrom und Druckganglinie während der Druckhaltephasen

Tabelle 4: Ergebnisse der Permeabilitätsuntersuchungen in der B45

Bohrung	Messpunkt- bezeichnung	Prüfdruck	Prüfmedium	Teufe OK	Teufe UK	Teufe MP	Permeabilität	Bemerkung
-	-	[MPa]		[m v. AP]			[m ²]	-
B45	B45_043_INT_G1	0,8	Gas	0,43	2,36	1,40	$1,7 \cdot 10^{-17}$	
	B45_043_INT_L1	0,4	Salz- lösung	0,43	2,36	1,40	$< 1 \cdot 10^{-21}$	
	B45_040_G1	0,8	Gas	0,40	0,60	0,50	$1,2 \cdot 10^{-19}$	
	B45_060_G1	0,8		0,60	0,80	0,70	$2,2 \cdot 10^{-19}$	
	B45_080_G1	0,8		0,80	1,00	0,90	$4,8 \cdot 10^{-18}$	
	B45_100_G1	0,8		1,00	1,20	1,10	$2,1 \cdot 10^{-16}$	BAG
	B45_120_G1	0,8		1,20	1,40	1,30	$2,0 \cdot 10^{-16}$	Bruch- kante
B45_140_INT_G1	0,8	1,40		2,36	1,88	$2,2 \cdot 10^{-19}$	integral Bohrung	
B46	B46_043_INT_G1	0,8	Gas	0,43	3,20	1,82	$5,0 \cdot 10^{-20}$	integral Bohrung

5.2.2 Laborversuche/Untersuchungen am Kernmaterial – Bohrungen B42b und B48

5.2.2.1 Probenmaterial

Zusätzlich zu den in situ-Untersuchungen in den Bohrungen B45 und B46 wurden die Kernproben aus den Bohrungen B42b und B48 im Labor untersucht.

Die Bohrungen wurden mit einem Abstand von der Sohle von ca. 1 m axial (von der Luftseite) in das Bauwerk gestoßen. Die Bohrung B48 wurde ca. 2,7° einfallend abgeteuft.

Die Abbildung 33 gibt eine schematische Übersicht zur Lage der Bohrungen an der Ortsbrust.

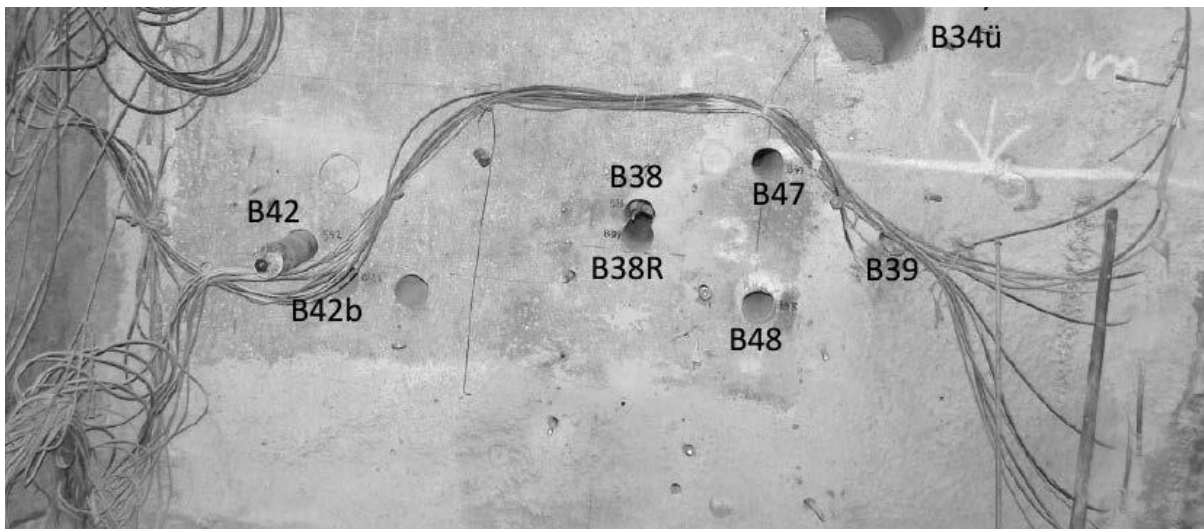


Abbildung 33: Anordnung der Bohrungen B48 und B42b an der Ortsbrust des GV2

Die Bohrungen verlaufen senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen in das Bauwerk. Sie wurden von der TS Bau GmbH mit einem Durchmesser von 132 mm für die Bohrung B42b und 100 mm für die Bohrung B48 im Trockenbohrverfahren unter Verwendung von trockener Druckluft als Spülfluid gestoßen. Die Bohrung B42b erreichte eine Gesamtlänge von 1,19 m, die Bohrung B48 von 6,20 m.

Aus dem Kernmaterial der Bohrung B42b wurden Proben präpariert, um mit der Quecksilberporosimetrie die Porengrößenverteilung zu messen und den vorliegenden Kenntnisstand [4] zu erweitern. Die Methodik wird in Anlage 1.4.2. erläutert.

An dem Kernmaterial der Bohrung B48 wurden Laboruntersuchungen zur Gaspermeabilität im Originalzustand und zur Porosität durchgeführt.

5.2.2.2 Untersuchungsprogramm

Eine Übersicht des Untersuchungsprogrammes an den Kernproben der Bohrungen B42b und B48 wird in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Untersuchungsprogramm Laboruntersuchungen Kernmaterial GV2

Probenbezeichnung	Teufe Mittelpunkt Probe	IBeWa-Nr.	Lage zur BAG	Probenart	Fotodokumentation	Feuchtdichte	Feuchtegehalt	Reindichte	Porosität - μ CT	Porosität aus Hg- Porosimetrie	k_{Gas} ; Manteldruck 1,1 MPa; Fluiddruck 0,6 MPa
B42b	0,13	P302-1/1		BS	✓					✓	
	0,39	P302-1/2		BS	✓					✓	
	0,86	P302-1/3		BS	✓					✓	
	0,15	P302-1/4		BS			✓25 °C/ $F_R=0\%$	✓			
	0,15	P302-1/5		BS			✓25 °C/ $F_R=0\%$	✓			
B 48	1,83	P302-2/4		KS	✓	✓					✓
	2,01	P302-2/5		KS	✓	✓					✓
		P302-2/7		BS			60 °C✓	✓			
		P302-2/8		BS			60 °C✓	✓			
	2,03	P302-2/13		KS	✓	✓					✓
	2,05	P302-2/14		KS	✓	✓					✓
	2,13	P302-2/18		KS	✓	✓					✓
	2,15	P302-2/19		KS	✓	✓					✓

5.2.2.3 Ergebnisse

5.2.2.3.1 Bemerkungen zum Feuchtegehalt (siehe auch Anlage 1.2)

Wird die Porosität einer Baustoffprobe aus der Reindichte und der Trockendichte ermittelt, so wird üblicherweise angenommen, dass im Baustoff eine gewisse Wassermenge bzw. Feuchte enthalten ist. Dafür werden die Proben getrocknet – bei Zement- oder Betonproben üblicherweise im Trockenschrank bei 105 °C.

Diese Verfahrensweise ist für MgO-Baustoff so nicht anwendbar. Es wird deshalb ein alternatives Verfahren angewandt. Dabei handelt es sich nicht um eine "Trocknung" im eigentlichen Sinne, sondern um eine Lagerung der Materialproben unter bestimmten Randbedingungen. In den meisten Fällen wurden die Proben bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchte gelagert.

Der MgO-Baustoff der Rezeptur D4 besteht aus folgenden Komponenten:

- 5-1-8-Bindemittelphase: $5 \text{ Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{ H}_2\text{O}$,
- nicht umgesetztes MgO (Überschuss hinsichtlich der stöchiometrisch erforderlichen Menge),
- Zuschlag (Hartgesteinskörnung oder Steinsalz),
- luffterfüllte Poren (keine Restporenlösung, da alle Lösung verbraucht ist).

Die nach diesen Lagerungsbedingungen ermittelte Trockendichte, Reindichte und die daraus berechnete Gesamtporosität können als Parameter verwendet werden, die das mechanische und hydraulische Verhalten des Baustoffs für die Lagerung bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchte beschreiben. Für diese Lagerungsbedingungen ist der Wasser- bzw. Lösungsgehalt des Baustoffs aufgrund der genannten Eigenschaften theoretisch gleich Null. Eine Beurteilung der Sättigung der Proben auf der Grundlage der Ergebnisse der Lagerung bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchte ist nur eingeschränkt möglich. Die für die Beurteilung des Kapillardruckes und der effektiven Permeabilität erforderliche Porenraum-sättigung setzt voraus, dass das Volumen der chemisch nicht gebundenen Salzlösung im Porenraum gemessen wird.

Nachfolgend werden nur die unter den oben angegebenen Bedingungen untersuchten Proben angeführt.

Die Ergebnisse der Trocknung des MgO-Baustoffes des GV2 (Rezeptur D4) ergeben für den Zeitpunkt der Probennahme des Materials bzw. den Kristallisationsstand der Bindemittelmatrix im Ergebnis unterschiedlicher Trocknungs- und Lagerungsbedingungen folgende Feuchten – (siehe auch Abbildung 280 im Anhang):

Lagerungsbedingungen	Feuchtegehalt ± Stand.abw. (Min. – Max., Anzahl)
32,5 % F _R – über MgCl ₂ ·6 H ₂ O	-0,16 ± 0,19 Ma.% (-0,45 - 0,14 Ma.%, N = 27)
~8 % F _R – bei 45 °C	0,31 ± 0,07 Ma.% (0,22 - 0,43 Ma.%, N = 10)
~3 % F _R – bei 60 °C	0,54 ± 0,05 Ma.% (0,48 - 0,63 Ma.%, N = 10)

Für die Bedingungen der Lagerung bei einer relativen Luftfeuchte von 32,5 %, die recht gut auf die Einbaubedingungen in der Grube übertragbar sind, wird offensichtlich kein Wasser mobilisiert. Vielmehr deutet sich an, dass der Baustoff unter den Lagerungsbedingungen Wasser aufnimmt. Aus dem Ergebnis wird deutlich, dass die Lagerung des Materials bei einer Luftfeuchte von 32,5 % zur Beurteilung des Materialverhaltens geeignet ist. Eine Schlussfolgerung zur Feuchte und zur Sättigung ist aus diesen Ergebnissen nicht möglich. Die ermittelte Massendifferenz bzw. Feuchte führt zu der Schlussfolgerung, dass der Porenraum theoretisch trocken ist und kein Flüssigkeitsvolumen (S = 0 Vol.%) enthalten ist. Dies führt zu fehlerhaften Schlussfolgerungen und nicht plausibler Interpretation für den Kapillardruck in dem Material.

Die Ergebnisse der schonenden Trocknungen bei 45 °C und 60 °C lassen darauf schließen, dass bis in die Größenordnung von 2,0 Ma.-% mobilisierbares Wasser bzw. Lösung in dem Material enthalten ist.

Mit zunehmender Temperatur bei der Trocknung erhöht sich der Anteil des mobilisierten Wassers. Dies ist auf die mit steigender Temperatur zunehmende Freisetzung von hydratgebundenem Wasser aus der Bindemittelmatrix zurückzuführen (insbesondere für die Trocknung bei 105 °C) (siehe [4]). Dies führt zu einer Veränderung der Bindemittelmatrix und der Porosität. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird daher das Trocknungsergebnis bei 105 °C nicht weiter verwendet.

5.2.2.3.2 Trockendichte und Reindichte

Trockendichte

Bei einer Trocknung bei 25 °C und 32,5% relativer Luftfeuchte beträgt der Mittelwert der Trockendichte aus 21 Proben $2,238 \pm 0,027 \text{ g/cm}^3$ (Minimum $2,166 \text{ g/cm}^3$ bis Maximum $2,275 \text{ g/cm}^3$).

Reindichte

Die Reindichte wurde entsprechend der in Anlage 1.3 erläuterten Methodik ermittelt.

Im Rahmen des Projektes MgO-SEAL [4] wurde nach Lagerung bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchte für Proben aus dem GV2 ein Mittelwert der Reindichte von $2,337 \pm 0,028 \text{ g/cm}^3$ ($2,282 - 2,381 \text{ g/cm}^3$, N = 9) bestimmt.

Im Projekt MgO-S³ wurden an Probekörpern aus dem GV2 zusätzlich die Reindichte von bei 45 °C und 60 °C getrockneten Proben ermittelt. Die nachfolgende Zusammenstellung der Ergebnisse der Reindichte für die Trocknung bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchte sowie im Ergebnis der Trocknung bei 45 °C und 60 °C gibt eine Übersicht zur Streuung der Reindichte in Abhängigkeit von der Trocknungsmethodik. In Abbildung 280 in Anlage 1.3 wird eine Gesamtübersicht der ermittelten Feuchte und Reindichte mit Angabe der Wertebereiche für alle angewendeten Trocknungsmethoden gegeben.

Lagerungsbedingungen	Reindichte \pm Stand.abw. (Min. – Max., Anzahl)
32,5 % F _R – über MgCl ₂ ·6 H ₂ O	$2,337 \pm 0,028 \text{ g/cm}^3$ (2,282 - 2,381 g/cm ³ , N = 9)
~8 % F _R – bei 45 °C	$2,342 \pm 0,022 \text{ g/cm}^3$ (2,319 - 2,363 g/cm ³ , N = 3)
~3 % F _R – bei 60 °C	$2,388 \pm 0,024 \text{ g/cm}^3$ (2,354 - 2,410 g/cm ³ , N = 5)

Die Ergebnisse für die Reindichte zeigen nochmals den Einfluss der Trocknungstemperatur und die Mobilisierung von hydratgebundenem Wasser in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur entsprechend den Erläuterungen in Anlage 1.5. Vor diesem Hintergrund wird für die Ermittlung von Materialparametern die Anwendung der ebenfalls in Anlage 1.5 dargestellten Trocknung bei 45 °C und 8 % relativer Luftfeuchte empfohlen.

5.2.2.3.3 PorositätPorosität aus Dichtemessungen

Der Mittelwert der Porosität, berechnet aus der Trockendichte und der Reindichte, beträgt für 21 Proben, die bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchte getrocknet wurden, $4,4 \pm 1,1 \%$ (Minimum 3 % bis Maximum 7 %).

Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie

Bereits aus dem Projekt MgO-SEAL [4] liegen Ergebnisse zur Porengrößenverteilung für unterschiedliche Trocknungsmethoden sowie aus dem Inneren der Spritzbetonlagen aber auch deren Kontaktbereiche zu den BAG vor (siehe Abbildung 34). Die ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser ist in Abbildung 34 dargestellt. Es wurden nur Proben betrachtet, die bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert wurden.

Die Proben wurden

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

untersucht.

Es wurden Proben aus

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

untersucht.

Bei der Porosität wird zwischen Mikro-, Meso- und Makroporen unterschieden. Diese werden je nach Material und Aufgabenstellung unterteilt. Mikroporen haben einen Porenradius kleiner 25 nm, Mesoporen von 25 nm bis 2,25 µm und Makroporen größer als 2,25 µm. [4], [31]

Tabelle 6: Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie aus [4] ergänzt um aktuelle Ergebnisse

Probe	Materialbereich	Trocknung [°C/ %]	Dilatometer	Porenradius [nm]		Porosität [%]			Hg-injizierbare Porosität
				min.	max.	Mikroporen	Mesoporen	Makroporen	
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
P302-1/1	massiv		gD	1,0	396050	3,1	3,1	4,8	10,9
P302-1/2	massiv		gD	1,0	395300	4,0	2,2	3,1	9,3
P302-1/3	massiv	gD	1,0	398450	2,5	2,9	4,7	10,1	

kD = kleines Dilatometer; gD = großes Dilatometer

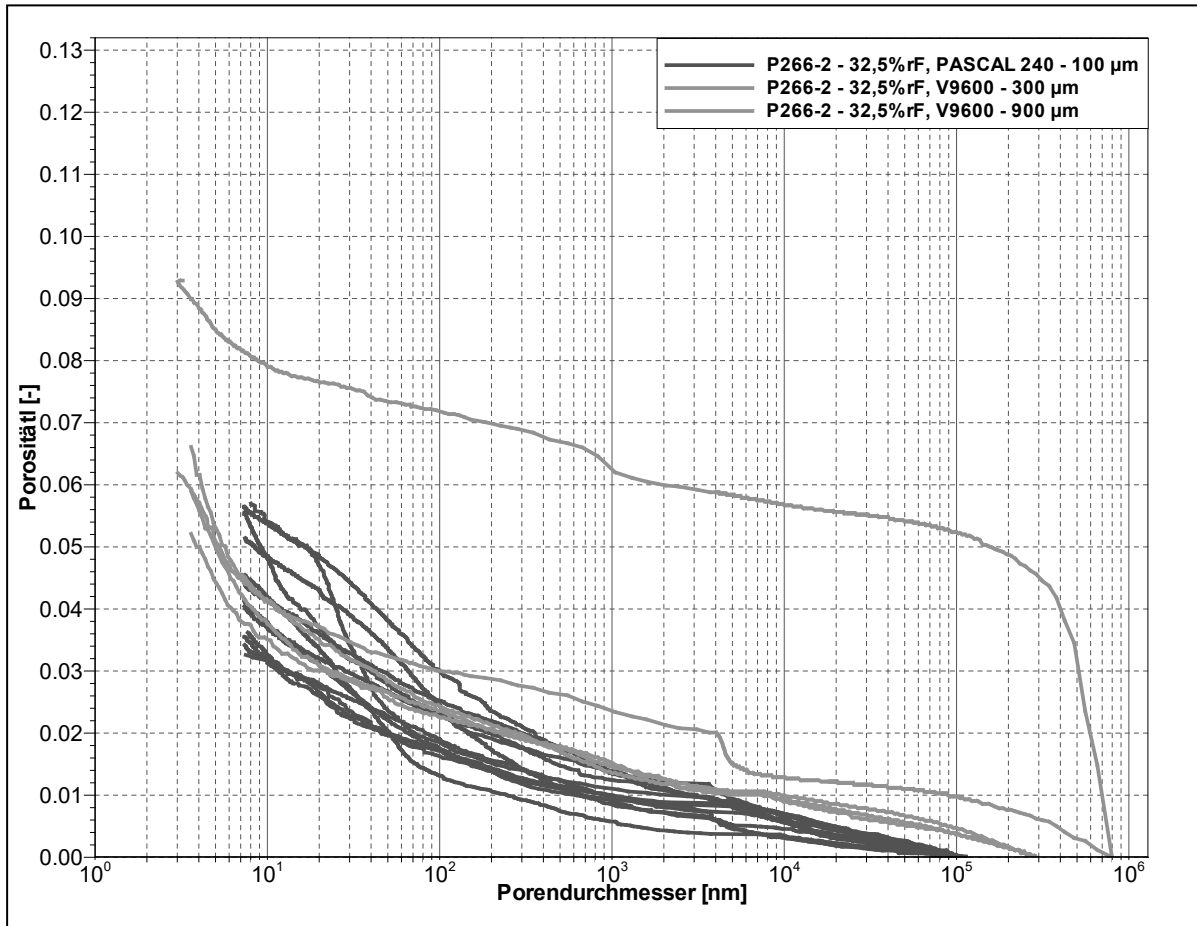


Abbildung 34: Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für Trocknung bei ca. 25 °C und ca. $F_R = 32,5\%$ sowie maximale Porendurchmesser bis 100 µm, bis 300 µm und bis 900 µm [4]

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. 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. Dieser große Wertebereich kann aufgrund des höheren maximalen Quecksilberdruckes bei den anderen beiden Porosimetern und aufgrund der geringen Probenanzahl nicht als repräsentativ angesehen werden. Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 wurden zur Festigung der Ergebnisse für die Untersuchungen mit dem Porosimeter AutoPor V9600 - 900 µm drei weitere Proben untersucht.

Die präparierten Proben wurden entsprechend der Abbildung 35 aus dem Bohrkern der Bohrung B42 entnommen.

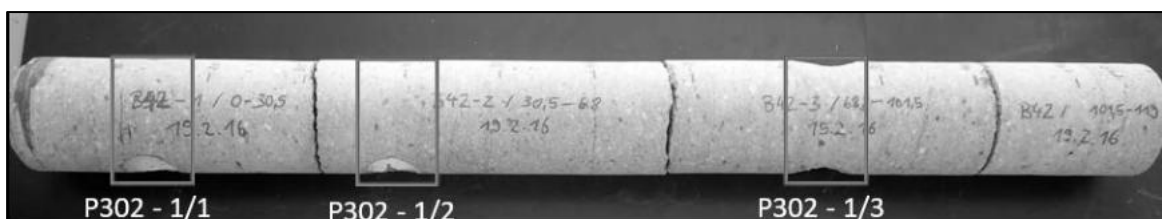


Abbildung 35: Probeentnahmebereich für Proben Hg-Porosimetrie - Bohrung B42

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 36) zeigen, dass in dem MgO-Spritzbeton des GV2 Makroporen bis zu einem Porendurchmesser von 900 µm vorhanden sind. Größere Poren können mit dem AutoPor V9600-900 nicht gemessen werden.

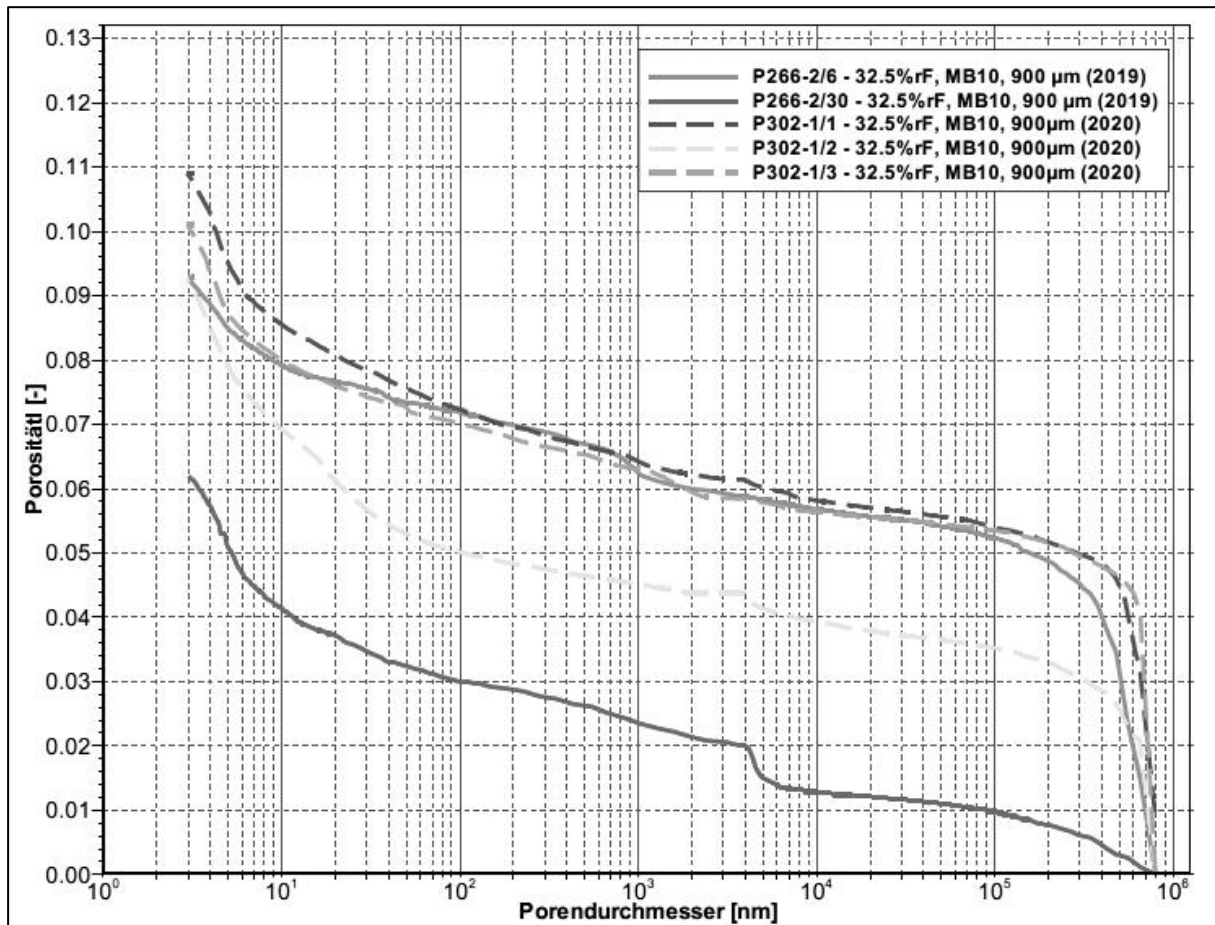


Abbildung 36: Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für Trocknung bei ca. 25 °C und ca. $F_R = 32,5$ % sowie maximale Porendurchmesser bis 900 µm

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Erläuterungen und der theoretischen Grundlagen der Strömungsprozesse ist in diesem Material davon auszugehen, dass diese Makroporen einen bestimmten Einfluss auf den Strömungsprozess haben. Allerdings sind nicht alle erfassten Poren hydraulisch wirksam. Als hydraulisch wirksam können Poren mit Porenradien größer als 10 µm bis 50 µm (10^4 nm bis $5 \cdot 10^4$ nm) betrachtet werden. Daraus folgt, dass die hydraulisch wirksame Porosität ca. 4 % bis 5 % geringer ist als die in Abbildung 34 und in Abbildung 36 bis zum unteren Messbereich dargestellten Maximalwerte. Die hydraulisch wirksame Porosität wird damit bei etwa 5 % liegen und ist damit sehr gering.

Die in Abbildung 37 gezeigte Abhängigkeit des Kapillardrucks von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit geht für Wasser von einer Grenzflächenspannung von 70,6 mN/m bei 40 °C aus. Die durch den Unterschied Wasser - Zutrittslösung entstehende Unschärfe in der verwendeten Grenzflächenspannung wird in Kauf genommen.

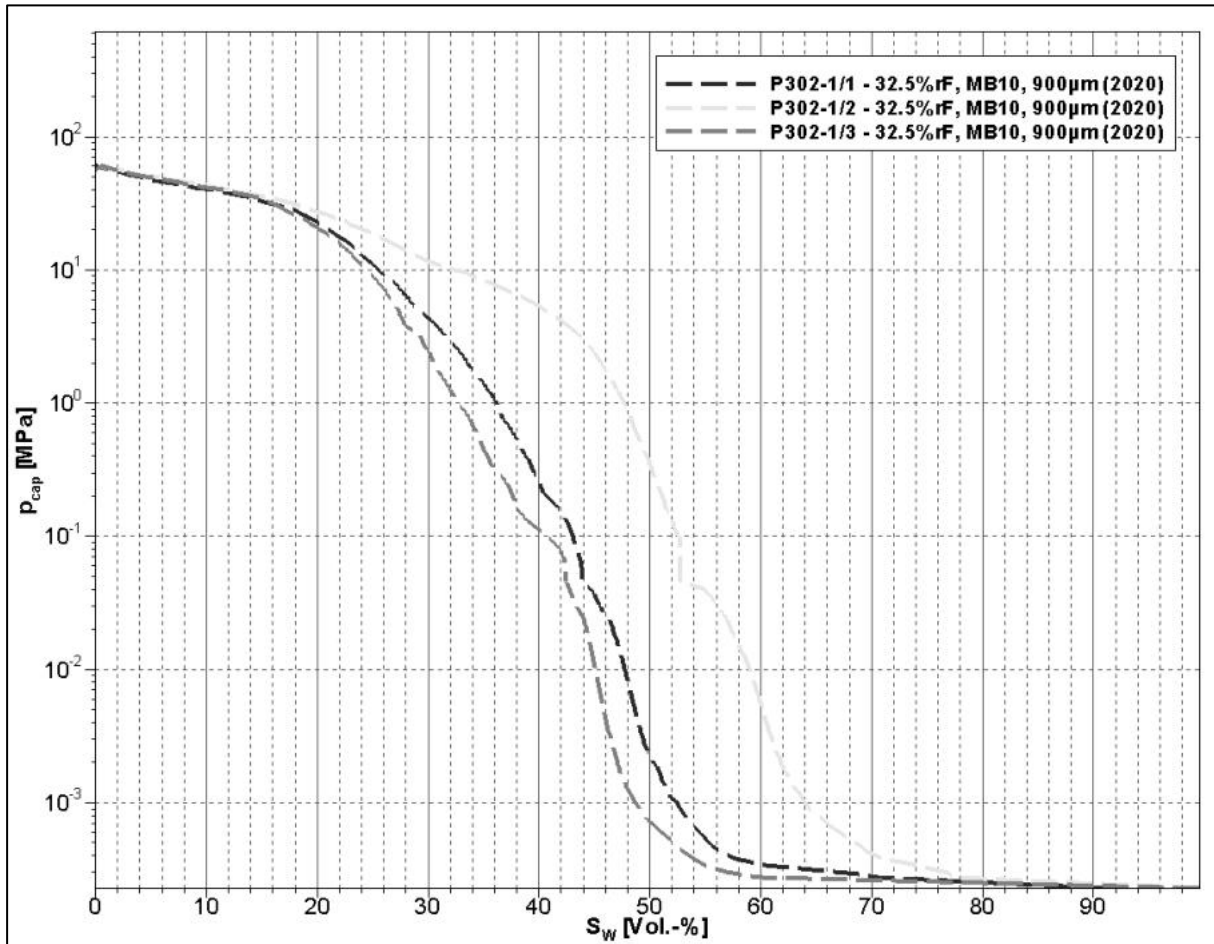


Abbildung 37: Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit – Ergebnisse der Untersuchungen für Trocknung bei ca. 25 °C und ca. $F_R = 32,5$ % sowie maximale Porendurchmesser bis 900 μm

5.2.2.3.4 Porenraumsättigung

Da der Wassergehalt w des Baustoffs aufgrund der o.g. Prämissen gleich Null ist, ist auch die Anfangssättigung S gleich Null.

Für Proben, die bei 25 °C und 32,5 % relativer Luftfeuchte getrocknet wurden, wurde eine mittlere Sättigung von $2,0 \pm 1,0$ % (Spannweite 2,0 % - 3,0 % bei 4 Einzelwerten) errechnet.

5.2.2.3.5 Gaspermeabilität

Ergänzend zu den Ergebnissen aus dem Projekt MgO-SEAL [4] wurde an Kernmaterial aus der Bohrung B48 die Gaspermeabilität senkrecht und parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen gemessen. Eine Übersicht des Untersuchungsprogrammes wird im Kapitel 5.2.2.2 gegeben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt.

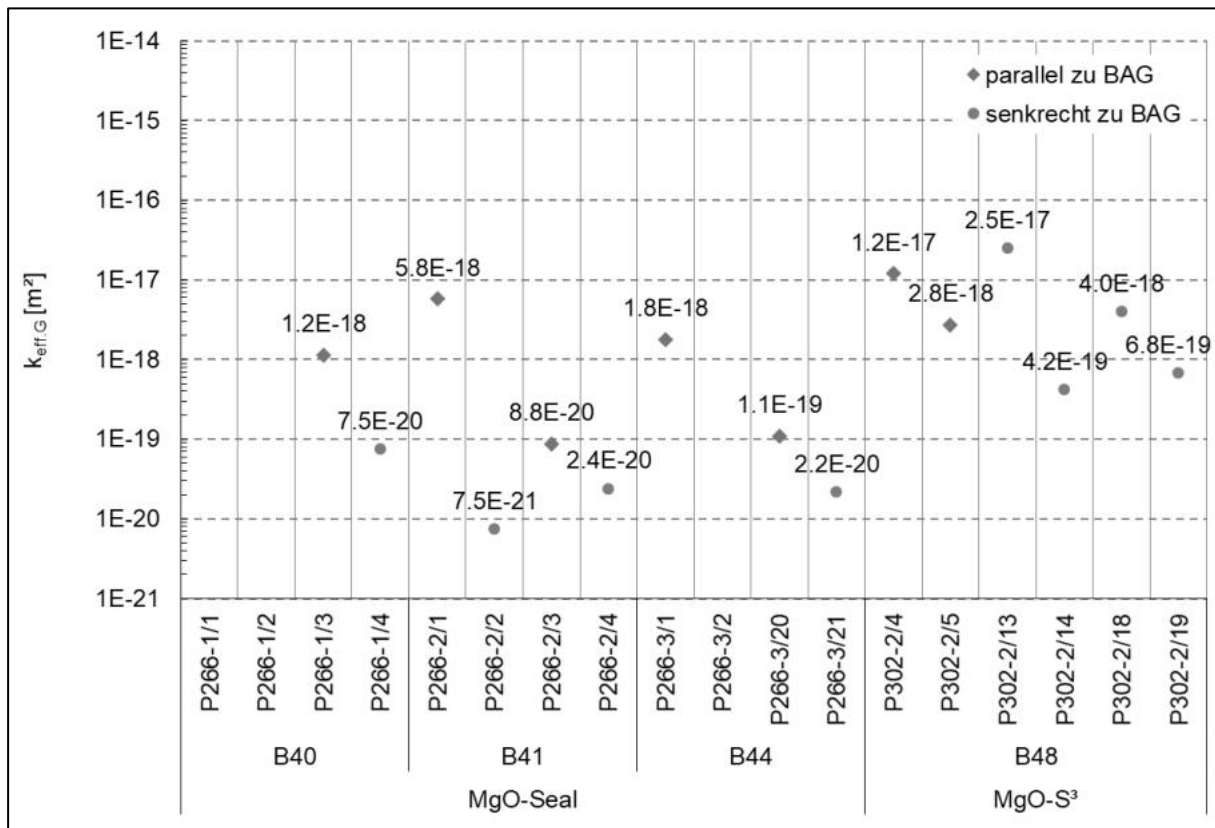


Abbildung 38: Gaspermeabilität von Kernproben aus den Bohrungen GV2 (B40, B41, B44 und B48)

Die Abbildung 38 ermöglicht eine vergleichende Beurteilung der aktuellen Ergebnisse für die Proben aus der Bohrung B48 mit den Messergebnissen aus dem Projekt MgO-SEAL [4].

Bei den aktuell untersuchten Proben aus der **Bohrung B48** wurde die effektive Gaspermeabilität bei zwei Proben parallel zu den BAG und bei vier Proben senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen gemessen. Die effektive Gaspermeabilität parallel zu den Betonierabschnittsgrenzen lag bei $1,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $2,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Für die Proben senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen wurde eine Gaspermeabilität zwischen $2,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $4,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ ermittelt. Diese Wertebereiche und die Darstellung in Abbildung 38 verdeutlichen ein annähernd übereinstimmendes Permeabilitätsniveau der untersuchten Proben. Aufgrund der geringen und unterschiedlichen Anzahl der Ergebnisse für die beiden Probenorientierungen scheint ein Mittelwertvergleich nicht sinnvoll. Eine qualitative Beurteilung der in Abbildung 38 dargestellten Parameterstreuung deutet darauf hin, dass drei der vier Proben senkrecht zu den Betonierabschnittsgrenzen eine Permeabilität besitzen, die geringer oder in der Größenordnung der Permeabilität parallel zu den BAG ist. Die Probe P302-2/13 hat mit $2,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ die höchste effektive Gaspermeabilität.

Die Gegenüberstellung von der in der Bohrung B48 gemessenen Gaspermeabilität und der gemessenen Gaspermeabilität in der **Bohrungen B40, B41 und B44** zeigt, dass die in B48 gemessene Gaspermeabilität im Mittel höher ist. In den Bohrungen B40, B41 und B44 beträgt die Gaspermeabilität $6,5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ (parallel zu BAG) bzw. $2,3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (senkrecht zu BAG), in der Bohrung B48 ist diese $5,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ (parallel zu BAG) bzw. $2,3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ (senkrecht zu BAG). Aus den Kenntnissen zu den Probekörpern und den Versuchsbeobachtungen lässt sich keine Begründung für diese höhere Permeabilität ableiten. Es wird vermutet, dass die effektive Gaspermeabilität von $2,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ bis $7,5 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ die Heterogenität des Materials im Bauwerk widerspiegelt. Es ist auch nicht auszuschließen, dass die höhere Gaspermeabilität bei den Messungen in der Bohrung B48 auf eine Entspannung des MgO-Betons zurückzuführen ist,

da die Bohrung B48 erst nach dem Auffahren des seitlichen Zugangsbereiches abgeteuft worden ist.

5.2.3 Charakterisierung von Betonierabschnittsgrenzen mittels μ CT

Bei einer Röntgen-Computertomographie (Röntgen-CT) wird die Verteilung des linearen Schwächungskoeffizienten für Röntgenstrahlung gemessen. Im relevanten Energiebereich geschieht die Schwächung abhängig von der Röntgenenergie durch den Photoeffekt und den Comptoneffekt. Der Schwächungskoeffizient steht damit in enger Beziehung zur Dichte, sodass die Tomogramme als Bilder der Dichteverteilung interpretiert werden können (Abbildung 39).

Das räumliche Auflösungsvermögen wird grundlegend durch die Brennfleckgröße der Quelle bestimmt, die im Mikrometerbereich liegt (μ CT). Bei großen Proben – wie kompletten Bohrkernen – wird das räumliche Auflösungsvermögen dagegen vor allem durch die Probengröße und die Abbildungsgeometrie auf etwa 50 μ m begrenzt. Dadurch können kleinere Poren, die mögliche Verbindungswege zwischen größeren Poren sind, nicht bewertet werden. Der Anteil dieser Poren hat aber Einfluss auf die Dichte und damit auf den Grauwert der Volumenelemente (Voxel). Da die Dichte ebenfalls durch die Zusammensetzung des Festmaterials bestimmt wird, erfordert eine umfassende Charakterisierung der Porenstruktur eine Kombination verschiedener Verfahren.

Poren, die größer sind als das Auflösungsvermögen der μ CT, lassen sich eindeutig segmentieren und in ein Binärbild der Poren überführen. Soweit sich die Körnung hinsichtlich ihrer Dichte vom umgebenden Bindemittel unterscheidet, lässt sie sich ebenfalls segmentieren. Bei den Bohrkernen aus der Bohrung B47 aus dem GV2-Bauwerk war dies überwiegend der Fall (Abbildung 40).

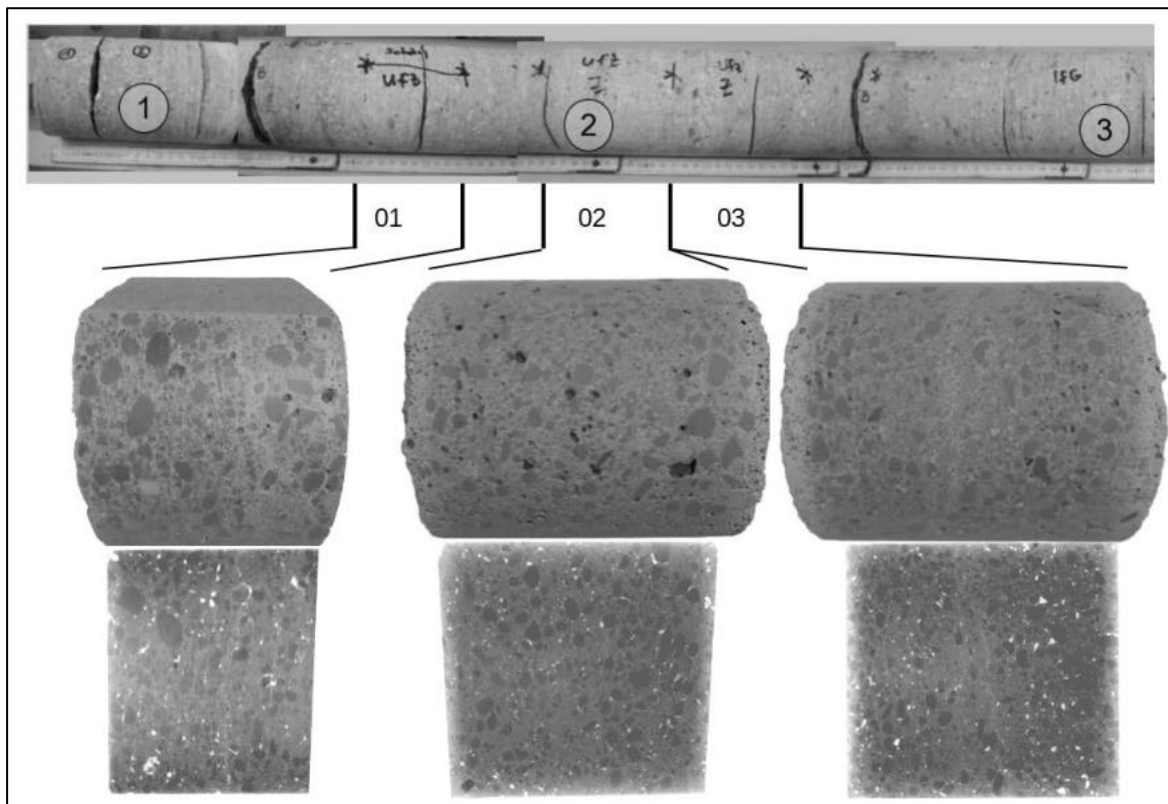


Abbildung 39: Oben: Foto der Kernstrecke der B47, Mitte: μ CT-Oberflächenabbildung der Kernstücke, Unten: Längsschnitte der μ CT-Aufnahmen. Aufnahmeparameter: Nikon XTH225, 200 kV, 200 μ A, Filter: 3.5 mm Cu, 1 frame/s, Voxelgröße 50 μ m, 8 frames/projection

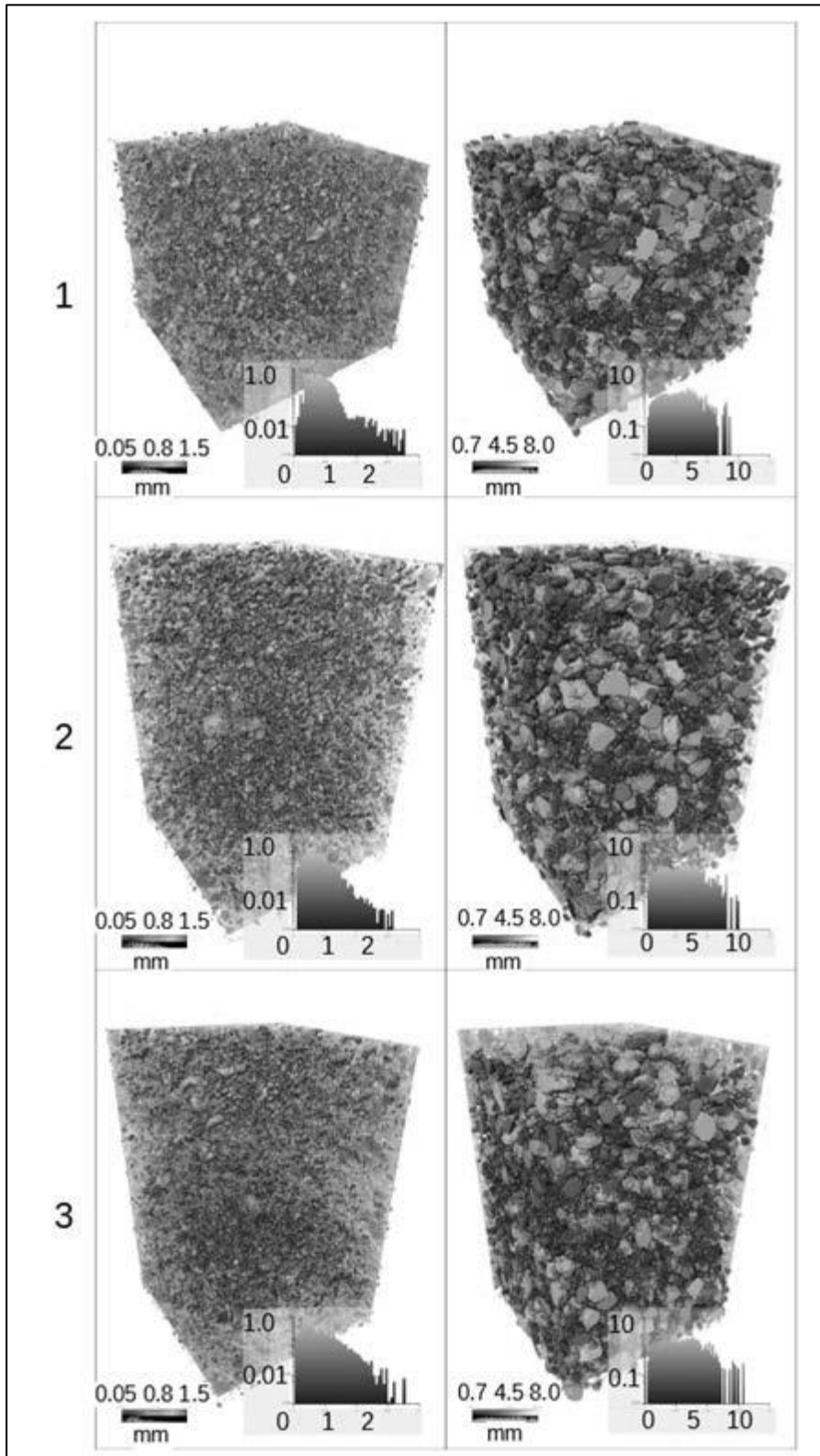


Abbildung 40: Größenverteilungen der segmentierten Poren (links) und Körner (rechts) von Teilvolumina der Aufnahmen aus Abbildung 39. Die Porengröße wurde bestimmt als Thickness Map (größter enthaltener Kugeldurchmesser), die Korngröße als Breadth (größter Korndurchmesser senkrecht zur Längsachse, entspricht Siebdurchgang) (Volumenangabe der Verteilungen in cm³)

Betonierabschnittsgrenzen (BAG) zeichnen sich gewöhnlich als flächige Inhomogenitäten im Bohrkern ab, die sich mittels μ CT charakterisieren lassen (Abbildung 41). Integrierende Verfahren der Porosimetrie (z.B. Hg-Kapillardruckkurven) sind weniger gut zur Charakterisierung dieser Variationen geeignet, weil das Material eine starke räumliche Variabilität über einen Abstand von 1 cm bis 2 cm von der BAG aufweist.

In der Regel nimmt mit Annäherung an die BAG der Durchmesser der Körnung ab und die Poren werden kleiner, ohne dass sich die Porosität merklich ändert.

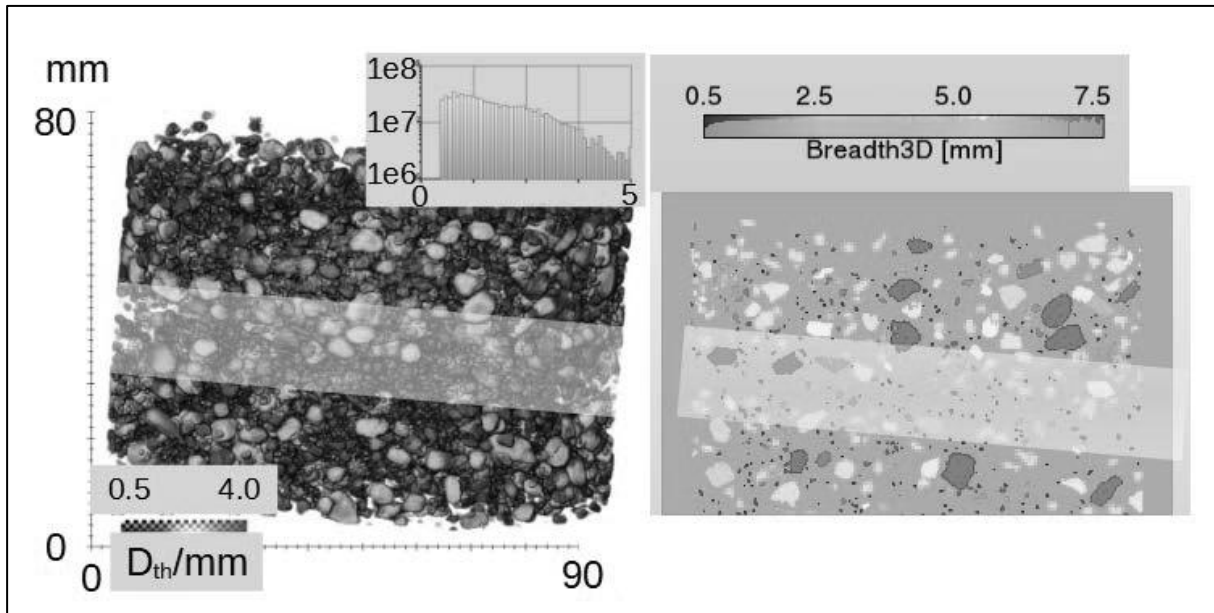


Abbildung 41: Das Volumenrendering der Poren (links) zeigt zum Zentrum der BAG (helles Rechteck) hin abnehmende Porengröße bis hinunter zur Detektierbarkeitsschwelle, außerdem nimmt in dieser Zone die Anzahl an großen Körnern ab (rechts).

Einen Erklärungsansatz für die Verfeinerung der Körnung könnte sein, dass nach Aufbringen der unteren (senkrechten) Schicht grobe Körner leichter abfallen als feine und somit verloren gehen. In der neu aufgespritzten (senkrechten) Schicht können grobe Körner die teilverfestigte Oberfläche nicht durchdringen und haben nur Punktkontakt zur verfestigten Oberfläche. Der verbleibende Raum wird durch feinere Körnung aufgefüllt.

Allerdings sind diese Merkmale unterschiedlich stark ausgeprägt. Durch Integration der Verteilungen über Ebenen parallel zum Verlauf der BAGs werden diese im Allgemeinen deutlicher abgrenzbar (Abbildung 42).

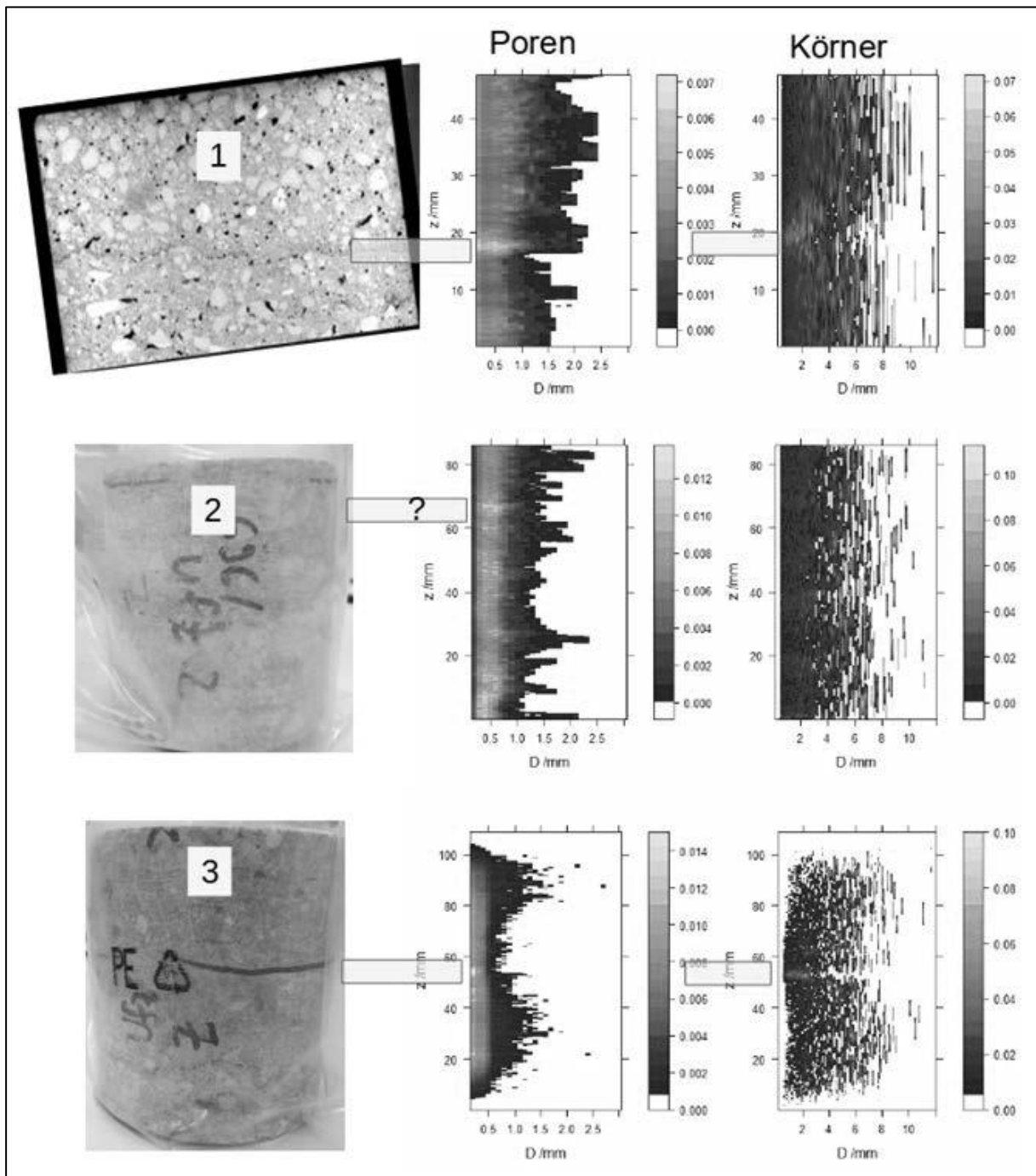


Abbildung 42: Charakterisierung von BAGs mit Hilfe der Poren- und Korngrößenverteilung aus μ CTs. Die Verteilungen wurden über Ebenen parallel zu den vermuteten BAGs zusammengefasst und als farbcodierte Profile dargestellt. Bei Probe 1 und 3 ist ein erhöhter Anteil feiner Poren und feiner Körnung zu erkennen (gelb), sowie der Ausfall grober Körnung. Bei Probe 2 ist dieser Effekt undeutlich, bzw. keine BAG detektierbar.

5.2.4 Beobachtung des Eindringens von Lösung mittels PET

Die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) erlaubt es, mit PET-Nukliden markierte Lösungen mit hoher Sensitivität räumlich und zeitlich aufgelöst zerstörungsfrei darzustellen. Primär wird die Konzentration der Traceratome bezogen auf das Voxelvolumen als Tomogramm der ²²Na-Aktivität abgebildet. Die räumliche Auflösung, die etwa 1 mm³ beträgt, hat dabei die Bedeutung des Referenzvolumens der Konzentration. Die Messungen lassen sich mit Erfassungszeiten von Minuten bis Stunden solange wiederholen, bis der Tracer abgeklungen ist.

Als Tracer wurde ²²Na eingesetzt, das aufgrund seiner Halbwertszeit von 2,6 Jahren sehr lange Beobachtungszeiten erlaubt. Außerdem ist Natrium ohnehin im eingesetzten Fluid (gesättigte NaCl-Lösung) enthalten.

Um eine schonende Präparation der Bohrkerns zu ermöglichen und gleichzeitig Kontaminationen durch unkontrollierte Freisetzung des Radionuklids zu vermeiden, wurde ein "Schutzring-Oberflächenpacker" entwickelt, der auf eine Sägefläche des Bohrkerns aufgespannt wird (Abbildung 43). Beide Zellen, der äußere Ring gefüllt mit 10 ml unmarkierter und die innere Zelle mit 2,8 ml markierter Salzlösung, wurden über einen Helium-Gaspuffer mit einem Druck von 200 kPa beaufschlagt.

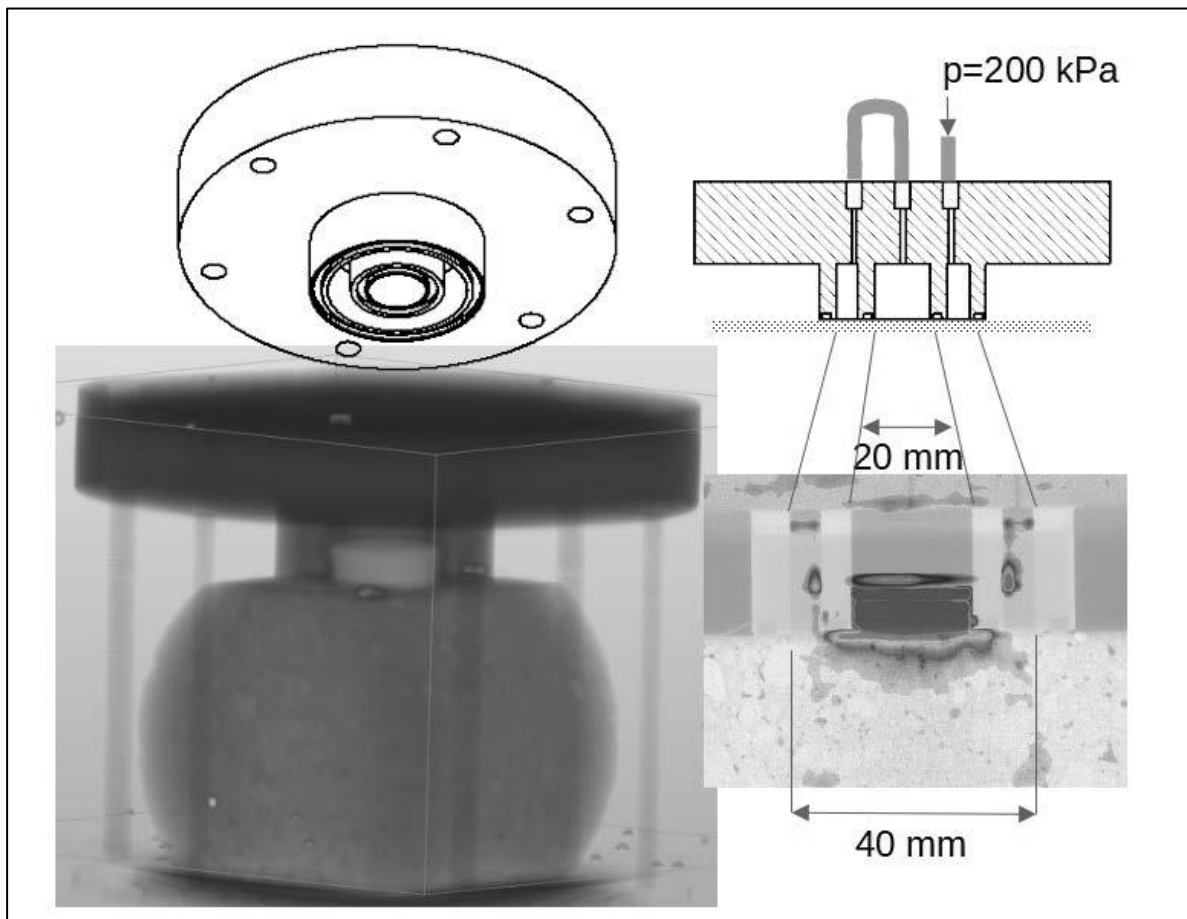


Abbildung 43: Schutzring-Oberflächenpacker für Injektionsexperimente mit PET-Beobachtung. In den überlagerten PET/ μ CT-Bildern ist die mit Tracer gefüllte innere Zelle aufgrund ihrer Aktivität zu erkennen. Die blauen Markierungselemente sind in beiden Bildgebungsmodalitäten sichtbar und dienen für die Ko-Registrierung der Bilder.

Die Füllpegel der Zellen und somit das eingedrungene Volumen wurden mit Hilfe von CT-Durchleuchtung ermittelt (Abbildung 44). Dieses Volumen korreliert mit der eingedrungene Aktivität, die als Integral über die PET-Bilder ermittelt wurde. Obwohl eine längere Versuchsdauer möglich gewesen wäre, wurde die Injektion nach 8 Monaten beendet, weil aufgrund der Corona-Pandemie keine Kontrolle mehr möglich war.

Obwohl bei dieser Fächerstrahlradiographie die Phasengrenze nicht scharf darstellbar ist und der Füllstand durch Positionierungsfehler verfälscht werden kann, erlaubt dies eine schnelle und exakte Erfassung mit einer Genauigkeit von 0,1 mm. Das eingedrungene Flüssigkeitsvolumen wurde ebenfalls durch Bilanzierung der PET-Aktivität oberhalb und unterhalb der Probenoberkante bestimmt. Das hieraus bestimmte Volumen erscheint geringer, was möglicherweise durch Unzulänglichkeiten der Streukorrektur wegen des starken Dichtekontrasts verursacht wird.

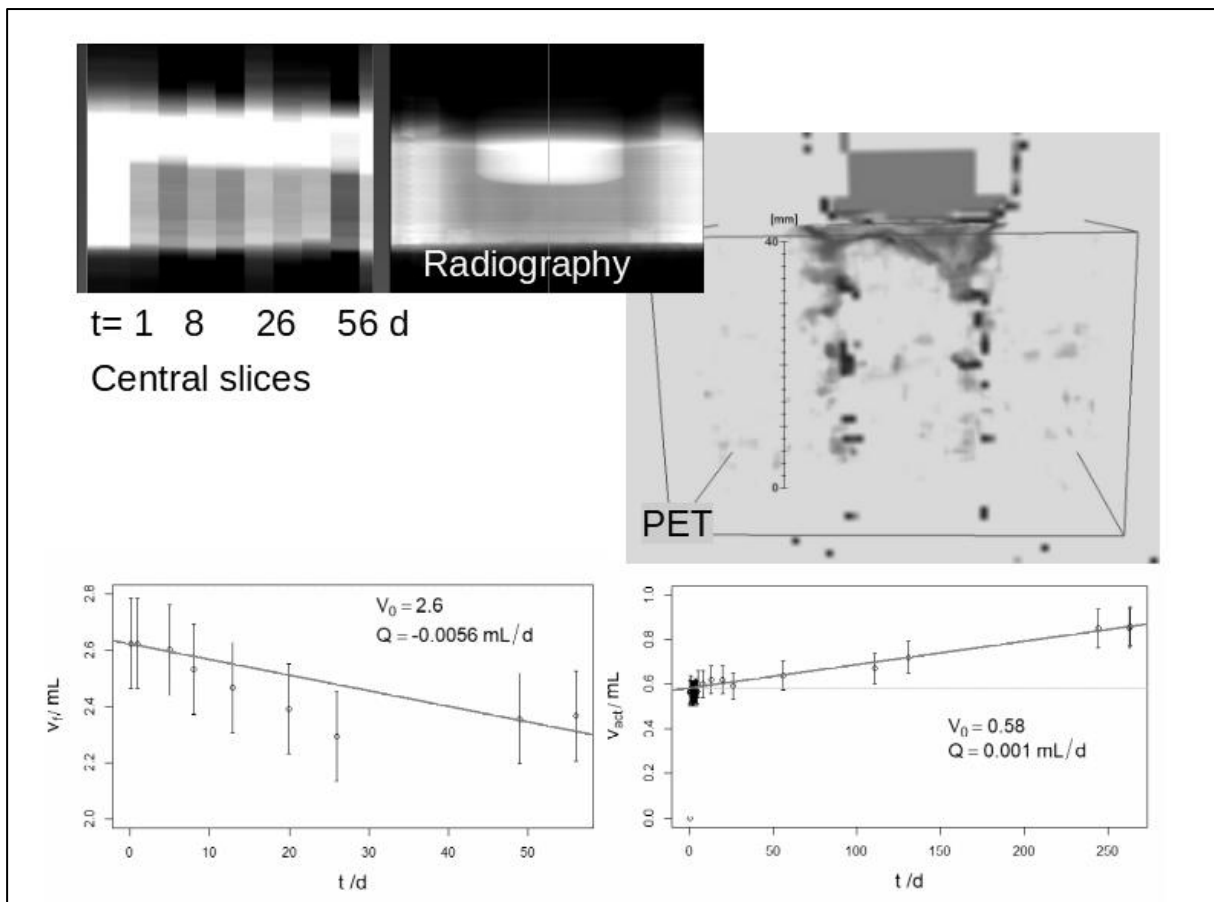


Abbildung 44: Füllstandsermittlung im Flüssigkeitsreservoir durch Radiographie (links).

Aufgrund der Füllstandsmessung mittels Radiographie wird bei zylindersymmetrischem Eindringen eine Durchlässigkeit zwischen $0,9 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (PET) und $4,1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (Röntgen) abgeschätzt. Zwar unterschätzt die PET-Analyse möglicherweise die Gesamtpermeabilität, sie liefert aber räumlich aufgelöste Information über das Eindringverhalten. Sie zeigt zudem, dass die Flüssigkeit über einige wenige größere Poren eine Eindringtiefe von etwa 15 mm erreicht, während sie in den Homogenbereichen nur wenige Millimeter tief eindringt. Abbildung 45 zeigt die Entwicklung der Aktivitätsverteilung für 3 von insgesamt 28 Zeitpunkten. Darüber hinaus ist auch eine Ausbreitung durch molekulare Diffusion der $^{22}\text{Na}^+$ -Kationen entlang von Korngrenzen und sogar durch das Festmaterial möglich, was neben der allgemeinen Unschärfe der Bildgebung vermutlich auch eine Ursache für die Unschärfe der Aktivitätsverteilung ist.

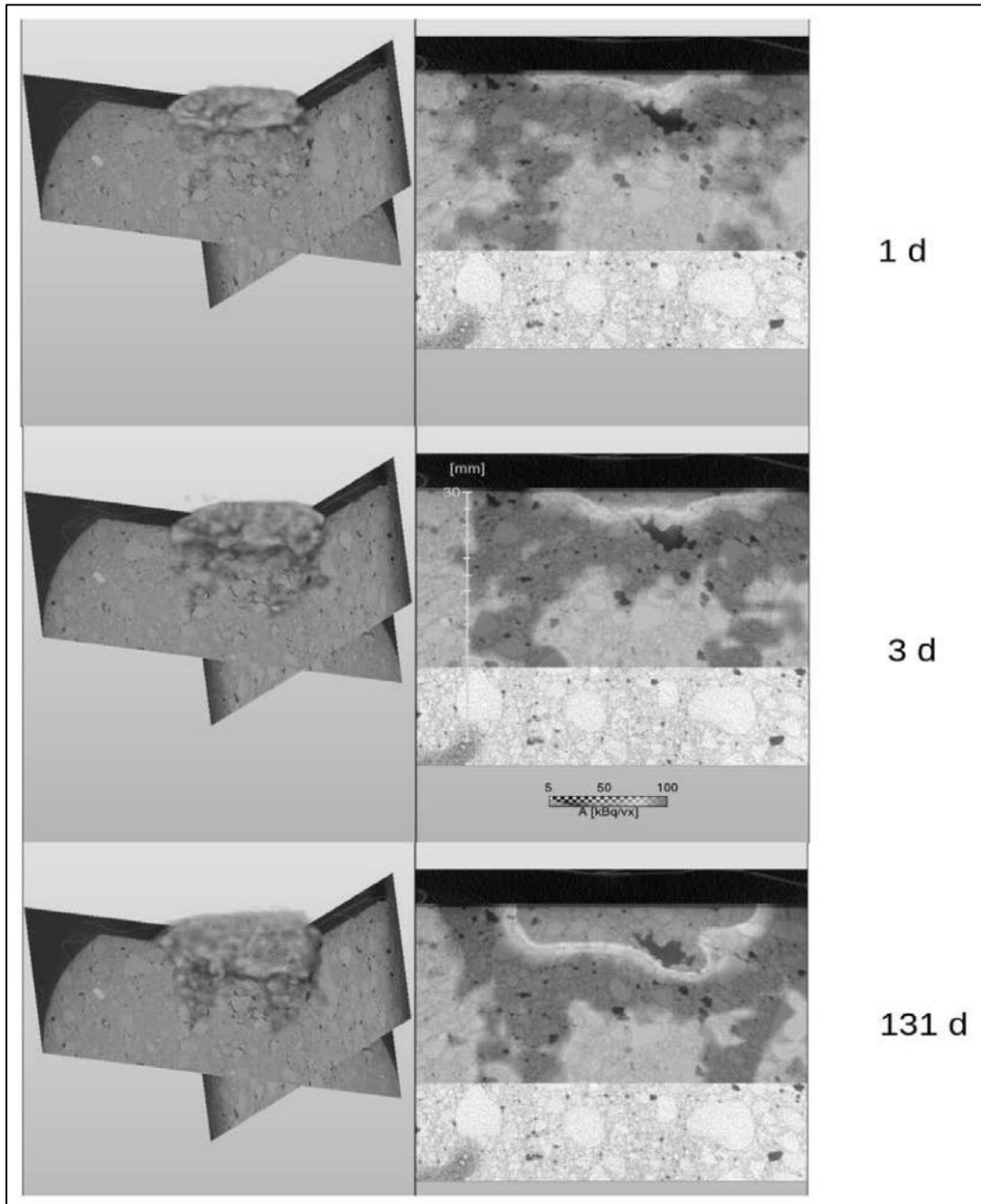


Abbildung 45: Entwicklung der Aktivitätsverteilung aus PET-Messungen (3 von 28). Links: Volumenrendering zeigt das aufgegliederte Eindringmuster, rechts: Querschnitt als PET/μCT-Fusionsbild zeigt das tiefere Eindringen entlang einer porösen Struktur sowie lokale diffuse Ausbreitung.

5.2.5 Mechanische Charakterisierung der Kontaktflächeneigenschaften

5.2.5.1 Kernmaterial aus der Bohrung B47

Repräsentative Baustoffparameter zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften (z. B. Festigkeit und zeitliches Verformungsverhalten) sind eine Voraussetzung, um mittels numerischer Verfahren den geomechanischen Integritätsnachweis für das Bauwerk führen zu können, z. B. zum Nachweis der Standsicherheit gegen Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung. Bei monolithischen Massenbetonbauwerken (Ortbeton) ist es allgemein ausreichend, die Eigenschaften der Betonmatrix zu untersuchen. Bei einem Spritzbeton-Bauwerk treten allerdings baubedingt zwischen den einzelnen Betonierabschnitten Übergänge (BAG) auf, die möglicherweise als potenzielle Schwächezonen während der Standzeit des Bauwerks wirken können.

Abhängig von der Konvergenz treten in einem Verschlussbauwerk nach vorliegenden Erfahrungen unterschiedliche Spannungszustände auf:

- In der Mitte eines Dammbauwerks treten nur kleine Spannungsdeviatoren auf, weil das entsprechende Abdichtbauwerk infolge des viskoplastischen Kriechens des umgebenden Salzgesteins dreidimensional mit einem resultierenden, nahezu isostatischen Spannungszustand eingespannt wird.
- Im Bereich der Dammstirnflächen können möglicherweise etwas größere Spannungsdeviatoren als Zugspannungen auftreten, wenn nicht zusätzlich noch Versatz dagegen gestapelt wird. Aufgrund der schalenweisen Erstellung eines Spritzbetondamms ist deshalb die bauwerksinterne Haftzugfestigkeit der einzelnen Spritzbetonabschnitte von besonderer Relevanz.

Die Bohrkernproben der Bohrung B47 aus dem GV2 zeichnen sich makroskopisch durch die Betonierabschnitte (im Mittel ca. 10 cm Schichtdicke) senkrecht zur Probenachse aus. Die Betonierabschnitte 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. Im Vorhaben MgO-SEAL standen Bohrkern aus der Bohrung B42 (vgl. Abbildung 33) zur Verfügung. Der Kern hatte eine Länge von ca. 4,1 m und bestand aus unterschiedlich langen Kernstücken (bis max. 30 cm). Ursächlich dafür waren neben (mutmaßlich bohrtechnisch bedingten) Kernbrüchen auch Abrisse an Betonierabschnittsgrenzen. Letztere deuten auf eine verminderte Haftzugfestigkeit hin, die in direkten Zugversuchen (vgl. Abbildung 47) untersucht wurde:

- Die Spaltzugfestigkeit der Proben (= Matrixfestigkeit) aus dem Inneren einer Spritzbetonschicht wurde im Mittel aus 6 Versuchen zu $\sigma_{TMA} = 9,0 \pm 1,5$ MPa (Standardabweichung) ermittelt. Die Spaltzugfestigkeit liegt damit in der gleichen Größenordnung wie die Spaltzugfestigkeit von MgO-Ortbeton.
- Die gemessene Haftzugfestigkeit an 12 Proben mit Betonierabschnittsgrenzen betrug im Mittel $\sigma_{TBA} = 2,8 \pm 2,0$ MPa (Standardabweichung). Damit weisen die Proben mit Betonierabschnittsgrenzen eine geringere Zugfestigkeit auf als die Proben aus dem Inneren einer Spritzbetonschicht.
- Weiterhin traten an ca. 10 Stellen des 4,1 m-langen Bohrkerns auch Abrisse auf, die darauf hindeuten können, dass die Haftzugfestigkeit an den BAG auch sehr klein sein kann. Dazu ist anzumerken, dass die Kerne jeweils stückweise erbohrt wurden und künstlich über „Kernbrechen“ abgebrochen wurden. Es wurde jedoch nicht beobachtet, dass die Kerne „spontan“ abrissen, was dokumentiert, dass eine Mindestkohäsion innerhalb des Kerns vorliegt, d.h. die Zugfestigkeit der Kerne ist > 0 .

Zur Überprüfung der Ergebnisse aus der Bohrung B42 und zur Klärung der oben genannten Sachverhalte wurde deshalb die Bohrung B47 gestoßen, die zwar mit einer Länge von ca. 2,6 m etwas kürzer war als die Bohrung B42, jedoch insgesamt qualitativ hochwertiges Kernmaterial überwiegend mit Kernlängen zwischen 30 cm und 70 cm erbrachte (Abbildung 46).

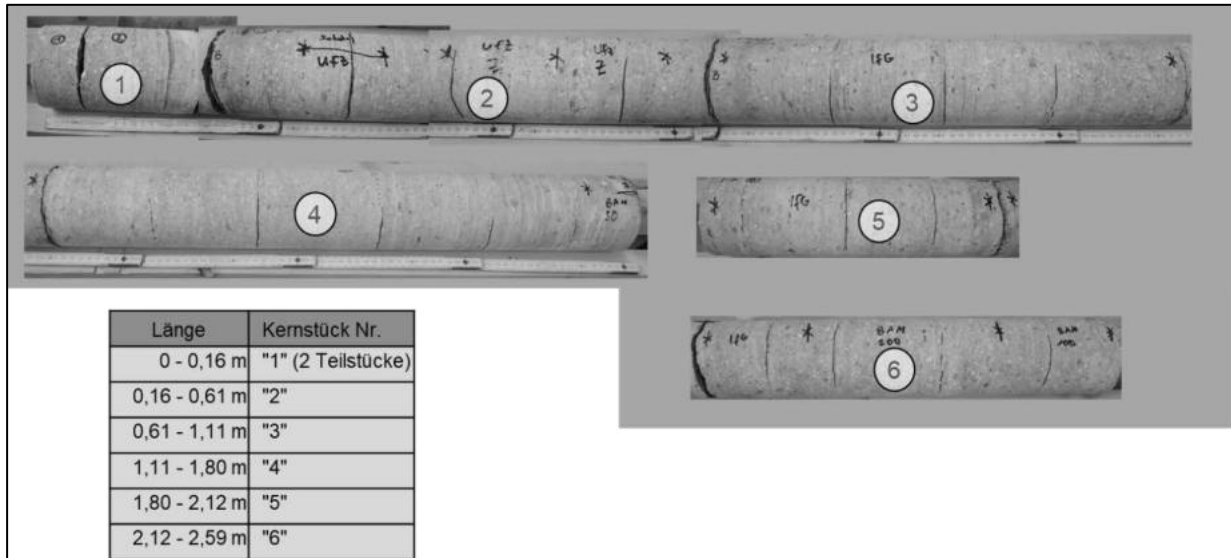


Abbildung 46: Kernmaterial aus der Bohrung B47

5.2.5.2 Spaltzug- und Haftzugfestigkeit Übergänge B47

Beim direkten Zugversuch werden auf die zylindrischen Proben jeweils stirnseitig zwei Zugplatten (ca. 30 mm starker Stahlzylinder mit zentrischer Zugöse) aufgeklebt. Die Probe wird in einer Prüfmaschine zentrisch auf Zug belastet (vgl. Abbildung 47).

Insgesamt wurden 6 Kernsegmente mit Prüfkörperlängen zwischen 10 cm bis 40 cm Länge geprüft (Probenserie 696).

Die ermittelte direkte Zugfestigkeit variiert zwischen 3,2 MPa und 5,3 MPa, wobei eine Korrelation zwischen Festigkeitsabnahme und Probenlänge besteht (Abbildung 47). Mit zunehmender Probenlänge nimmt die direkte Zugfestigkeit ab. Die Mehrzahl der Versuche versagte an oder unmittelbar in der Nähe einer BAG, wobei die Bruchfläche in der Regel von der gelblich-grauen Betonschlämme des Bindemittels gebildet wurde.

Aufeinander folgende BAG können sich in ihren Eigenschaften und damit auch in Ihrer direkten Zugfestigkeit herstellungsbedingt unterscheiden. Ein längerer Bohrkern bricht dementsprechend immer an der BAG mit der geringsten Zugfestigkeit. Dies wurde bereits früher beobachtet. Während der Erstversuch an einem langen Bohrkern eine relativ geringe Zugfestigkeit ($\sigma_z < 4$ MPa) erbrachte, ergaben sich in den weiteren Versuchen an den Teilstücken des bereits gerissenen Bohrkerns zum Teil eine deutlich höhere Zugfestigkeit ($\sigma_z \geq 4$ MPa).

Damit kann die gemessene Zugfestigkeit folgendermaßen in unterschiedliche Festigkeitsklassen eingeordnet werden:

- offenbar vorgeschädigte Proben: $\sigma_z < 0,5$ MPa
- gering belastbare BAG (mutmaßlich mit Fehlstellen): $2 \text{ MPa} < \sigma_z < 4 \text{ MPa}$
- intakte BAG: $4 \text{ MPa} \leq \sigma_z < 5$ (6) MPa
- Spritzbetonmatrix ohne BAG (indirekte Zugfestigkeit): $8 \text{ MPa} < \sigma_z < 10 \text{ MPa}$

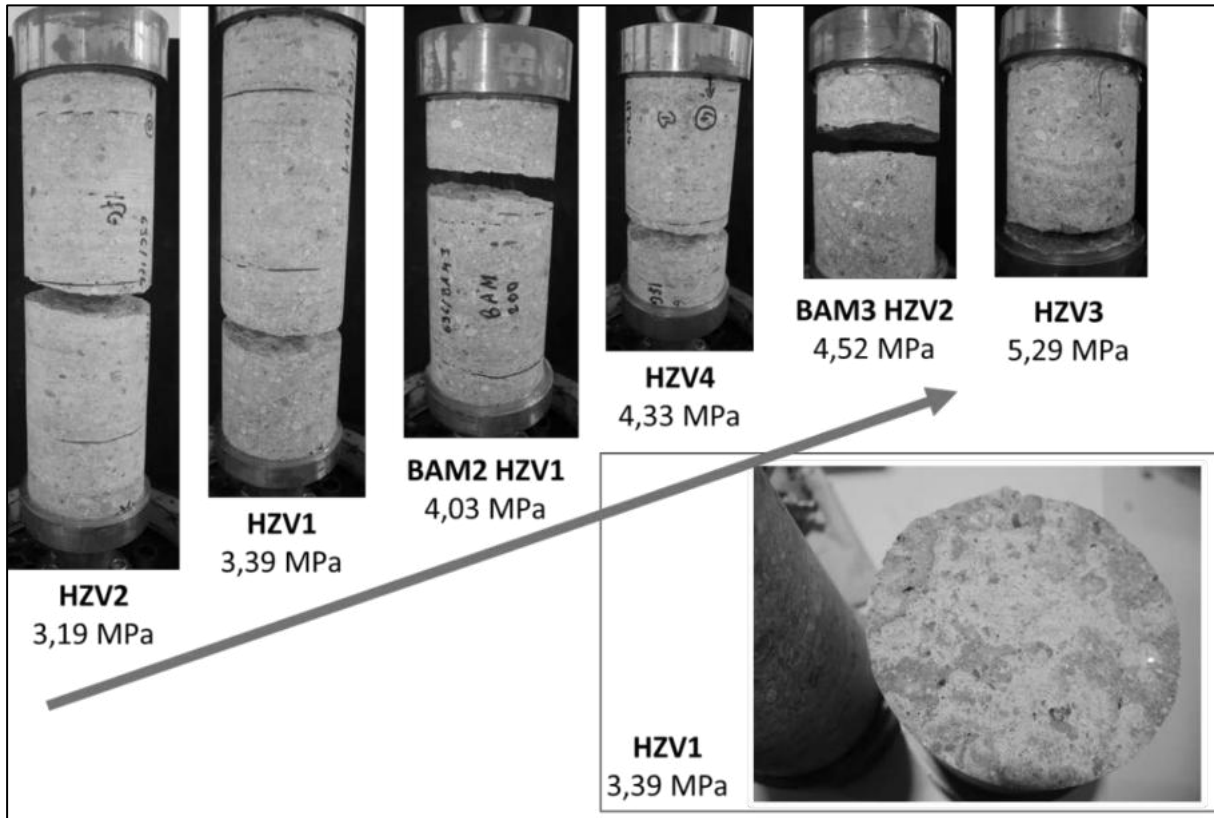


Abbildung 47: Versagensbilder nach dem Zugbruch (in der Prüfmaschine) mit Ansicht der Bruchflächen. Zusätzlich ist jeweils die gemessene Zugfestigkeit angegeben.

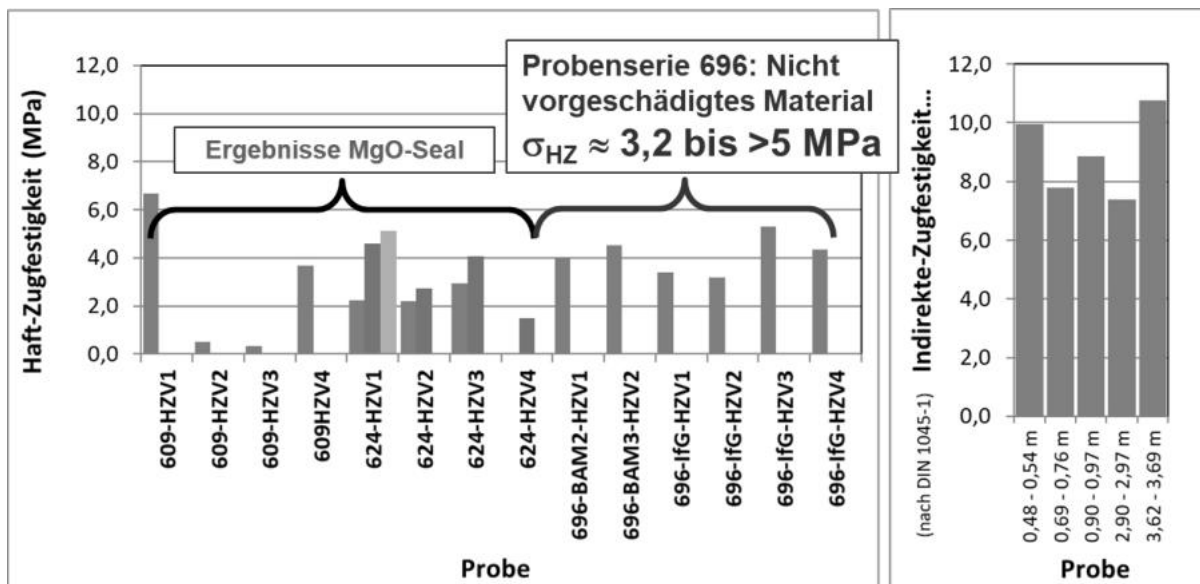


Abbildung 48: Direkte Haftzugfestigkeit (li.) und indirekte Zugfestigkeit (=Spaltzugfestigkeit) (re.) von Probenmaterial aus der Bohrung B42 – Probenserie 624 (Vorhaben MgO-SEAL) und der Bohrung B47 – Probenserie 696.

Die BAG reduzieren die MgO-Betonfestigkeit im Dammkörper, d.h. die Tragfähigkeit für Zug- und Schubkräfte an den entsprechenden Grenzflächen zwischen den verschiedenen Spritzbetonschichten, deutlich. Insgesamt ist die gemessene Zugfestigkeit aber noch sehr hoch, insbesondere im Vergleich zu einem umgebenden Steinsalz mit einer Zugfestigkeit zwischen

0,5 MPa und ca. 2,5 MPa (abhängig von der Vorschädigung, vgl. [33], wie es bei einem Endlager (jedoch nicht in der Grube Teutschenthal) anstehen würde.

5.2.5.3 *Betonfestigkeiten der Baustoffmatrix (Vergleich Spaltzug- und einaxiale Druckfestigkeit)*

Im Anschluss an die Zugversuche wurde an den verbliebenen intakten Prüfkörpern bei hinreichender Größe (Länge: ≥ 80 mm) nach Planen der Endflächen Spaltzugversuche durchgeführt, durch die vorzugsweise die Zugfestigkeit der kompakten Spritzbetonmatrix bestimmt werden sollte.

Die Abbildung 48 (re.) zeigt die Ergebnisse. Die Spaltzugfestigkeit beträgt zwischen 7,4 MPa und 10,8 MPa und ist damit hoch.

Zur Einordnung der Daten in Relation zur einaxialen Druckfestigkeit wird bei den sogenannten Normalbetonen (mit Zement als Binder) in betontechnischen Datensammlungen (z.B. [34]) als grobe Abschätzung für den Zusammenhang zwischen der Druck- (σ_D) und Zugfestigkeit (σ_Z) für das Verhältnis σ_D/σ_Z ein Faktor 5 bis 9 genannt, wobei das Verhältnis mit steigender Druckfestigkeit zunimmt.

Für den Spritzbeton aus dem GV2 wird ausgehend von einer mittleren einaxialen Druckfestigkeit von ca. 80 ± 10 MPa ([1]) und einer mittleren Spaltzugfestigkeit von 9 ± 1 MPa ein Verhältniswert zwischen einaxialer Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeiten von ca. 9 abgeschätzt. Das bedeutet, dass die hier gemessenen Eigenschaften von intakten Spritzbetonpartien aus dem GV2 qualitativ den Eigenschaften von Hochleistungsbetonen entsprechen.

5.2.5.4 *Fazit zur Relevanz von BAG*

Wesentliche Ergebnisse der ergänzenden Untersuchungen an den BAG aus dem GV2 sind:

- Mit der Bohrung B47 konnte erstmalig repräsentatives Material erbohrt werden, das nicht durch eine mechanische Vorschädigung bei der Probennahme beeinflusst war.
- Die Haftzugfestigkeit im intakten Spritzbeton des GV2 (ohne großflächige Fehlstellen) als Matrixfestigkeit ist sehr hoch σ_Z : ca. 2 bis 4,2 MPa (maximal 6,8 MPa gemessen)
- BAG können die Matrixfestigkeit im Dammkörper lokal herabsetzen, d.h. die Zugfestigkeit und die Scherfestigkeit an den entsprechenden Grenzflächen zwischen den verschiedenen Spritzbetonschichten kann signifikant gegenüber Spritzbeton ohne BAG reduziert sein. Insgesamt ist die gemessene Zugfestigkeit jedoch noch ausreichend hoch und entspricht annähernd der von Steinsalz mit einer Zugfestigkeit zwischen 0,5 MPa und ca. 2,5 MPa (abhängig von der Vorschädigung, vgl. [33]).
- Gleichzeitig ist die Spaltzugfestigkeit (aus dem indirekten Zugversuch) um einen Faktor 2 bis 3 höher als die direkt gemessene Zugfestigkeit (die Ergebnisse der Untersuchungen an frischen Spritzbetonproben wiesen sogar noch deutlich höhere Unterschiede auf, vgl. Abschnitt 6.5.2.5).

Damit wird deutlich, dass die über Spaltzugversuche (indirekter Zugversuch) bestimmte Zugfestigkeit nur sehr eingeschränkt aussagefähig ist, wenn potenzielle, richtungsabhängige Schwächezonen in Gesteinen oder Baustoffen charakterisiert werden sollen. Dies hat folgende Gründe:

- Beim Spaltzugversuch entspricht die erzeugte Bruchfläche nicht der schwächsten Zone oder Fläche im Probekörper, sondern es entwickelt sich, entsprechend der eingeleiteten Spannung, üblicherweise ein steilstehender Riss zwischen den auf der Mantelfläche liegenden Lasteinleitungspunkten der zylindrischen Probe. Die durch die

eingeleiteten Druckkräfte initiierten Zugspannungen teilen den Körper entlang der Zwangsfläche in zwei Halbschalen.

Beim einachsigen Zugversuch (in Richtung der vorliegenden BAG) deckt sich die Bruchfläche mit der schwächsten Zone im Prüfkörper, wobei letztere allerdings nicht immer mit einer makroskopisch erkennbaren Baustoffdiskontinuität (z.B. farbige Schlieren oder Schichten im Baustoff) übereinstimmen muss.

Alternativ kann in geomechanischen Berechnungen die in Laborversuchen gemessene Spaltzugfestigkeit um den Faktor 2 bis 3 abgemindert werden und die abgeminderte Festigkeit als Zugfestigkeit angesetzt werden.

5.3 Untersuchung des Bereichs, in dem ein Zutritt von Lösung erfolgte und Feststellen von Veränderungen des MgO-Betons infolge Lösungskontakt

Im Verlauf des Projektes MgO-SEAL [4] wurde der Bauwerkskörper mit MgCl₂/CaCl₂-Lösung druckbeaufschlagt, um u. a. Veränderungen des MgO-Betons und des umliegenden Gebirges durch den Lösungskontakt festzustellen. Durch die anschließende Auffahrung am GV2 im Rahmen dieses Projektes konnte nun Probematerial aus dem MgO-Beton (und auch aus dem Carnallitit), das in Kontakt zu der Lösung aus der Druckbeaufschlagungen über die Druckkammer stand, für die Untersuchungen gewonnen werden.

Weiterhin wurde der MgO-Beton an lösungsbefüllten Bohrungen im GV2 auf Veränderungen infolge des Lösungskontaktes untersucht.

5.3.1 Bauwerk inkl. umliegendem Gebirge nach Kontakt mit Lösung aus der Druckkammer

Während der Errichtung des Bauwerks GV2 wurde durch die Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar (MFPA) in einer Messebene TDR-Feuchtesensoren verlegt. Die Positionen der einzelnen Feuchtesensoren sowie das Messprinzip sind in [4] detailliert beschrieben. In insgesamt 17 einzelnen Druckbeaufschlagungen (DB) mit MgCl₂/CaCl₂-Lösung des Bauwerks GV2 im Rahmen von [4] wurde ein Druck zwischen 0,4 bar und 28,4 bar aufgebracht und über mehrere Tage bis Monate konstant gehalten. Mit Beginn der Druckbeaufschlagungen im Jahr 2016 detektierte das TDR-Messsystem den Flüssigkeitszutritt bei den verschiedenen Druckstufen vor allem im unteren Bereich des rechten Stoßes (Blickrichtung von vorne auf die Ortsbrust), bei dem sich die TDR-Sensoren 3 und 4 überlappen. Nachdem der maximale Flüssigkeitsdruck von 28,4 bar (nach der 17. DB) im Mai 2019 erreicht wurde, wurde auch ein Feuchtigkeitszutritt an den Sensoren am linken Stoß und auf der Sohle detektiert, nicht aber am Sensor in der Firste. An der GV2-Ortsbrust wurde optisch ebenso ein Flüssigkeitsdurchtritt festgestellt [4].

Die TDR-Messsignale wurden bis zum GV2-Rückbau weiter aufgezeichnet und ausgewertet. Aus vermutlich durchfeuchteten Bereichen des Bauwerks sowie des umliegenden Gebirges wurde Probematerial gewonnen. An diesen Proben wurden zum einen der Phasenbestand bestimmt und zum anderen dielektrische Messungen durchgeführt.

Ergebnisse der Feuchtemessungen

Aufgrund des GV2-Rückbaus und dem Freilegen des Sensors 3 (rechter Stoß am GV2) an der Betonkontur wurden in diesem Bereich die häufigsten und deutlichsten Änderungen festgestellt, weshalb nur diese in Abbildung 49 dargestellt sind. Für die Herstellung des

Ultraschall-Messfeldes 2 (siehe Abschnitt 5.1.5) musste dieser Sensor 3 im März 2020 gekürzt werden, da die Betonoberfläche abgeschliffen wurde.

Die Auswertung der Messsignale des Sensors 3 für den Zeitraum Dezember 2019 bis Juli 2020 zeigen diese Effekte wie folgt: Im Februar 2020 ist ein beginnendes Abtrocknen aufgrund der seitlichen Auffahrung und der damit verbundenen Freilegung des TDR-Sensors zu erkennen (allmähliche Veränderungen in der Farbskala unter Erhöhung des Rotanteils in Abbildung 49 unten; blau = feucht, rot = trocken). Der TDR-Sensor befand sich dadurch mit einer Seite direkt an der Luftseite. Bei weiteren Arbeiten am GV2 wurde beginnend am 04.03.2020 ein Segment von ca. 2 m aus dem Sensor herausgeschnitten, weitere Kürzungen erfolgten bis 25.03.2020 (Sprünge in der Farbskala). Die summarischen Veränderungen über den gesamten Zeitraum zeigt der Vergleich der beiden Messsignale am 04.12.2019 und am 23.07.2020 (rote bzw. schwarze Kurve in Abbildung 49 oben). Liegen die Messsignale genau übereinander, gab es keine Feuchtigkeitsänderung. Unterscheiden sich die Linien, fand eine Feuchteänderung statt. Kürzungen des Sensors sind damit nicht erfasst.

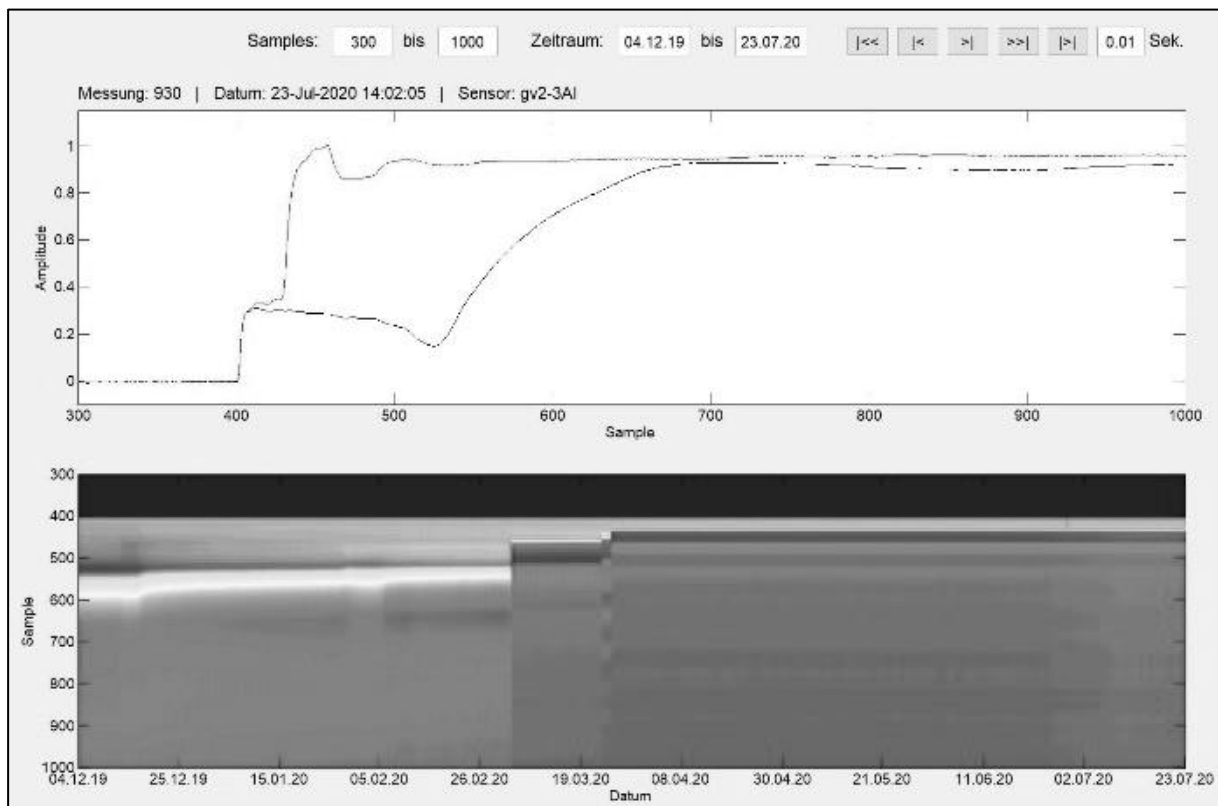


Abbildung 49: Messsignale am TDR-Sensor 3 vom 04.12.2019 bis 23.07.2020

Bauwerksuntersuchungen nach Lösungskontakt: Ergebnisse der Phasenanalysen

Am 31.05.2021 wurde seitlich am GV2 hinter dem Widerlager die Bohrung B57 gebohrt. Am Bohrkernmaterial wurden dunkle Bereiche festgestellt (Bohrkern wurde luftdicht in Folie verpackt aufbewahrt). Um evtl. Unterschiede im Phasenbestand zwischen den feuchten und trockenen Bereichen festzustellen, wurde eine Bohrkernscheibe für die orts aufgelöste Phasenanalyse gewonnen (Abbildung 50). Die Diffraktogramme in Abbildung 51 zeigen, dass sich im dunklen Bereich die 3-1-8-Phase gebildet hat. Im helleren Bereich lag der dem GV2 entsprechende Phasenbestand, bestehend aus 5-1-8-Phase, MgO und silikatischen Zuschlagsphasen vor. Nach wenigen Tagen wurde in den dunklen Bereichen der Probe die sekundäre Bildung der 3-1-8-Phase sowie eines Ca/Mg-Silikat (Tremolit $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) beobachtet (Abbildung 52). Analoge Beobachtungen wurden bereits an Bohrkernmaterial der B34 aus dem GV2 gemacht [3], [4]. Es handelt sich um Betonbereiche, in welchen die

MgCl₂/CaCl₂-Lösung durch die Lösungsdruckbeaufschlagung eingedrungen war. Die Lösung war hochkonzentriert und wies eine sehr geringe Wasseraktivität ($a_w = \text{ca. } 0,2$) auf, weshalb nach der Freilegung Umgebungfeuchte von diesem Materialbereich aufgenommen wird. Erst mit dieser Feuchtaufnahme (= Erhöhung der Wasseraktivität in der primären MgCl₂/CaCl₂-Lösung) wurde die Kristallisation der 3-1-8-Phase ausgelöst.

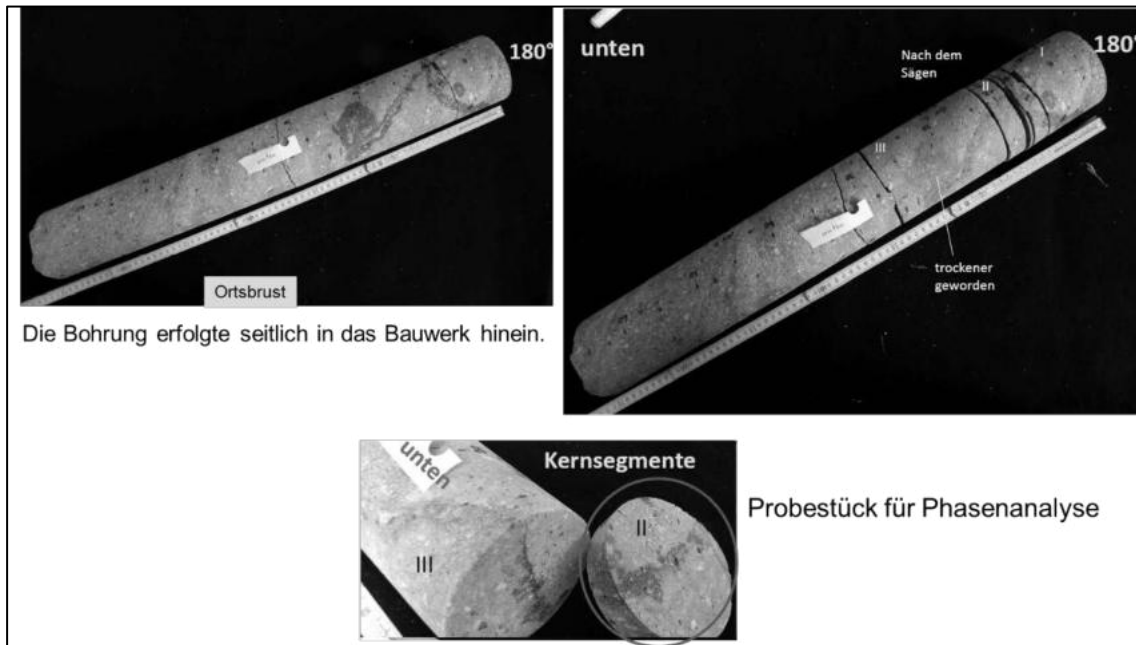


Abbildung 50: Fotos vom Bohrkern aus der Bohrung B57

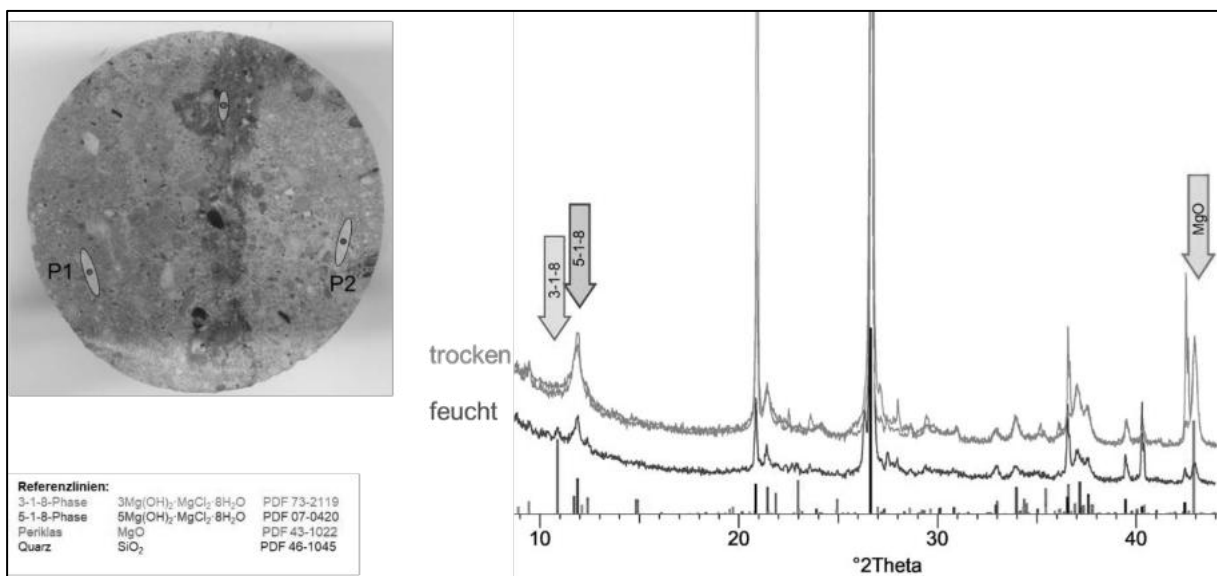


Abbildung 51: Ortsaufgelöste Phasenanalyse des Probestückes aus der Bohrung B57

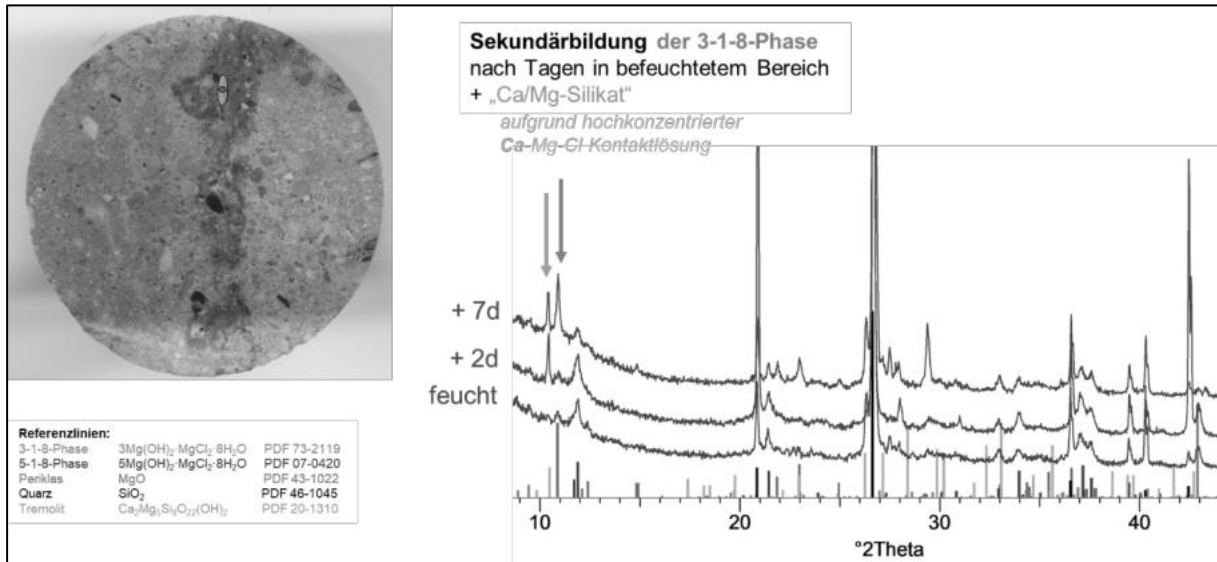


Abbildung 52: Zeitabhängige ortsaufgelöste Phasenanalyse des Probestückes aus der Bohrung B57

An der seitlichen Auffahrung am GV2 wurde die Bauwerksoberfläche für Ultraschallmessungen der BAM freigelegt (Abschnitt 5.1.5). Einige Zeit nach dem Abschleifen des Messfensters hatten sich dunkle Flecken auf dem Beton ausgebildet. Diese Stellen wurden mit der Zeit breiter und etwas heller (Abbildung 53). Aus diesen Bereichen wurden Proben gewonnen und röntgenographisch untersucht. Die qualitative Auswertung ergab, dass sich die 3-1-8-Phase auf diesen Bereichen der Bauwerksoberfläche gebildet hatte (Abbildung 54). Probematerial aus 0,5 - 1 cm Tiefe zeigte dagegen den bekannten GV2-Phasenbestand (5-1-8-Phase, MgO, silikatischer Zuschlag). Damit wird deutlich, dass der untertage freigelegte Bauwerksteil im Bereich von mit $\text{MgCl}_2/\text{CaCl}_2$ -Lösung gefüllten Gefügaporen oberflächlich die gleichen Stoffveränderungen durch Kontakt mit der Grubenfeuchte erfährt, wie entsprechendes Bohrkernmaterial nach Kontakt mit Luftfeuchte bei Laborlagerung/-messungen (s.o.).

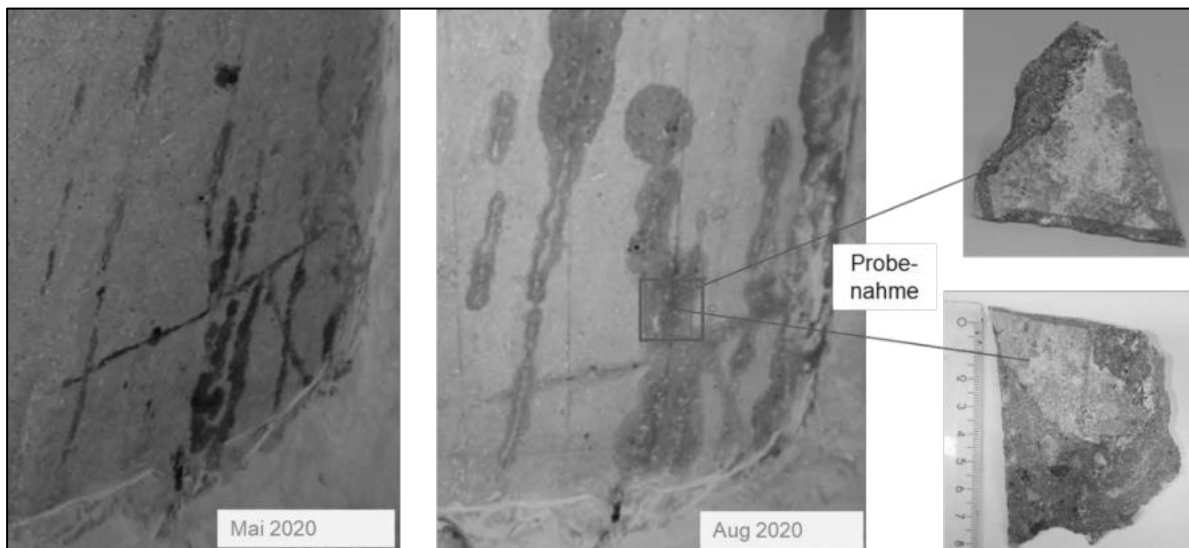


Abbildung 53: Zeitliche optische Veränderungen der freigelegten seitlichen GV2-Oberfläche

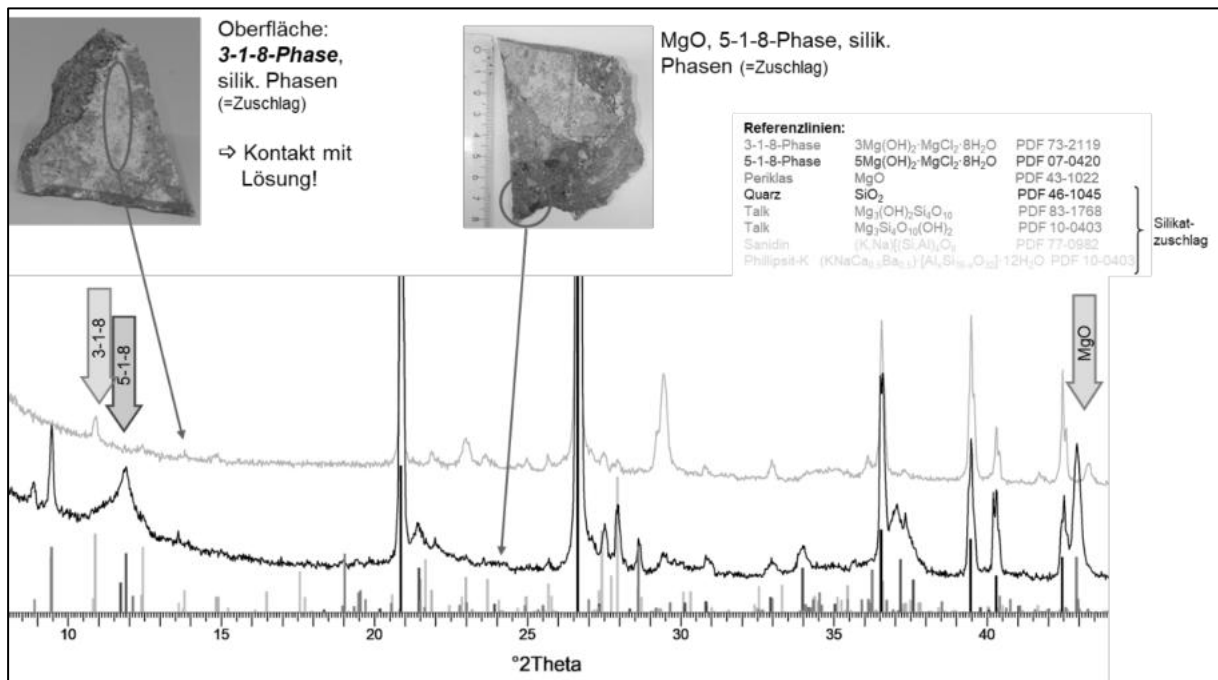


Abbildung 54: Phasenanalyse eines Probestückes aus der seitlichen GV2-Oberfläche nach Freilegung

Dielektrische Messungen

Für die dielektrischen Messungen wurden zwei Bohrkern am 27.08.2020 direkt über der Sohle seitlich am GV2 entnommen. Eine 100-mm-Bohrung wurde direkt über dem TDR-Sensor 3 und eine 50-mm-Bohrung direkt über dem Sensor 4 angesetzt (Abbildung 55). Beide Bohrkern zeigt Abbildung 56. Die beiden TDR-Sensoren lagen jeweils von beiden Seiten vollflächig am Material an, teilweise ist auch Verpressmaterial (Denepox) zu sehen. Mit der 50 mm-Bohrung wurde der Sensor nahezu mittig getroffen (Abbildung 56 rechts oben).



Abbildung 55: Fotos der Bohrkerngewinnung für dielektrische Messungen



Abbildung 56: Fotos der für die dielektrischen Messungen gewonnenen Bohrkern

Die dielektrischen Messungen wurden zum einen mit einer Koaxialmesszelle (Carnallit) und zum anderen mit einer Oberflächensonde (MgO-Beton) vorgenommen.

Das Salz wurde in Pulverform in die Koaxialmesszelle (Länge: 50 mm, Außendurchmesser: 41,3 mm, Innendurchmesser: 16,9 mm, Abbildung 57) eingebracht. Diese ist mittels 50 Ohm Adapter an den Netzwerkanalysator (Abbildung 58) angeschlossen. Es wurden mehrere Messungen durchgeführt.

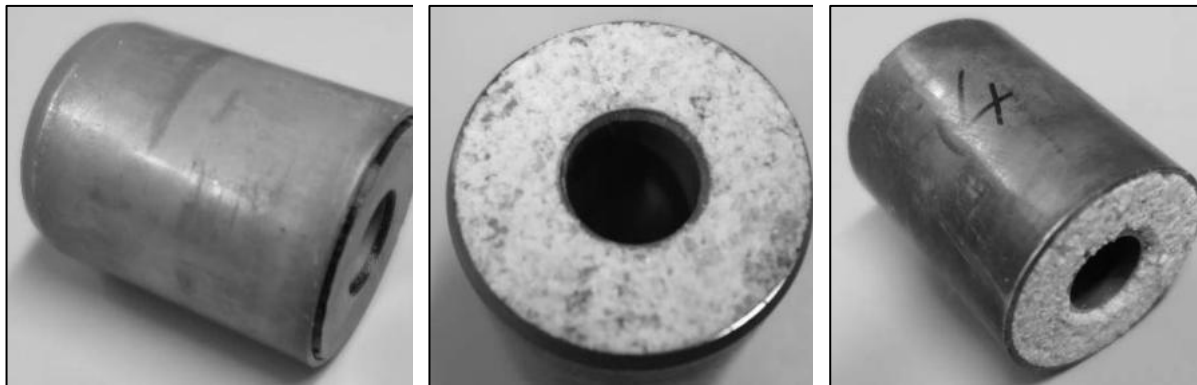


Abbildung 57: Koaxialmesszelle (mitte: Draufsicht, rechts: Seitenansicht).



Abbildung 58: Koaxialmesszelle und Anschlüsse an den Netzwerkanalysator

Im Ergebnis wurden für den Carnallit relativ hohe Streuungen bei der Permittivität (Abbildung 59, ϵ_r zwischen 3 und 5) sowie der dielektrischen Verluste (Imaginärteil der Permittivität) ermittelt. Der graue Bereich entspricht der Standardabweichung, die schwarze Kurve ist der Mittelwert der Messgröße. Die Streuung ist hauptsächlich auf unterschiedliche Feuchtegehalte zurückzuführen.

Nach Trocknung des Carnallits (2 Proben) bei 105 °C (wodurch jedoch der Realzustand verloren geht) wurde die Permittivität erneut bestimmt. Diese wies eine bedeutend geringere Streuung auf (Abbildung 60, ϵ_r zwischen 3 und 3,5) auf. Die dielektrischen Verluste bewegen sich nahe Null. Die verbleibende Streuung ist auf die Probenpräparation (Luftspalte, Ein- und Ausbau der Messzelle, etc.) sowie eine unterschiedliche Trockendichte der Proben (Abbildung 61) zurückzuführen. Da sich für die Abhängigkeit der Permittivität von der Trockendichte ein linearer Verlauf annehmen lässt (Abbildung 61), kann bei bekannter Dichte von kompakten Salzproben deren Permittivität abgeschätzt werden.

An zwei kompakten Salzstücken aus dem Bohrkernmaterial wurde mittels Tauchwägung eine Feuchtdichte von 1,88 g/cm³ bzw. eine Trockendichte von 1,66 g/cm³ ermittelt. Dementsprechend sollten diese Proben eine Permittivität von ca. 4,5 - 5 aufweisen.

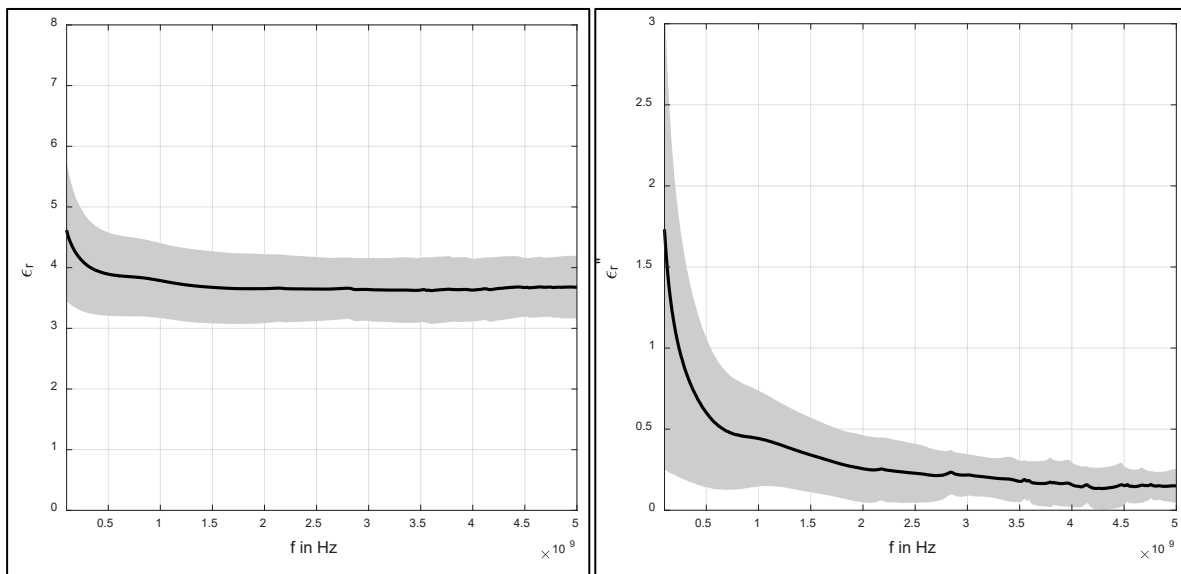


Abbildung 59: Dielektrische Messungen der Carnallitproben: Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der frequenzabhängigen Permittivität der pulverisierten Salzproben

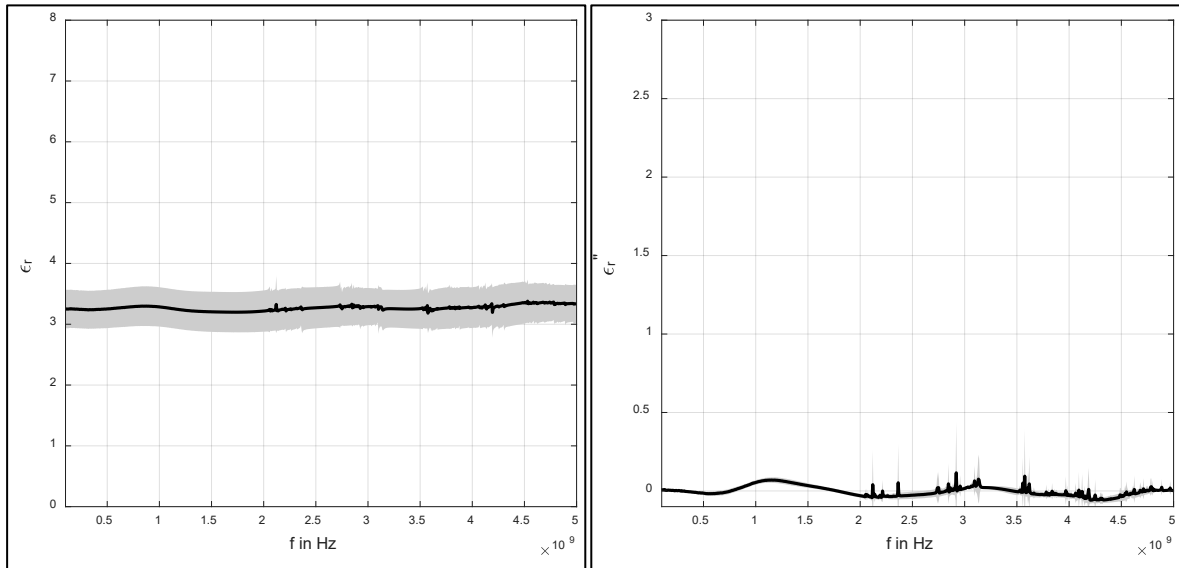


Abbildung 60: Dielektrische Messungen der Carnallitproben nach der Trocknung: Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der frequenzabhängigen Permittivität

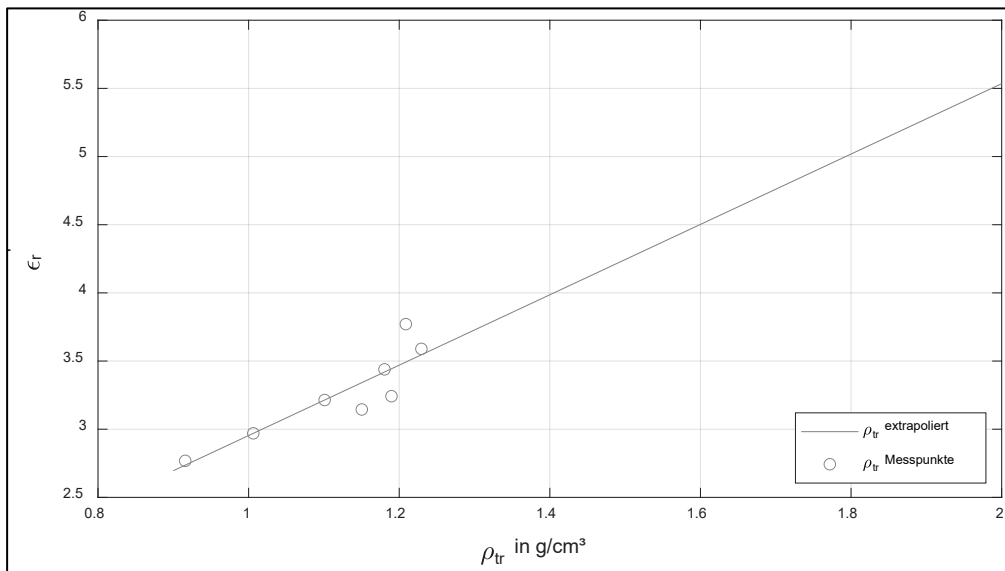


Abbildung 61: Realteil der Permittivität (ϵ_r) in Abhängigkeit der Trockendichte (ρ_{tr}) der Carnallitproben

Die dielektrischen Messungen am MgO-Beton erfolgten mit der Oberflächensonde. Dazu wurden die Bohrkernplan geschliffen, um eine möglichst vollflächige Auflage und somit gute Ankopplung der Sonde an das Material zu gewährleisten (Abbildung 62). An den zwei Bohrkernen wurden 200 Messungen an zufällig ausgewählten Punkten durchgeführt, um die Streuung der Messwerte besser beurteilen zu können. Es ergeben sich Permittivitäten ϵ_r zwischen 2,5 und 5,5 (im Mittel $\epsilon_r = 4$) (Abbildung 63). Die Streuung ist auf die Ankopplung (Luftspalt) der Oberflächensonde zurückzuführen. Die Heterogenität des Betons spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Damit liegen erstmals in-situ-Permittivitätswerte für Carnallit und MgO-Beton D4 vor.

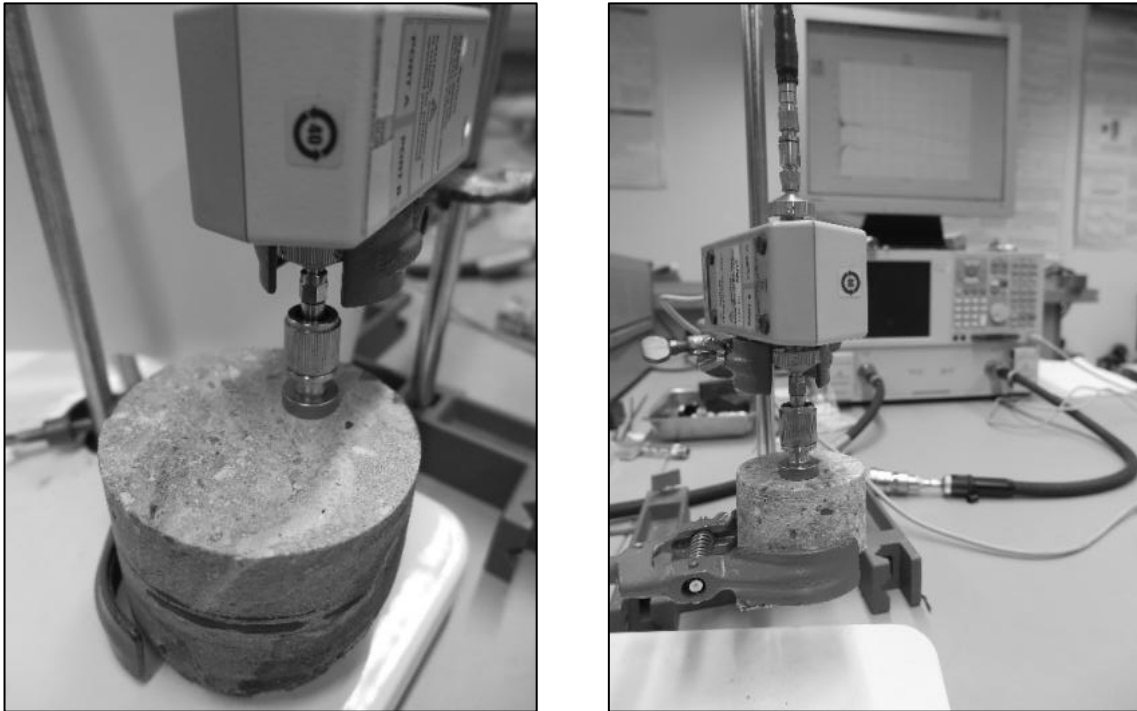


Abbildung 62: Oberflächensonde mit 100 mm Bohrkern (links) bzw. 50 mm Bohrkern (rechts)

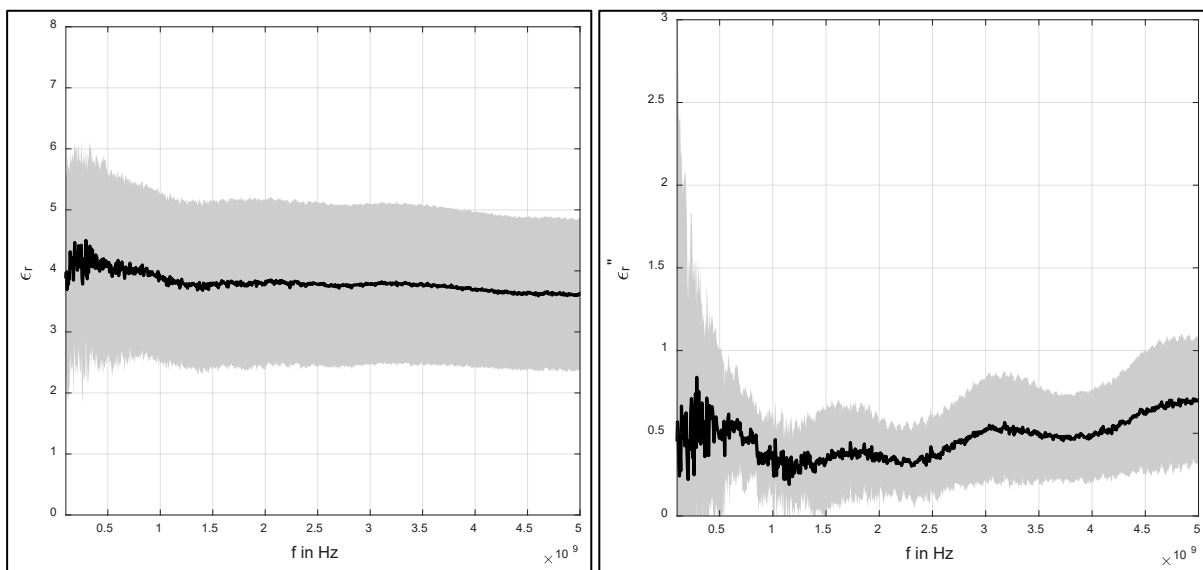
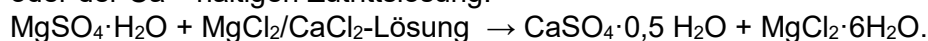


Abbildung 63: Dielektrische Messungen der MgO-Betonproben: Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der frequenzabhängigen Permittivität

Phasenanalyse Salzkontur

Es wurden während des Rückbaus zwei Salz-Probestücke aus dem Konturbereich Carnallitgebirge – MgO-Beton für eine Phasenanalyse entnommen. Diese Probestücke wurden aus einem Bereich ausgewählt, welcher über die Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung augenscheinlich mit Lösung aus der Druckkammer durchfeuchtet wurde. In den auffällig veränderten weißgelben Bereichen der Salzproben konnten röntgenographisch Kieserit, Bischofit und CaSO₄-Halbhydrat (Abbildung 64, Abbildung 65) identifiziert werden. Halbhydrat und Bischofit sind Produkte der Reaktion des im Gebirge enthaltenen Kieserits mit Tachyhydrit oder der Ca²⁺-haltigen Zutrittslösung:



Bei den auf einer Probe ebenfalls erkennbaren gelb-orangen "Schuppen" (Abbildung 66) handelt es sich um das Injektionsmaterial Denepox (röntgenamorph).

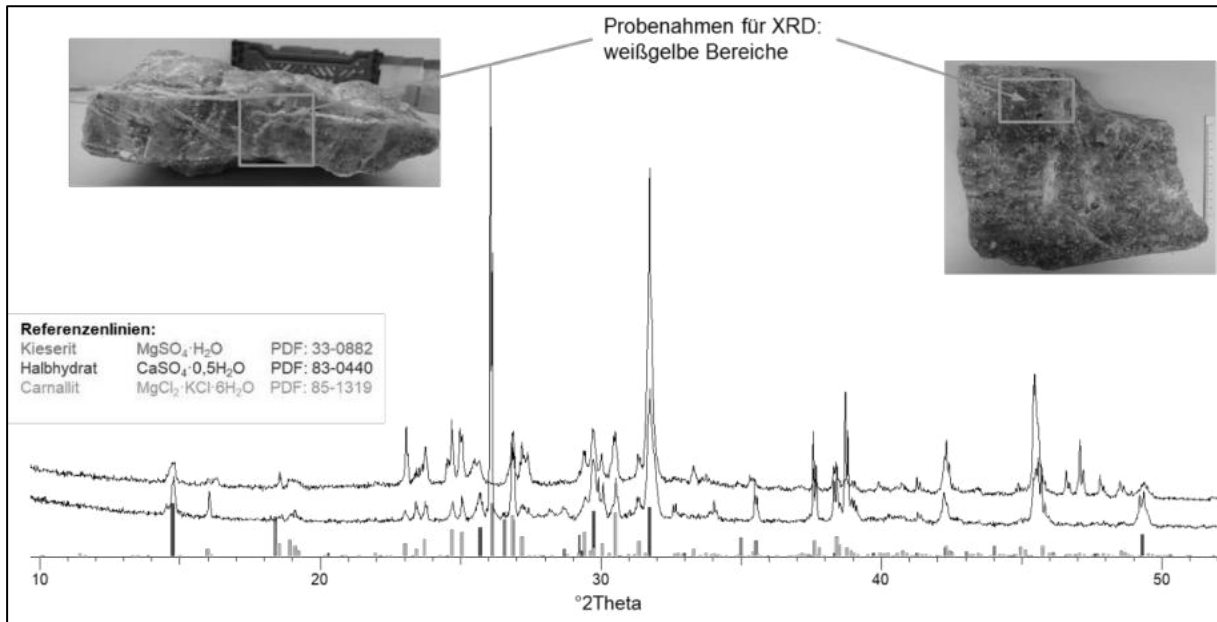


Abbildung 64: Probenfotos und Pulverdiffraktogramme der Probe 1 aus dem Konturbereich

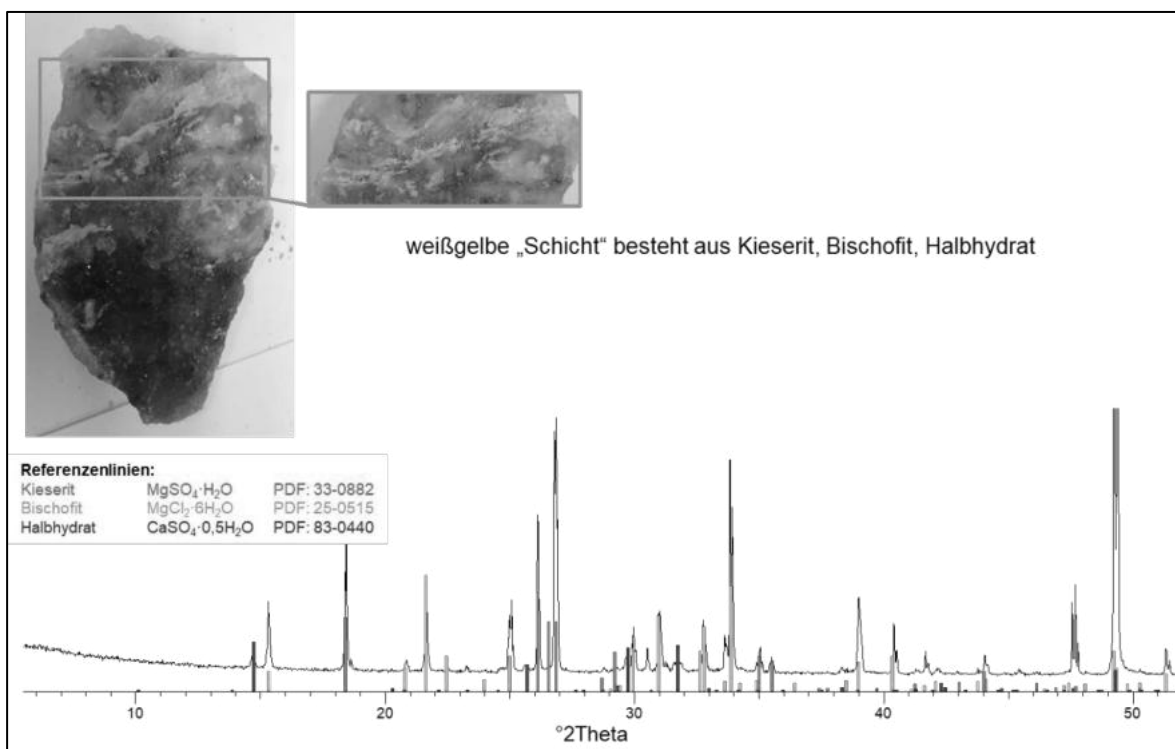


Abbildung 65: Probenfoto und Pulverdiffraktogramm der Probe 2 aus dem Konturbereich

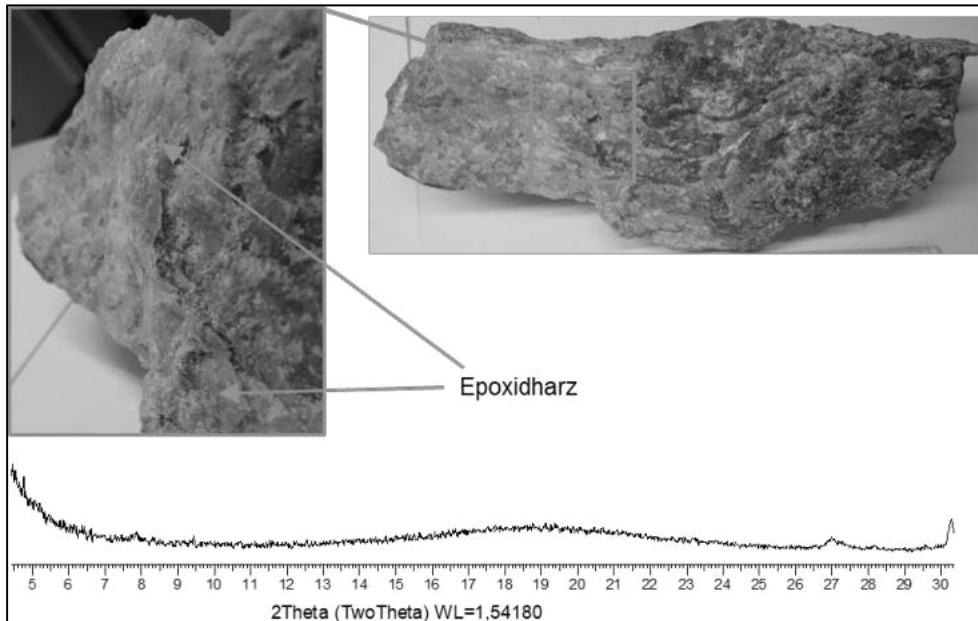


Abbildung 66: Probenfoto und Pulverdiffraktogramm der „Schuppen“ (= Injektionsmaterial Denepox)

5.3.2 Bauwerk nach Kontakt mit Salzlösung in Bohrungen

Über zwei Bohrungen im Bauwerk GV2 wurden mögliche Veränderungen infolge eines Lösungskontaktes untersucht. Dabei wurden zum einen mit der Überbohrung der B40 (**B40Ü**, D = 130 mm), welche mit NaCl-gesättigter Lösung befüllt war, der Phasenbestand des MgO-Betons sowie die im Bohrloch befindliche Lösung nach 3,5 Jahren Standzeit analysiert. Zum anderen wurde an der **B45** (D = 70 mm) mit endlagerrelevanter Salzlösung (NaCl-gesättigte, 2 molale MgCl₂-Lösung) die in-situ-Lösungspermeabilität bestimmt.

Untersuchungen nach Kontakt mit NaCl-gesättigter Lösung (Überbohrung B40)

Die Bohrung B40 (siehe auch Abschnitt 5.1.2) war vom 28.09.2016 bis Ende Februar 2020 mit NaCl-gesättigter Lösung drucklos befüllt und wurde anschließend überbohrt. Ziel war es, den Phasenbestand des Kernmaterials als auch die Zusammensetzung der Lösung nach der Lösungs-Kontaktzeit zu analysieren. Vor dem Überbohren wurde die im Bohrloch stehende Lösung dazu entnommen. Aus dem im Anschluss gewonnenen Bohrkern wurden Bohrkernscheiben (Abbildung 67) bei 0,50 m, 1,10 m und 1,90 m Bohrlochtiefe für eine orts aufgelöste Phasenanalyse geschnitten. Als Indiz für das Eindringen der Lösung über die Innenwand der Bohrung wurde optisch ein Saum von 1 - 3 mm Tiefe erkannt. Die orts aufgelösten Phasenanalysen der Kernscheiben zeigten, dass sich in Kontakt mit der NaCl-gesättigten Lösung Mg(OH)₂ und 3-1-8-Phase unter Umsetzung von Rest-MgO und 5-1-8-Phase gebildet haben. Im sichtbaren Saumbereich dominierte Mg(OH)₂, im tiefer liegenden Bereich die 3-1-8-Phase (Abbildung 68 bis Abbildung 71).

Die Analyse der Lösung (Tabelle 7) zeigte, dass sich die zugeführte NaCl-gesättigte Lösung durch den Kontakt mit Rest-MgO und der 5-1-8-Phase mit Mg²⁺ und OH⁻ angereichert hat, wobei es zur Ausfällung/Kristallisation von NaCl kam (Abbildung 71). Die gebildete „Mg(OH)₂-Sperrschicht“ blockierte weitere Phasenumbildungen im Inneren des Bauwerkes sowie weitere Konzentrationsänderungen der anstehenden Lösung.

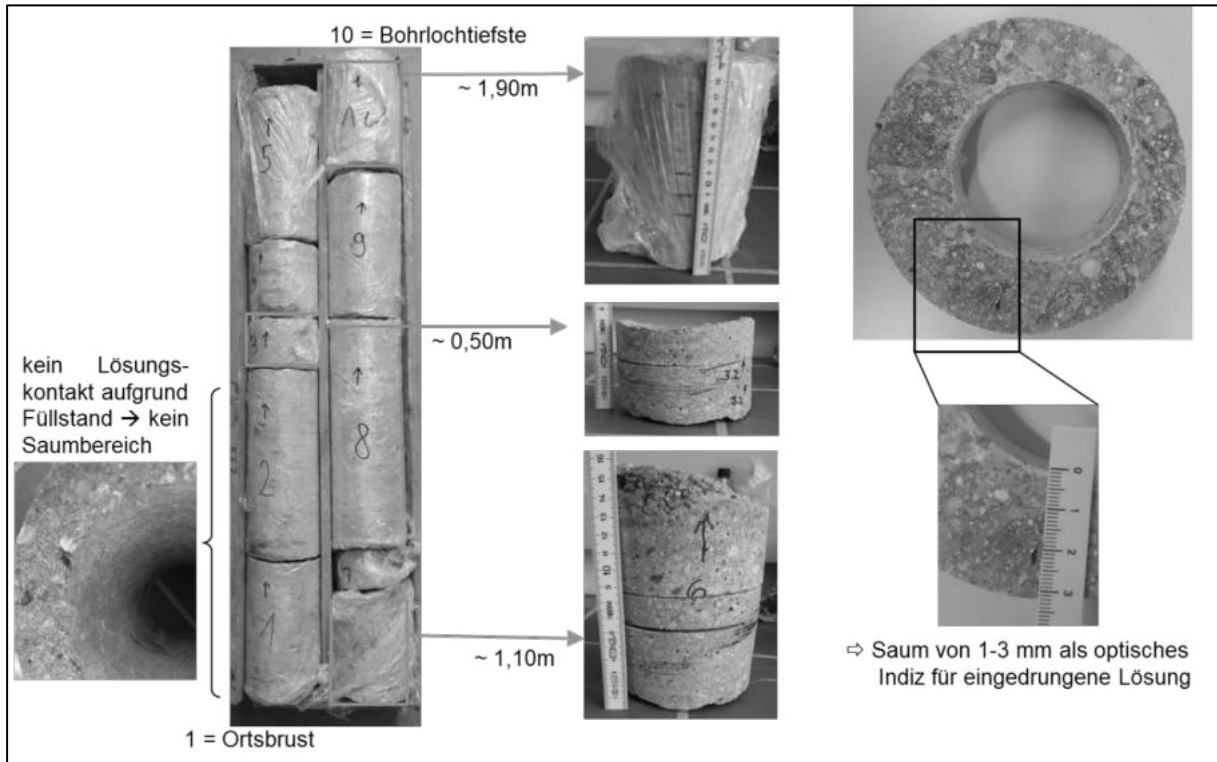


Abbildung 67: Übersicht der Kernscheiben der Überbohrung B40 zur Phasenanalyse

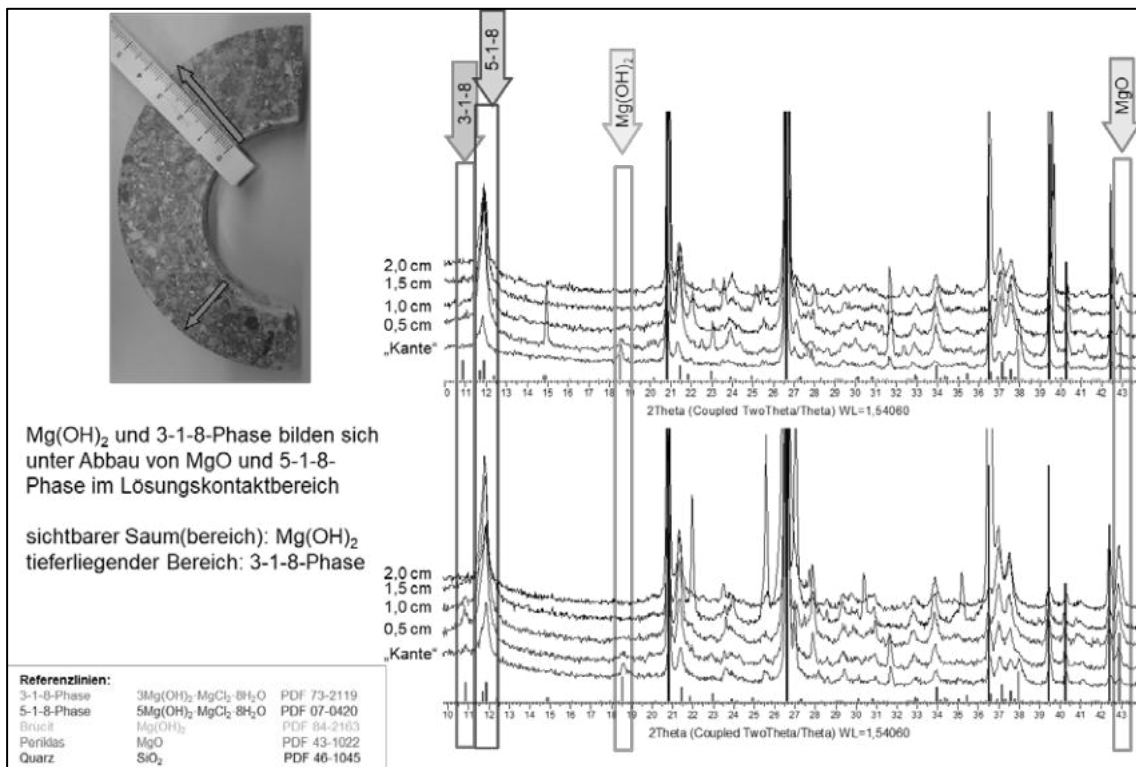


Abbildung 68: Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Kernscheibe bei 0,50 m aus der Überbohrung B40

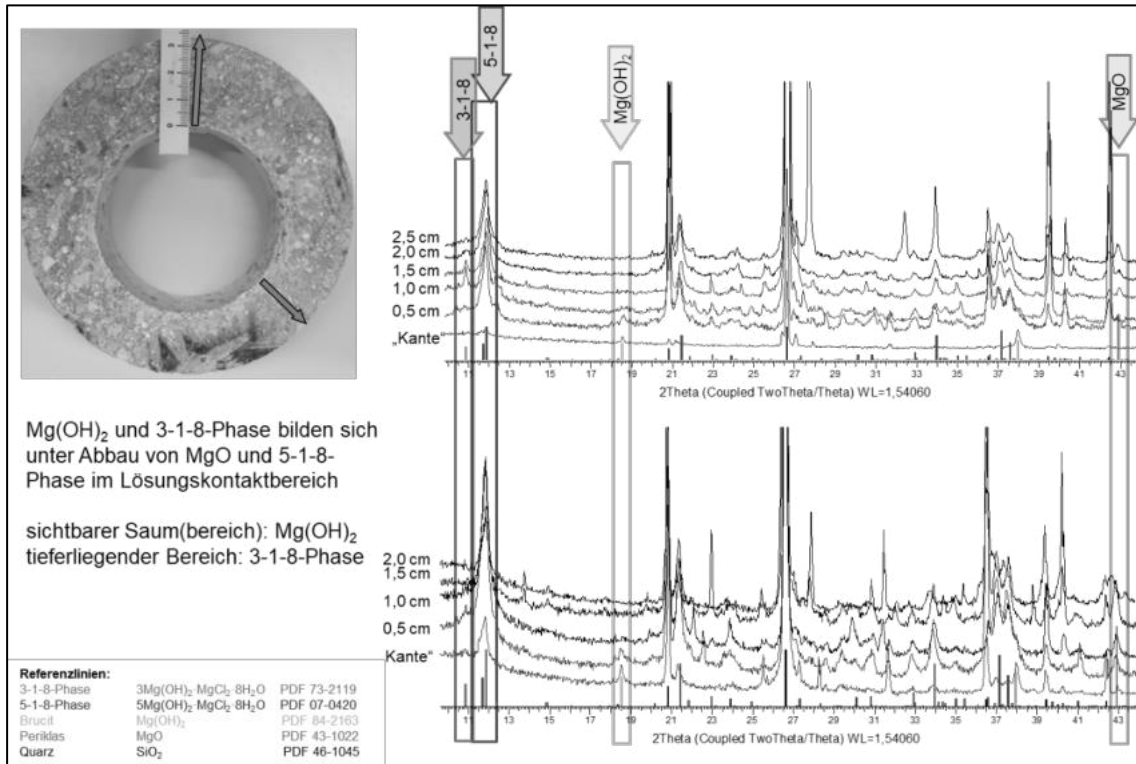


Abbildung 69: Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Kernscheibe bei 1,10 m aus der Überbohrung B40

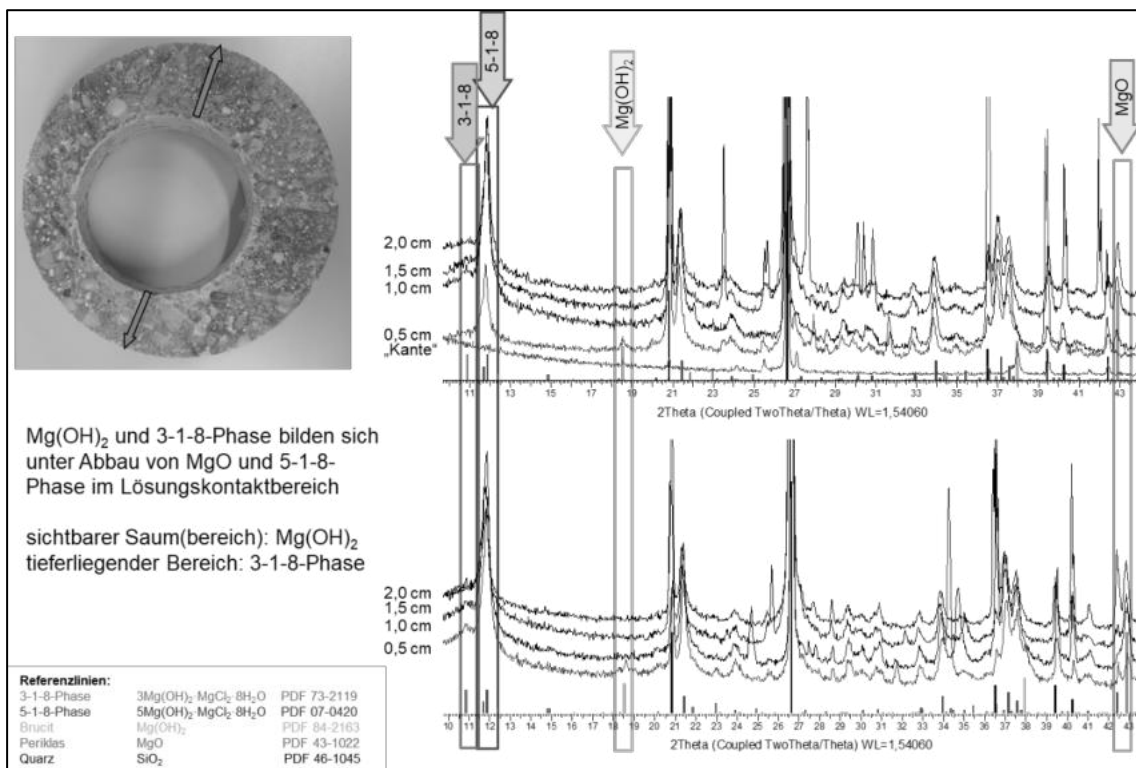


Abbildung 70: Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Kernscheibe bei 1,90 m aus der Überbohrung B40

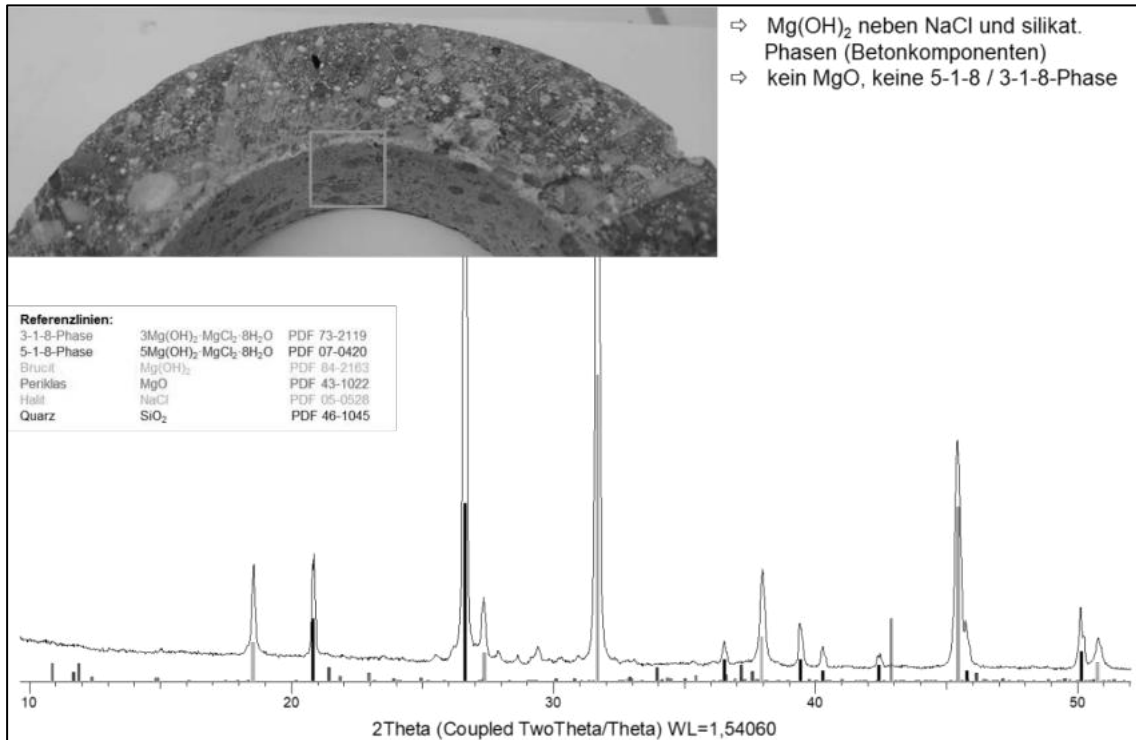


Abbildung 71: Phasenanalyse des Bohrlochinneren der Überbohrung B40

Tabelle 7: Lösungskonzentrationen sowie Analysemethoden der aus der B40 entnommenen Lösung

	Ionenkonzentration [mol/kg (H ₂ O)]		Analysemethode
	NaCl-gesättigte Ausgangslösung - nicht analysiert -	Lösung nach 3,5 Jahren Kontaktzeit mit dem Bauwerk (3 Lösungsproben)	
Na ⁺	6,16 *	(5,17 - 5,68) ± 0,01	Ionenchromatographie
Mg ²⁺		0,2 ± 0,01	komplexometrisch mit EDTA
Cl ⁻	6,16 *	(5,68 - 6,20) ± 0,01	potentiometrisch mit AgNO ₃
2OH ⁻		0,0002 ± 9·10 ⁻⁵	potentiometrische Rücktitration mit NaOH
K ⁺		0,10 ± 0,001	gravimetrisch als BaSO ₄
Ca ²⁺		0,059 ± 0,001	komplexometrisch mit EDTA
Dichte bei 25 °C	1,20 **	(1,21- 1,22) ± 0,001	Auswiegen von 50 ml Lösung

* Literaturwerte [29] [www.thereda.de]
** [30]

6 Untersuchungen zur möglichen Variation der Spritzbetonrezeptur im Hinblick auf die technologische Verarbeitbarkeit (AP2)

6.1 Vorbemerkungen

Für die Errichtung des GV2 wurde eine Rezeptur mit MgO der Firma Styromag, einer R-Lösung und Quarzzuschlag der Firma QuickMix erprobt und eingesetzt [3]. Aufgrund der geringen Spritzschichtmächtigkeit von im Mittel 10 cm beim GV2 sollte die Rezeptur derart angepasst und variiert werden, dass die Klebrigkeit des Spritzgutes verbessert und so eine größere Schichtmächtigkeit gespritzt werden kann. Damit würde die Anzahl der BAG verringert und die Homogenität des Bauwerkes verbessert werden.

Außerdem wurde der Quarzzuschlag durch Salzzuschlag ersetzt und Rezepturvarianten getestet.

Die verschiedenen Spritzbetonrezepturen wurden in drei Schritten untersucht und erprobt. Im Labor wurden zunächst sogenannte **Handhabungsversuche** durchgeführt. Dabei wurden die drei Betonkomponenten (MgO, silikatischer Zuschlag bzw. Salz, Lösung) händisch vermengt und Probekörper hergestellt. Die Betonmasse wurde lagenweise in Prüfzylinder geschüttet und mittels Presse statisch auf die Dichte des Spritzbetons verdichtet. Es wurde einerseits beim Anmischen des Betons die Verarbeitbarkeit bewertet, andererseits wurde die Frühfestigkeit mittels Penetrometer an den Prüfkörpern ermittelt.

In einem zweiten Schritt wurden verschiedene Rezepturvarianten im **Technikumsversuch** mit einer kleinen Spritzmaschine erprobt. Hierfür wurden Spritzkästen verwendet.

Zuletzt wurden **in situ Spritzbetonversuche** in der Grube Teutschenthal mit ausgewählten Rezepturen (hohe Schichtmächtigkeit, geringer Rückprall) durchgeführt.

Als Ausgangsrezeptur wird stets die Rezeptur bezeichnet, die bei der Errichtung des Versuchsbauwerkes GV2 verwendet wurde (GV2-Rezeptur). Die Rezeptur musste zunächst mit den aktuell am Markt verfügbaren Komponenten getestet werden.

Beim GV2 und bei allen weiteren Versuchen wurde ein geliefertes MgO (MgO-Lieferware bzw. MgO-LW) der Firma Styromag mit einer Reinheit von mindestens 75 % MgO² verwendet.

Sowohl beim GV2 als auch bei allen Labor- und Spritzbetonversuchen wurde Zuschlag (Quarz und Salz) mit einer maximalen Korngröße von 8 mm eingesetzt. Beim GV2 wurde Zuschlag der Firma QuickMix, in den neuen Labor- und in situ Versuchen Zuschlag von der Fa. Maxit verwendet.

Für den Bau des GV2 wurde eine R-Lösung eingesetzt. Bei den aktuellen Versuchen (ab 2019) wurde eine 5 molale MgCl₂-Lösung von zwei Lieferanten (DEUSA oder Schüssler Novachem) verwendet.

Tabelle 8: Zusammensetzung und Lieferanten der Komponenten der Spritzbetonrezeptur GV2 (Referenzrezeptur)

	MgO	Lösung	Zuschlag (0-8 mm Körnung)
	15,6 M.-%	11,4 M.-%	73,0 M.-%
GV2 (2008)	Styromag	R-Lösung	QuickMix
Labor-/ in situ Versuche (ab 2019)	Styromag	S30-Lösung (DEUSA)	Maxit

² Im Weiteren wird zwischen MgO als Verbindung (= 100 % MgO) und dem gelieferten MgO-Produkt – nachfolgend als MgO-Lieferware bzw. MgO-LW bezeichnet – unterschieden.

6.2 MgO-Sorte (Reaktivitätsspanne) und MgO-Gehalt

In Vorgesprächen mit dem Lieferanten *Styromag* wurde die erforderliche Lieferqualität und Reaktivität sowie der Inhalt des zugehörigen Datenblattes für die MgO-Lieferware bereits im Rahmen des FuE-Projektes [4] abgestimmt.

Das Styromag-MgO wird durch Brennen natürlicher Vorkommen an Magnesit in der Steiermark gewonnen. Durch Nebenbestandteile, wie Kalk, Dolomit und Talk u.a., enthält das MgO-Produkt entsprechende Nebenbestandteile, wie CaO (Freikalk), Calcit, Talk etc., deren Anteil im Bereich von 15 - 30 Ma.% liegt. Entsprechende MgO-Lieferware enthält somit MgO-Gehalte in der Größenordnung von etwa 80 Ma.%. Über Analysenzertifikate (Datenblatt, s. Anlage 5.1) wird die konkrete Zusammensetzung ausgewiesen. Für die Verwendung des Magnesiumoxids für die Herstellung von Magnesiabaustoff (Sorelbeton) muss der MgO-Anteil bekannt sein, um die Mischung der Komponenten gesichert einstellen zu können.

Aus Vorversuchen zur Rezeptureinstellung (bereits im FuE-Projekt MgO-SEAL [4]) hatte sich gezeigt, dass der CaO-Anteil ("Freikalk") in der MgO-LW < 0,5 Ma.% sein muss. Ein höherer Freikalk-Gehalt hat eine deutlich erhöhte Temperatur beim Abbinden zur Folge, da dessen Hydratation sich bemerkbar macht, d.h., ein gewisser Lösungsanteil sofort dafür verbraucht wird.

Der Anteil an Talk, welcher als natürlicher Nebenbestandteil ebenfalls enthalten ist, beträgt ca. 5 Ma % in der MgO-LW. Ein Vergleich mit Talk-freier MgO-Lieferware, wie beispielsweise aus China, hat gezeigt, dass diese nicht zur Herstellung von MgO-Spritzbeton verwendet werden kann, da keine „Klebrigkeit“ erreicht wird. Der Talk-Gehalt ist offensichtlich dafür verantwortlich [4]. Ein separates Zumischen von Talk zur MgO-LW wurde unter Laborbedingungen getestet (Abschnitt 6.4).

Das für die Laborversuche, die halbertechnischen sowie in-situ-Spritzbetonversuche benötigte MgO (MgO-Lieferware) wurde in 3 Lieferungen als Sackware (25 kg pro Sack) auf Paletten (Tabelle 9) bezogen.

Tabelle 9: Überblick über die MgO-Lieferungen von Styromag

MgO-LW-Charge	G10/16	G10/54	G10/74
Lieferdatum	März 2020	Oktober 2020	September 2021
Liefermenge [t]	3,125	3,00	2,1
Anzahl Paletten	3	3	2
Anzahl Säcke	125	120	84

Das Datenblatt des Herstellers (Anlage 5.1) enthält neben dem Mineralphasenbestand (MgO, Talk, CaO etc.) auch den für die Einordnung der Reaktivität des MgOs verwendeten Zitronensäuretestwert (ZTW). Von den MgO-Lieferungen wurden über repräsentative Probennahmen der Phasenbestand³ und der Zitronensäuretestwert⁴ überprüft. In Abbildung 72 sind die

³ Die Messungen erfolgten mit einem Röntgendiffraktometer D8 Discover (Fa. Bruker) mit Cu-K_α-Strahlung ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) und einem Göbelspiegel als Monochromator, mit einer 0,6 mm Blende und einem 2,5° primären Soller. Der Öffnungswinkel des verwendeten Lineardetektors Vantec-1 betrug 1°. Die Generatorleistung betrug 40 kV / 40 mA. Die Proben wurden als Flachpräparat (Durchmesser Messfläche: 2,5 cm) in Reflexion im 2-Theta-Bereich von 5 – 70° mit einer Schrittweite von 0,023° und einer Zählzeit von 10 s vermessen. Dies entspricht einer Messzeit von ca. 8 h pro Probe.

⁴ Zur Bestimmung der MgO-Reaktivität mittels Zitronensäuretest werden 100 ml 0,4 n Zitronensäurelösung in ein 400 ml Becherglas pipettiert, gerührt und auf $30 \pm 0,5 \text{ °C}$ temperiert. Eine pH-Elektrode wird eingetaucht und mit einer Rührgeschwindigkeit von 450 U/min gerührt bis die Temperatur am pH-Gerät mindestens 29,5°C anzeigt. Die Messung wird mittels Computer (Software: LabX direkt pH 2.3) verfolgt und alle 3 s ein Messwert aufgenommen. Bei Messstart werden sofort 2,00 g MgO-LW in das Becherglas gegeben. Die Messung ist beendet, wenn pH = 9 erreicht ist. Zur Auswertung wird eine pH-Wert-Zeit-Kurve erstellt, aus welcher die Zeit bis zum Erreichen des pH-Wertes 7 abgelesen wird (=ZTW). Zur Reproduktion sollte jede Probe mind. 2x vermessen werden. Weitere Details zur Reaktivitätsbestimmung siehe [5].

Röntgenaufnahmen der MgO-LW-Proben der Charge G10/16 im Vergleich zum MgO-LW mit erhöhtem Freikalk-Gehalt (Proben aus MgO-SEAL [4]) gezeigt. Die qualitative Auswertung der Diffraktogramme bestätigte den in den Datenblättern angegebenen Phasenbestand. Die MgO-Lieferware wies neben MgO und Talk als Nebenbestandteile noch Calcit, Dolomit sowie die Silikate Lizardit und Plombardit auf. CaO konnte in den Proben nicht detektiert werden, was unter den angewandten Messbedingungen ein CaO-Gehalt von < 0,5 Ma.% bedeutet. Die Diffraktogramme der Chargen G10/54 und G10/74 sind mit vergleichbarem Ergebnis in Anlage 5.2 (Abbildung 297 und Abbildung 298) zu finden.

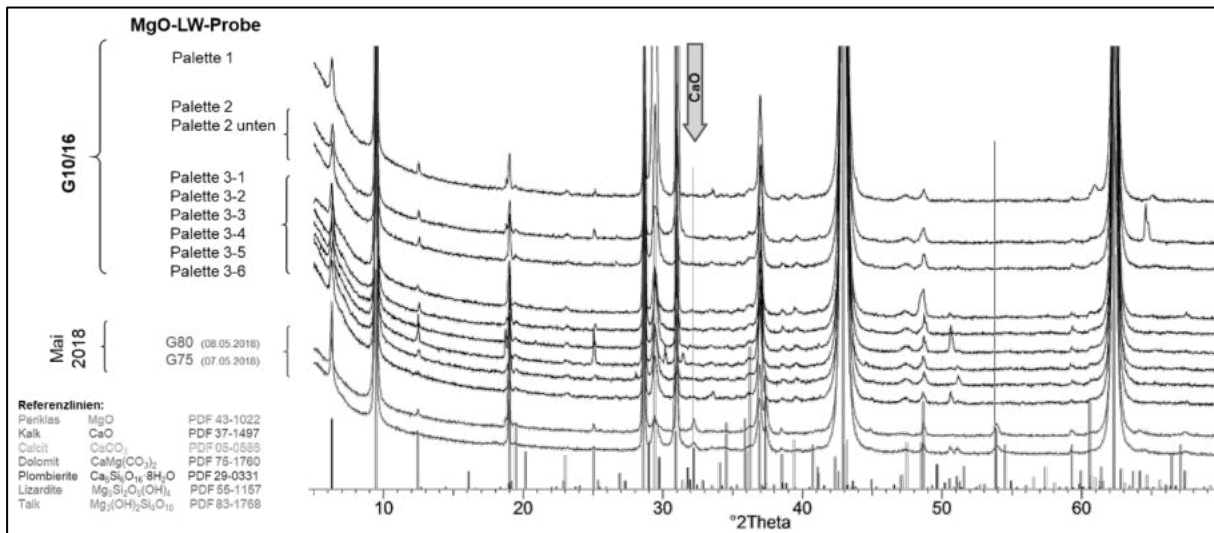


Abbildung 72: Vergleich der Pulverdiffraktogramme der MgO-LW-Proben der Charge G10/16 (Styromag) mit den MgO-LW-Proben G75 und G80 mit erhöhtem CaO-Gehalt (FuE-Projekt MgO-SEAL) (blaue Diffraktogramme)

Für die Herstellung von MgO-Spritzbeton wird eine mittlere Reaktivität (ZTW zwischen 150 s und 300 s) benötigt. Die ZT-Werte der Chargen G10/16 und G10/54 lagen bei 204 ± 10 s bzw. 182 ± 10 s, die der Charge G10/74 dagegen bei 358 ± 22 s (Messkurven in Abbildung 299 bis Abbildung 301 in Anlage 5.2). Die Reaktivität der Charge G10/74 ist entgegen den früheren Absprachen mit Styromag zu gering, das der ZTW mit mehr als 300 s zu groß ist. Das MgO wurde dennoch für die Spritzbetonversuche verwendet. Für die Chargen G10/16 und G10/74 wurden die Herstellerangaben laut Datenblatt (200 s bzw. 362 s) bestätigt, für die Charge G10/54 wurde mit 182 ± 10 s ein etwas niedrigerer ZTW im Vergleich zur Datenblatt-Angabe (251 s) bestimmt.

6.3 Zugabe von Fasern

Erste Ergebnisse zum Einfluss der Zugabe von Fasern zum MgO-Spritzbeton wurden im vorangegangenen Vorhaben MgO-SEAL erhalten [4]. Durch zugesetzte Fasern sollte die Frischbetonkonsistenz verbessert und die Frühfestigkeit (Zugfestigkeit im frühen Zustand) erhöht werden. Aufgrund der geforderten Langzeitbeständigkeit des MgO-Betons wurden Schmelzbasaltfasern ohne Beschichtung bevorzugt. Die damaligen Untersuchungen wurden mit der Sorte "UCF 20 mm" der Firma Deutsche Basalt Faser GmbH (Sangerhausen) bei einer Zugabemenge von 2 kg bis 5 kg Fasern je m³ durchgeführt.

In Laborversuchen wurde der Einfluss von Schmelzbasaltfasern auf die Konsistenz des angemachten Mörtels und auf die Endfestigkeit der abgebundenen Proben aus MgO-Beton in Anlehnung an die Referenzrezeptur GV2 mit:

- 15,8 Ma.% MgO (Lehmann & Voss mit ZTW = 205 s)
- 13,0 Ma.% Lösung DEUSA S30
- 69,4 Ma.% Hartgesteinszuschlag 0-8 mm
- 1,6 Ma.% Talk IMERYS
- 0,2 Ma.% Schmelzbasaltfasern mit L = 20 mm

untersucht. Da zum Zeitpunkt der Laborversuche die von der TUBAF neu gekaufte Spritzbetonmaschine (s. Abschnitt 6.4.2) noch nicht zur Verfügung stand, wurde der Mörtel konventionell im Labormischer angemischt und die zylindrischen Probekörper (D = 100 mm, L = 200 mm) händisch hergestellt.

Im Ergebnis der damals durchgeführten Versuche war durch Fasern praktisch keine Festigkeitserhöhung (einaxiale Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit) nachweisbar. Weiterhin ergaben sich beim Mischen (Versetzen des Trockengemisches aus MgO, Fasern und Gesteinskörnung mit Lösung) Probleme durch Nesterbildung (ungleichmäßige Verteilung der Fasern). Die Festigkeit der MgO-Betonproben (Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit) ohne Fasern ist ausreichend hoch. Durch die Fasern wurde kein signifikanter Festigkeitszuwachs erreicht. Schon nach 3 Tagen hatten die Probekörper ohne Fasern eine einaxiale Druckfestigkeit von ca. 50 MPa und eine Spaltzugfestigkeit von ca. 4,5 MPa (Mittelwerte aus 3 Prüfkörpern). Für die Erhöhung der Haftzugfestigkeit des MgO-Betons am Steinsalz sind Fasern nicht relevant [19].

Beim Trockenspritzverfahren wird sich wahrscheinlich die Ungleichmäßigkeit der Faser-Verteilung im MgO-Beton erhöhen. Das Nassspritzverfahren war bei MgO-Beton nicht einsetzbar, da für das Baustoffgemisch keine nachweisbar langzeitstabilen Erstarrungsbeschleuniger zur Verfügung stehen.

Durch die Anpassung des MgO-Produktes der Firma Styromag mit einem natürlichen Talkgehalt von ca. 5 % und durch die Begrenzung des Freikalkgehaltes konnte die gewünschte Frischbetonkonsistenz (Klebrigkeit) und Frühfestigkeit auch ohne die Zugabe von Fasern erreicht werden (siehe Abschnitt 7.1). Fasern wurden deshalb in den weiteren Versuchen nicht verwendet.

6.4 Variation der Spritzbetonrezeptur

6.4.1 Reproduktion der GV2-Rezeptur im Labor

Als Referenz der Spritzbetonrezeptur wird die klassische Rezeptur des Großversuches GV2 betrachtet. Sie ist wie folgt zusammengesetzt:

MgO (G75 der Firma STYROMAG):	15,6 Ma.%
R-Lösung:	11,5 Ma.%
Gesteinskörnung 0-8 mm:	72,9 Ma.%

Durch geänderte Randbedingungen (aktuell verfügbare Anmachlösungen und MgO-Sorten) ergaben sich einige notwendige Anpassungen dieser Rezeptur. An Stelle der bisherigen Anmachlösung in der GV2-Rezeptur (R-Lösung) wurde in den Versuchen eine kommerziell verfügbare MgCl₂-Lösung mit der geforderten MgCl₂-Konzentration (5 molal) von zwei Lieferanten (Lösung S30 von DEUSA, Lösung MAGNESOL 32 von Schüssler Novachem GmbH) eingesetzt, die aber eine andere Viskosität und Dichte als die R-Lösung hat. Dadurch konnten die bisher verwendete Gesteinskörnung und die MgO-LW der GV2-Spritzbetonrezeptur bei den neuen Spritzbetonversuchen nicht zu gleichen Masseanteilen verwendet werden. Die GV2-Rezeptur musste mit der neuen Anmachlösung und den aktuell verfügbaren MgO-Sorten (Abschnitt 6.2) reproduziert bzw. angepasst werden.

Neben den Eigenschaften der Gesteinskörnung (Kornverteilung, Kornform), der MgO-Lieferware (Reaktivität, Talkgehalt) und der Anmachlösung (Dichte, Viskosität) wird die "Klebrigkeit" des MgO-Spritzbetons durch die zwei Rezepturparameter Masseverhältnis Lösung/MgO-LW beim Spritzen und Masseverhältnis Zuschlag/MgO-LW im Trockengemisch bestimmt. Diese beiden Parameter (Lösung/MgO-LW und Zuschlag/MgO-LW) werden für die Beschreibung der möglichen Variation der Spritzbetonrezeptur einheitlich verwendet.

Beide Parameter gehen in das Masseverhältnis Lösung/Trockengemisch ein. Das Trockengemisch besteht aus der MgO-Lieferware und dem Zuschlag. Da die Zusammensetzung des Trockengemisches und damit der Parameter Zuschlag/MgO-LW in jedem Einzelfall praktisch konstant ist, kommt es beim Spritzen durch das Nachregeln der Lösungszufuhr an der Spritzdüse zu Schwankungen im Masseverhältnis Lösung/Trockengemisch und somit zu Schwankungen des Massenverhältnisses Lösung/MgO-LW, was wiederum zu Schwankungen in der Zusammensetzung des Spritzbetons führt.

Beim Trockenspritzverfahren ist das Masseverhältnis Zuschlag/MgO-LW durch die Trockenmischung vorgegeben, sodass dieser Parameter vorher optimiert werden muss. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW kann durch den Düsenführer so variiert werden, dass ein "gefühltes" gutes Ergebnis (hohe "Klebrigkeit") entsteht. Als Maß für die "Klebrigkeit" wurde nach vielen Versuchen letztendlich die Frühfestigkeit in den ersten Stunden nach dem Spritzen angesehen und bestimmt. Für die Messung der Frühfestigkeit wurde ein Betonpenetrometer verwendet. Die Frühfestigkeit kann mit dem Penetrometer an Laborproben und am frisch gespritzten Beton in situ bestimmt werden.

Die Ergebnisse zur Frühfestigkeit nach wenigen Stunden und zur Frühfestigkeit nach wenigen Tagen sind im Abschnitt 7.1 beschrieben. Im vorliegenden Abschnitt werden nur die Ergebnisse erwähnt, die im Zusammenhang mit der Rezepturauswahl im Zusammenhang stehen.

Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Zur Erprobung verschiedener Rezepturen wurden diese zunächst im Labor hergestellt und die Frühfestigkeit untersucht.

Nachdem aufgrund der Absprachen mit der Firma STYROMAG nun ein für Spritzbeton geeignetes MgO (MgO-LW) mit den gewünschten Informationen zum Mineralbestand (Datenblatt – siehe Anlage 5.1) zur Verfügung stand, wurden Laborversuche zur Bestimmung der optimalen Massenverhältnisse Lösung/MgO-LW und Zuschlag/MgO-LW begonnen. Dies war erforderlich, da zumindest die Anmachlösung (früher R-Lösung) nicht mehr zur Anwendung kam, sondern eine kommerziell verfügbare MgCl₂-Lösung eingesetzt wurde, die aber eine andere Viskosität und Dichte hat. Dadurch war eine identische Übernahme der GV2-Spritzbetonrezeptur nicht möglich. Sie musste unter diesen Bedingungen mit der neuen Anmachlösung reproduziert werden.

Die Rezeptur wurde angepasst, indem in einer Versuchsreihe der Quarzzuschlag durch Steinsalzgrus substituiert wurde und in einer weiteren Versuchsreihe der Talkanteil im MgO-Bindemittel erhöht wurde. Ein Zumischen von Talk hat unter praktischen Bedingungen keine Perspektive. Talk wurde nur unter Laborbedingungen für das Verständnis der Wirkung des Talks zur Erhöhung der Klebrigkeit (bekannt als Verdickungsmittel) hinzugesetzt.

Es wurden in kleine Mengen MgO-Bindemittel STYROMAG (4,5 % natürlicher Talk als Nebenbestandteil) mit der in Tabelle 10 angegebenen Zusatzkomponente trocken vermischt, schnell mit Lösung (immer S30-Lösung der DEUSA) versetzt und in Folie geknetet und deren Konsistenz bzw. Klebrigkeit haptisch bewertet. Dabei wurden insgesamt 10 Varianten (V1 bis V5 mit Untervarianten) untersucht.

Tabelle 10: In den Vorversuchen verwendete Rezepturvariationen (MgO ist hier MgO-LW)

Variante	Zusatz-Komponenten	Lösung/MgO	Zuschlag/MgO	Talkzusatz /MgO	Ergebnis
V1	Sand, Kies	1,0	3,49	-	nicht selbsttragend
V2	Sand, Kies	0,73	4,68	-	krümelig
V2a	-	0,73	-	-	weich
V2b	Talk	0,73	-	0,05	Talk wirkt wasserabweisend
V2c	Talk	0,76	-	0,05	formbeständig
V2d	Wie 2c + Salz (ESCO)	0,76	1,89	-	gut
V3	Salz (ESCO)	1,0	3,2	-	gut
V4	Salz (GESAV)	1,0	3,2	-	geringere Klebrigkeit
V4a	Salz (GESAV)	1,0	3,2	0,05	steif
V5	Salz (Streusalz)	1,0	3,2	-	krümelig

Die verwendete MgO-Lieferware hatte bereits einen natürlichen Talkgehalt von 4,5 %. Mit dem weiteren Talkzusatz wurde untersucht, ob höhere Talkgehalte im MgO-Produkt vorteilhaft sind. Es wurden bei den Versuchen V2b, V2c und V4a jeweils 5 Ma.% des Talks zugemischt (bezogen auf den MgO-Anteil).

Der haptische Eindruck bei den Proben mit Salzzusatz (V2d bis V5) war je nach Art des Salzes auch bei gleichem Salzanteil (V3 bis V5) unterschiedlich.

Aus diesen Vorversuchen ließen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Einen Eindruck über die Klebrigkeit und Eigentragsfähigkeit erhält man nur, wenn man im Labor die Bindemittelphase (ohne Zuschlag) untersucht und optimiert. Damit eine "Eigentragsfähigkeit" erreicht wird, muss das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW < 1 sein.
- Die Laborversuche mit der Gesamtrezeptur können einen falschen Eindruck vermitteln, weil die Spritzbetonrezeptur zu trocken erscheint. Mischungen, die gut formbar sind, oder aus denen gute Probekörper hergestellt werden können, erscheinen weniger gut spritzbar (zu feucht). Die Mischbarkeit der Bindemittelmasse mit dem Zuschlag Sand/Kies bzw. Steinsalzgrus kann nur durch Spritzversuche ausgetestet werden.
- Dies gilt auch für den Rückprall und die Schichtdicke. Die Wirkung eines erhöhten Talkgehaltes im Styromag-MgO kann wahrscheinlich erst in Spritzversuchen getestet werden.
- Beim Einsatz von Steinsalzgrus haben sich bisher weitestgehend abgerundete Körner bis 4 mm bewährt. Die Eignung anderer Korngrößen (z. B. 0-8 mm) und der Einfluss der vorliegenden Kornform des Steinsalzgruses kann auch erst in Spritzversuchen getestet werden.
- Das optimale Verhältnis Lösung/MgO-LW in der Größenordnung 0,9 bis 0,7 soll in Spritzversuchen mit der GV2-Rezeptur (73 % Zuschlag bzw. Masseverhältnis Zuschlag/MgO-LW = 4,67) ermittelt werden.
- Danach wird bei diesem Verhältnis (optimaler Bindemittelansatz Lösung/MgO-LW) der optimale Anteil des Steinsalzgruses bei unterschiedlicher Körnung ermittelt. Das Ziel der Untersuchungen ist eine hohe Schichtdicke und ein geringer Rückprall.

- Eine weitere Erhöhung des natürlichen Talkgehaltes in der MgO-LW auf ca. 10 % ist nur bei sehr hohem Aufwand der Vorauswahl und mit Verschnitt der Rohstoffe möglich (gemäß der Angabe der Fa. Styromag).

Weiterhin wurden auf der Basis einer Modellierung [20] folgende Verhältnisse Zuschlag/MgO-LW für MgO-Spritzbeton mit einer maximalen Packungsdichte in Abhängigkeit der Art des Zuschlages berechnet:

Silikatischer Zuschlag 0 - 8 mm:

Variante 1: Zuschlag/MgO-LW = 7,0

Variante 2: Zuschlag/MgO-LW = 3,2

Zuschlag aus Salzgrus 0 - 4 mm:

Variante 1: Zuschlag/MgO-LW = 3,1

Variante 2: Zuschlag/MgO-LW = 3,5

Zuschlag aus Salzgrus 0 - 8 mm:

Variante 1: Zuschlag/MgO-LW = 4,1

Variante 2: Zuschlag/MgO-LW = 3,5

Die Ergebnisse für den silikatischen Sand-Kies-Zuschlag 0 – 8 mm weichen sehr stark von den bisherigen Erfahrungen ab und werden nicht weiter betrachtet.

Beim Salzzuschlag wird aus wirtschaftlichen Erwägungen auf einen Korngrößenbereich 0 - 8 mm orientiert. Die Berechnungsergebnisse sind von der Korngrößenverteilung und der Kornform der Partikel abhängig. Das ermittelte Massenverhältnis Zuschlag/MgO-Bindemittel von 3,5 bzw. 4,1 wird als vorläufiges Zwischenergebnis gewertet.

In [21] wurde der Zusammenhang zwischen der spezifischen Oberfläche des Zuschlages und dem Lösungsbedarf der Rezepturvariante untersucht. Gleichzeitig wurde neben der visuellen Qualität der im Labor hergestellten Körper die durch den Penetrometertest ermittelte zeitabhängige Frühfestigkeit berücksichtigt. Durch Laborversuche wurde für die Variante mit Salzzuschlag 0 - 8 mm auf empirischem Wege ein optimales Masseverhältnis von Lösung/MgO-Bindemittel von 0,6 und ein Masseverhältnis Zuschlag/MgO-Bindemittel von 4,1 ermittelt [21]. Allerdings zeigten Wiederholungsversuche trotz identischer Laborbedingungen eine Streuung der Festigkeitswerte aus dem Penetrometertest. Dieser Umstand begrenzte die Aussagefähigkeit der Laborversuche und zeigte die Notwendigkeit, halbtechnische Spritzbetonversuche mit unterschiedlichen Rezepturvarianten durchzuführen.

6.4.2 Technikumsversuche

In Technikumsversuchen wurde zunächst die im GV2 verwendete Spritzbetonrezeptur reproduziert und anschließend derart angepasst, dass die Klebrigkeit verbessert, die Spritzmächtigkeit erhöht und der Rückprall verringert wurde. In weiteren Versuchen wurde der Quarzzuschlag durch Salzzuschlag und kombinierten Quarz-Salz-Zuschlag ersetzt und verschiedene Rezepturvarianten erprobt.

Für die Durchführung der Versuche wurde durch die TUBAF die Spritzbetonmaschine WM-14U der Firma Werner Mader gekauft. Es ist die kleinste am Markt verfügbare Spritzmaschine, die einen flexibel regelbaren Versuchsbetrieb im Trockenspritzverfahren mit einem Größtkorn von 8 mm ermöglicht. Die maximale Leistung beträgt 2 m³/h, die aber für die Technikumsversuche nicht erforderlich ist (siehe Abbildung 73). Die Spritzbetonmaschine verfügt über ein Taschenrad, mit dem das Trockengemisch portioniert wird und in den Schlauch und zur Düse geführt wird. Aufgrund der kleinen Kammern oder Taschen mit einem Volumen von 120 ml je Kammer kann das Trockengemisch in sehr kleine Chargen unterteilt werden.

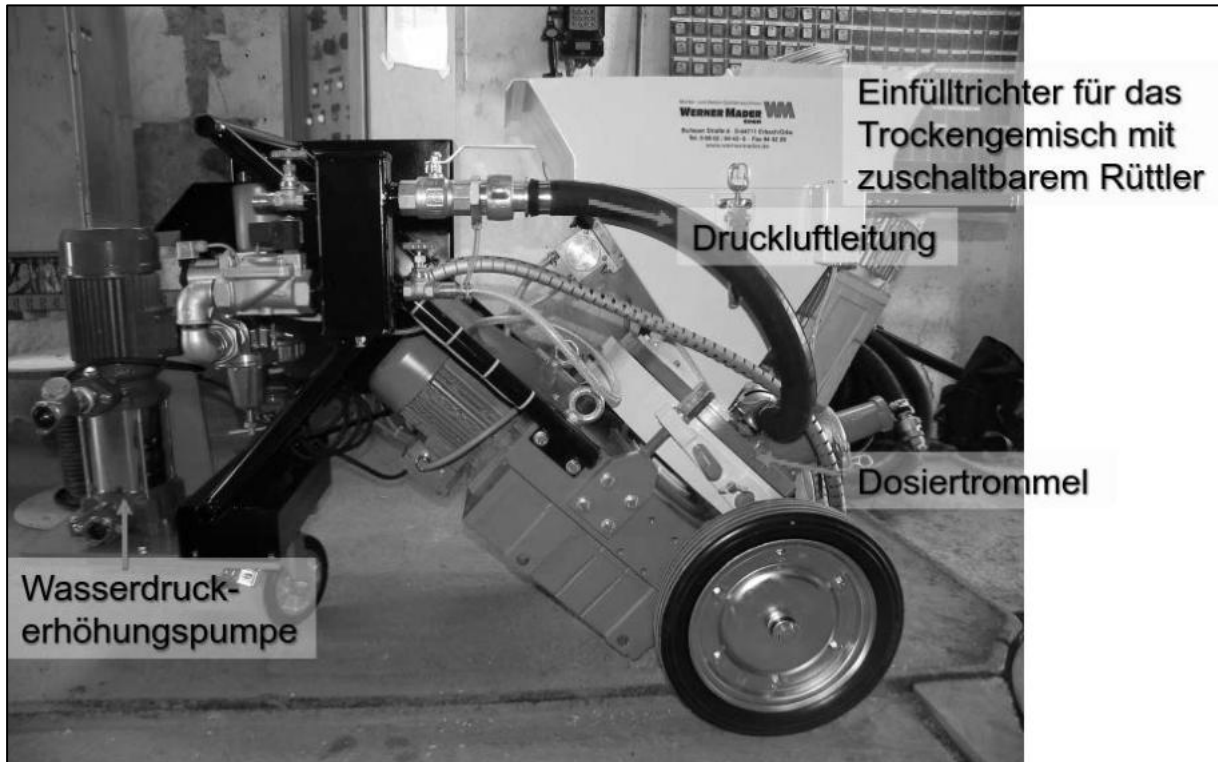


Abbildung 73: Für Technikumsversuche eingesetzte Spritzmaschine WM-14U (Firma Werner Mader) (Eigentum der TUBAF)

Mit dieser Maschine wurden insgesamt 7 halbtechnische Spritzbetonversuche SBV1 bis SBV7 (siehe Tabelle 11) an der TU Freiberg bzw. auf dem Gelände des Bergwerks „Reiche Zeche“ der TU Freiberg durchgeführt.

Tabelle 11: Rezepturvariationen der halbtechnischen Spritzbetonversuche

Serie	Variante	Verhältnis Lösung/MgO [-]	Verhältnis Zuschlag/MgO [-]	Bemerkungen
SBV1	-	Geplant: 0,73 Ist: 0,61 (Ø)	4,67	Inbetriebnahme, Test, Quarz- Zuschlag
SBV2	A	Geplant: 0,73 Ist: 0,76 (Ø)	4,67	Quarzzuschlag
	B	Ist: 0,91 (Ø)	3,20	Salzzuschlag
SBV3	A	Geplant: 0,70 Ist: 0,72 (Ø)	4,67	Quarzzuschlag
	B	Geplant: 0,82 Ist: 0,78 (Ø)	4,67	Quarzzuschlag
	C	Geplant: 0,90 Ist: 0,90 (Ø)	4,67	Quarzzuschlag
SBV4	A	Geplant: 0,81 Ist: 0,67 (Ø)	3,20	Salzzuschlag
	B	Geplant: 0,85 Ist: 0,57(Ø)	3,90	Salzzuschlag
	C	Geplant: 1,00 Ist: 0,86 (Ø)	4,20	Salzzuschlag (bestes Teilergebnis)

Serie	Variante	Verhältnis Lösung/MgO [-]	Verhältnis Zuschlag/MgO [-]	Bemerkungen
SBV5	A	Geplant: 0,90 Ist: 0,95 (Ø)	4,00	Salzzuschlag (analog SBV4C)
	B	Geplant: 0,82 Ist: 0,85 (Ø)	4,33	Gemisch aus 37 % Salzgrus 0-2 mm + 63 % Kies 2-8 mm
SBV6	A	Geplant: 0,85 Ist: 0,85 (Ø)	4,18	Salzzuschlag
	B	Geplant: 0,90 Ist: 0,92 (Ø)	4,18	Salzzuschlag
SBV7	A	Geplant: 0,85 Ist: 0,88 (Ø)	4,32	Gemisch aus 18 % Salzgrus 0-0,4 mm + 82 % Quarzzuschlag 0,4-8 mm
	B	Geplant: 0,85 Ist: 1,06 (Ø)	4,32	Gemisch aus 83 % Salzgrus 0-4 mm + 17 % Kies 4-8 mm

SBV1

Der **erste Spritzbetonversuch (SBV1)** diente hauptsächlich der Inbetriebnahme der Maschine. Dabei wurde die Rezeptur des GV2 verspritzt. Es wurde dazu ein Spritzkasten mit Abmessungen von 30 cm x 30 cm x 30 cm verwendet. Der Versuch wurde auf dem Gelände der TUBAF ausgeführt. Das Trockengemisch wurde in Eimern á 15 kg vorbereitet und während des Spritzens schrittweise in den Trichter der Spritzmaschine gefüllt. Die verwendete Salzlösung wurde in einem Vorratsbehälter an einer Kraftmessdose gewogen und so die verbrauchte Menge aufgezeichnet. Für jede Befüllung des Trichters wurde der Zeitpunkt notiert und im Nachgang die verbrauchte Menge Salzlösung ermittelt. Daraus ergab sich je nachgefülltem Eimer ein Lösung/MgO-Verhältnis. Für den SBV1 schwankte dieses aufgrund der noch fehlenden Erfahrung stark und lag deutlich unterhalb des geplanten. Der Rückprallanteil war auch mit etwa 55 % sehr hoch. Der Spritzkasten wurde nicht ausreichend gefüllt. Bohrkerne konnten deshalb nicht gewonnen werden. Die Lernkurve bei diesem Versuch war steil.

SBV2

Der **zweite Spritzbetonversuch (SBV2)** bestand aus zwei Teilversuchen. Für den Teilversuch A wurde nochmals die GV2-Rezeptur verwendet. Für den Teilversuch B wurde erstmals der Hartgesteinszuschlag durch Salz ersetzt.

Auf dem Gelände der Reichen Zeche der TUBAF in Freiberg wurde der Versuchsort eingerichtet (Abbildung 74). Nahe der Spritzbetonmaschine wurde das vorbereitete Trockengemisch in Eimern á 15 kg positioniert sowie der Vorratsbehälter mit der Salzlösung an einer Kraftmessdose aufgehängt und damit der Verbrauch über die Zeit aufgezeichnet. Die Spritzkästen standen in ca. 25 m Entfernung unter einem Zelt, sodass der 40 m lange Schlauch zwischen Spritzbetonmaschine und Spritzdüse möglichst gerade bzw. in großen Schlaufen auslag. Der Bereich um die Spritzkästen wurde mit Planen ausgelegt, sodass der Rückprall eingesammelt und später gewogen werden konnte.

Für den SBV2A mit Quarzzuschlag wurden 300 kg Trockengemisch vorbereitet. Die Rezeptur entsprach der Rezeptur des GV2 (Tabelle 12). Es wurde ein großer Spritzkasten mit einer Höhe von 80 cm, einer Breite von 50 cm und einer Tiefe von 25 cm aufgestellt. Außerdem wurde ein kleiner Spritzkasten (Testkasten) mit einer Größe 30 cm x 30 cm x 30 cm aufgestellt, in den zu Beginn des Spritzens während der Einstellphase gespritzt wurde und anschließend in den eigentlichen Spritzkasten umgeschwenkt wurde.

Tabelle 12: Spritzbetonrezepturvarianten 2A und 2B

Versuch		SBV2A	SBV2B
Geplantes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,73	0,90
Zuschlag		Quarz 0-8 mm	Salz 0-8 mm
Anteil Zuschlag	[Ma.%]	73,0	58,4
Anteil MgO	[Ma.%]	15,6	18,4
Anteil S30-Lösung	[Ma.%]	11,4	23,2
Verhältnis Zuschlag/MgO	[-]	4,68	3,17
Ausgeführtes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,76	0,81
Verbrauch Trockengemisch	[kg]	287	60
Verbrauch S30-Lösung	[kg]	38,3	14,6
Rückprall (inklusive Verluste)	[%]	55	20

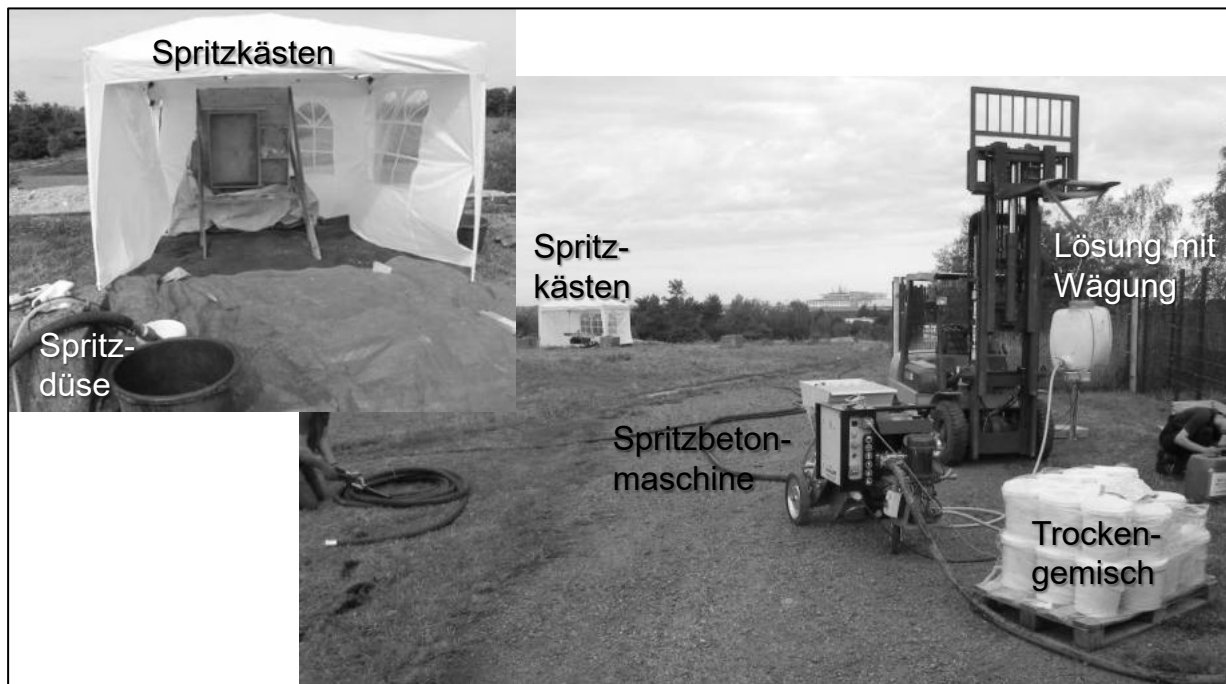


Abbildung 74: Aufbau zu den Spritzbetonversuchen

Während des Spritzens des Kastens für den Versuch 2A wurden 287 kg Trockengemisch und 38,3 kg Lösung verbraucht. Das Material auf den Planen wurde eingesammelt und gewogen. Es ist einerseits Rückprall, aber auch „Verluste“ des Spritzgutes, das während des Umschwenkens der Spritzdüse vom Testkasten auf den großen Spritzkasten oder beim Spritzen des Randbereiches des Kastens auf die Pläne fiel. Die aufgefangene Rückprallmenge wurde somit überschätzt. Der Anteil von Rückprall inklusive Verluste für den Test- und den Spritzkasten war mit ca. 55 % sehr hoch. Das mittlere Lösung/MgO-Verhältnis war mit 0,76 recht nahe dem geplanten, jedoch schwankte dieses zwischen 0,65 und 0,99 und damit stark.

Während des Spritzens des kleinen Kastens für den Versuch 2B mit dem Salzzuschlag wurden 60 kg Trockengemisch und 14,6 kg Lösung verbraucht. Der eingesammelte Rückprall (inklusive Verluste) war mit etwa 20% deutlich geringer als bei dem Teilversuch 2A mit dem Quarzzuschlag. Das Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,81 und war damit deutlich geringer als das geplante Verhältnis. Während des Spritzens wirkte die Konsistenz des Spritzgutes sehr gut, d.h. das Spritzgut klebte gut.

Auswertung Festigkeit SBV2

Aus dem großen Spritzkasten des **Versuches 2A** wurden 6 Bohrkerns entnommen und an den Prüfkörpern jeweils dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 2A sind in Tabelle 13 und in Tabelle 14 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit beträgt 51,2 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 8,1 MPa.

Tabelle 13: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV2A

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
2A-1	28	55,73	2,19
2A-2	28	40,50	2,20
2A-3	28	57,40	2,18

Tabelle 14: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV2A

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
2A-4	28	7,26	2,17
2A-5	28	8,60	2,16
2A-6	28	8,39	2,13

Aus dem kleinen Spritzkasten des **Versuches 2B** wurden 4 Bohrkerns entnommen und an den Prüfkörpern jeweils zweimal die Druck- und Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 2B sind in Tabelle 15 und in Tabelle 16 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit beträgt 48,9 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 5,1 MPa. Die Festigkeit der Proben mit Salzzuschlag ist geringer als bei den Proben mit Quarzzuschlag, aber dennoch sehr hoch.

Tabelle 15: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV2B

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
2B-1	28	46,9	1,95
2B-2	28	51,0	1,93

Tabelle 16: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV2B

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
2B-3	28	5,40	1,95
2B-4	28	4,82	1,95

SBV3

Der **dritte Spritzbetonversuch (SBV3)** bestand aus drei Teilversuchen, bei denen nur Quarzzuschlag eingesetzt wurde. Es wurde nur ein Trockengemisch für alle drei Teilversuche verwendet mit einem Zuschlag/MgO-Verhältnis wie beim GV2 (= 4,68). Für jeden Teilversuch wurde das Lösung/MgO-Verhältnis verändert, um zu prüfen, ob dies zu Unterschieden beim Spritzen oder bei der Festigkeit führt. Für den Teilversuch 3A wurde ein Lösung/MgO-Verhältnis von ca. 0,7 angestrebt, für den Teilversuch 3B von 0,82 und für den Teilversuch 3C von 0,95 (Tabelle 17). Das Verhältnis kann während des Spritzens nicht exakt vorgegeben werden. Der Düsenführer reguliert die Lösungszufuhr nach Ermessen / Erfahrung und der Klebrigkeit des Spritzgutes.

Für die 3 Versuche wurden 3 Kästen mit einer Höhe von 40 cm, einer Breite von 35 cm und einer Tiefe von 25 cm verwendet. Sie sind somit etwas größer als in den vorherigen Versuchen, um länger und gleichmäßiger spritzen zu können und einen größeren Spritzbetonkörper für mehr Bohrkern zu erhalten.

Beim Spritzen des Versuches 3A wurden 113 kg Trockengemisch und 14,6 kg Lösung verbraucht. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,72. Der Rückprallanteil (inklusive Verluste) war mit 62,8 % hoch.

Beim Versuch 3B wurden 108 kg Trockengemisch und 14,8 kg Lösung verwendet. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,78. Der Rückprallanteil war mit 48,4 % auch hoch, jedoch geringer als beim Versuch 3A.

Für den Versuch 3C wurden 98 kg Trockengemisch und 15,6 kg Lösung verwendet. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,89. Der Rückprallanteil lag bei 38,3 % und war im Vergleich zu den Teilversuchen A und B am geringsten.

Tabelle 17: Spritzbetonrezepturvarianten 3A, 3B und 3C

Versuch		SBV3A	SBV3B	SBV3C
geplantes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,70	0,82	0,95
Zuschlag		Quarzzuschlag 0-8 mm		
Anteil Zuschlag	[Ma.%]	73,3	72,0	70,6
Anteil MgO	[Ma.%]	15,7	15,4	15,1
Anteil S30-Lösung	[Ma.%]	11,0	12,6	14,3
Verhältnis Zuschlag/MgO	[-]	4,68		
ausgeführtes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,72	0,78	0,89
Verbrauch Trockengemisch	[kg]	113,0	108,0	98,0
Verbrauch S30-Lösung	[kg]	14,6	14,8	15,6
Rückprall (inklusive Verluste)	[%]	62,8	48,4	38,3

Auswertung Festigkeit SBV3

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches 3A** wurden 5 Bohrkern entnommen und an den Prüfkörpern dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und zweimal die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 3A sind in Tabelle 18 und in Tabelle 19 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit beträgt 63,3 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 8,3 MPa.

Tabelle 18: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV3A

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
3A-1	28	64,7	2,15
3A-2	28	64,6	2,16
3A-3	28	60,6	2,15

Tabelle 19: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV3A

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
3A-4	28	8,6	2,15
3A-5	28	7,9	2,18

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches 3B** wurden 6 Bohrkern ausgebohrt und an den Prüfkörpern jeweils dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 3B sind in Tabelle 20 und in Tabelle 21 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit beträgt 48,9 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 7,6 MPa.

Tabelle 20: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV3B

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
3B-1	28	52,8	2,18
3B-2	28	42,4	2,17
3B-3	28	51,5	2,17

Tabelle 21: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV3B

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
3B-4	28	7,4	2,18
3B-5	28	7,3	2,16
3B-6	28	8,0	2,18

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches 3C** wurden 8 Bohrkern entnommen und an den Prüfkörpern dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und fünfmal die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 3C sind in Tabelle 22 und in Tabelle 23 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit beträgt 46,6 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 7,0 MPa.

Tabelle 22: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV3C

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
3C-1	28	43,9	2,17
3C-2	28	55,6	2,19
3C-3	28	40,2	2,17

Tabelle 23: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV3C

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
3C-4	28	7,1	2,18
3C-5	28	6,8	2,15
3C-6	28	8,3	2,16
3C-7	28	6,2	2,14
3C-8	28	6,9	2,16
3C-9	28	6,8	2,17

Bei der Rezeptur 3A mit dem geringsten Lösung/MgO-Verhältnis von 0,72 wurde die höchste Festigkeit ermittelt. Bei den Versuchen 3B und 3C war die Druckfestigkeit um etwa 15 MPa und die Spaltzugfestigkeit um ca. 1 MPa geringer.

Die Dichte unterscheidet sich bei den Prüfkörpern aller drei Versuche nahezu nicht. Im Mittel beträgt die Dichte 2,17 g/cm³.

Im Vergleich der 3 Teilversuche zeigte sich, dass mit einem geringeren Lösung/MgO-Verhältnis eine höhere Festigkeit erreicht werden kann.

SBV4

Für den **vierten Spritzbetonversuch (SBV4)** wurde Salz als Zuschlag gewählt. Der Versuch SBV2A war vielversprechend aufgrund der guten Klebrigkeit und des geringeren Rückpralls. Der SBV4 bestand aus drei Teilversuchen mit unterschiedlichen Lösung/MgO- und Zuschlag/MgO-Verhältnissen.

Je Teilversuch wurde ein Spritzkasten mit einer Höhe von 45 cm, einer Breite von 45 cm und einer Tiefe von 30 cm vorbereitet sowie ein weiterer Testkasten, in den während der Einstellphase gespritzt wurde. Für jeden Spritzkasten wurde eine Plane ausgelegt, auf der der Rückprall aufgefangen wurde. Bei jedem Teilversuch wurde sichergestellt, dass kein Material in andere Spritzkästen oder Planen gelangt, indem diese abgedeckt wurden.

Beim Spritzen des Versuches SBV4A wurden 73 kg Trockengemisch und 11,6 kg Lösung verbraucht. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,67. Der Rückprallanteil (inklusive Verluste) betrug 43,4 %.

Für das Spritzen des Versuches SBV4B wurden 74 kg Trockengemisch und 8,8 kg Lösung verwendet. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,57. Der Rückprallanteil war mit 41,2 % ähnlich wie beim Versuch 4A.

Für das Spritzen des Versuches SBV4C wurden 73 kg Trockengemisch und 11,8 kg Lösung verwendet. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,86. Der Rückprallanteil war mit 58,3 % im Vergleich zu den Teilversuchen 4A und 4B am höchsten.

Tabelle 24: Spritzbetonrezepturvarianten 4A, 4B und 4C

Versuch		SBV4A	SBV4B	SBV4C
geplantes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,81	0,85	1,0
Zuschlag		Salzzuschlag 0-8 mm		
Anteil Zuschlag	[Ma.%]	63,9	67,8	67,7
Anteil MgO	[Ma.%]	20,0	17,4	16,1
Anteil S30-Lösung	[Ma.%]	16,2	14,8	16,1
Verhältnis Zuschlag/MgO	[-]	3,2	3,9	4,2

Versuch		SBV4A	SBV4B	SBV4C
ausgeführtes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,67	0,57	0,86
Verbrauch Trockengemisch	[kg]	73,0	74,0	73,0
Verbrauch S30-Lösung	[kg]	11,6	8,8	11,8
Rückprall (inklusive Verluste)	[%]	41,2	43,4	58,3

Auswertung Festigkeit SBV4

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV4A** wurden 3 Bohrkern entnommen. Weitere Kerne sind beim Bohren oder Sägen gebrochen. Die Bohrkern wiesen einigen Fehlstellen (Risse, Lunker) auf. An den Prüfkörpern wurde dreimal die Spaltzugfestigkeit ermittelt (Tabelle 25). Die mittlere Spaltzugfestigkeit beträgt 5,8 MPa. Aufgrund der geringen Kernanzahl wurde die einaxiale Druckfestigkeit nicht bestimmt.

Tabelle 25: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV4A

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
4A-1	28	6,41	1,92
4A-2	28	5,60	1,86
4A-3	28	5,41	1,86

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV4B** wurden 4 Bohrkern für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit entnommen (Tabelle 26). Die mittlere Spaltzugfestigkeit betrug 4,8 MPa.

Tabelle 26: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV4B

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
4B-1	28	5,89	1,80
4B-2	28	3,93	1,85
4B-3	28	3,61	1,90
4B-4	28	5,86	1,89

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV4C** wurden sieben Bohrkern entnommen. Die Bohrkern des SBV4C waren beim Bohren und Sägen am stabilsten und wiesen nur sehr wenige Fehlstellen auf. An den Prüfkörpern wurde dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und viermal die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 4C sind in Tabelle 27 und in Tabelle 28 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit betrug 49,7 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 4,4 MPa.

Tabelle 27: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV4C

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
4C-1	28	50,0	1,93
4C-2	28	48,7	1,89
4C-3	28	50,3	1,90

Tabelle 28: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV4C

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
4C-4	28	4,57	1,87
4C-5	28	4,15	1,92
4C-6	28	4,21	1,89
4C-7	28	4,81	1,86

SBV5

Der **fünfte Spritzbetonversuch (SBV5)** bestand aus 2 Teilversuchen. Für den Teilversuch SBV5A wurde Salzzuschlag verwendet. Hierbei wurde die Vorzugsvariante aus dem SBV4 gewählt und in einen großen Spritzkasten mit einer Höhe von 80 cm, einer Breite von 50 cm und einer Tiefe von 30 cm gespritzt.

Für den Teilversuch SBV5B wurde erstmals ein Gemisch aus Salz und Kies als Zuschlag verarbeitet. Es wurde Salz mit einer Körnung von 0 – 2 mm und Kies mit einer Korngröße von 2 – 8 mm eingesetzt. So wurde der Feinanteil aus dem Quarzzuschlag vermieden und die Kieskörner bewirkten eine gute Kompaktion des Spritzgutes. Gleichzeitig erzeugte das feine Salz eine gute Klebrigkeit. Dafür wurde ein kleinerer Kasten mit 45 cm Breite und Höhe und einer Tiefe von 30 cm verwendet.

Beim Spritzen des Versuches SBV5A wurden 285 kg Trockengemisch und 54,0 kg Lösung verbraucht. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,95. Der Rückprallanteil (inklusive Verluste) war sehr gering und betrug nur 26,0 %.

Für das Spritzen des Versuches SBV5B wurden 97 kg Trockengemisch und 15,7 kg Lösung verwendet. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,85. Der Rückprallanteil war mit 35,6 % höher als beim Versuch SBV5A.

Tabelle 29: Spritzbetonrezepturvarianten 5A und 5B

Versuch		SBV5A	SBV5B
geplantes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,90	0,82
Zuschlag		Salz 0 - 8 mm	Salz 0 - 2 mm Kies 2 - 8 mm
Anteil Zuschlag	[Ma.%]	67,8	Salz: 44,4 Kies: 26,0
Anteil MgO	[Ma.%]	17,0	16,3
Anteil S30-Lösung	[Ma.%]	15,2	13,3
Verhältnis Zuschlag/MgO	[-]	4,0	4,32
ausgeführtes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,95	0,85
Verbrauch Trockengemisch	[kg]	285,0	97,0
Verbrauch S30-Lösung	[kg]	54,0	15,7
Rückprall (inklusive Verluste)	[%]	26,0	35,6

Auswertung Festigkeit SBV5

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV5A** wurden 11 Bohrkerne entnommen. An drei Prüfkörpern wurde nach drei Tagen die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt. An jeweils vier Prüfkörpern wurde nach 28 Tagen die einaxiale Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 5A sind in Tabelle 30 und in Tabelle 31 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit betrug nach 3 Tagen 29,7 MPa und nach 28 Tagen 40,2 MPa. Die mittlere Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen betrug 5,2 MPa. Die mittlere Dichte aller Proben betrug 1,87 g/cm³.

Tabelle 30: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV5A

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
5A-1	3	23,6	1,86
5A-2	3	29,7	1,87
5A-3	3	35,9	1,88
5A-4	28	40,2	1,88
5A-5	28	47,1	1,88
5A-6	28	39,0	1,88
5A-7	28	34,6	1,88

Tabelle 31: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV5A

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
5A-8	28	4,7	1,86
5A-9	28	5,0	1,87
5A-10	28	5,7	1,87
5A-11	28	5,5	1,87

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV5B** wurden 6 Bohrkerne entnommen und an den Prüfkörpern jeweils dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 5A sind in Tabelle 32 und in Tabelle 33 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit betrug 30,0 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 4,9 MPa. Die mittlere Dichte aller Proben betrug 1,92 g/cm³.

Tabelle 32: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV5B

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
5B-1	28	28,6	1,90
5B-2	28	34,0	1,93
5B-3	28	27,3	1,91

Tabelle 33: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV5B

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
5B-4	28	4,3	1,93
5B-5	28	5,3	1,91
5B-6	28	5,1	1,93

Bei den Versuchen SBV4 und SBV5A mit jeweils reinem Salzzuschlag wurden verschiedene Lösung/MgO-Verhältnisse erprobt. Dabei war das Spritzgut beim SBV4C mit einem Lösung/MgO-Verhältnis von 0,86 zu trocken und beim SBV5A mit einem Lösung/MgO-Verhältnis von 0,95 zu nass. Ein optimales Lösung/MgO-Verhältnis sollte daher bei 0,9 liegen. Dieses wurde in weiteren in situ Spritzbetonversuchen angestrebt.

SBV6

Der **sechste Spritzbetonversuch (SBV6)** bestand aus 2 Teilversuchen mit jeweils Salzzuschlag. Dabei wurden jeweils Spritzkästen mit einer Höhe von 40 cm, einer Breite von 35 cm und einer Tiefe von 25 cm gespritzt. Für beide Teilversuche wurde das gleiche Trockengemisch verwendet. Beim Teilversuch SBV6A sollte ein Lösung/MgO-Verhältnis von 0,85 und beim Teilversuch SBV6B von 0,90 eingehalten werden.

Beim Spritzen des Versuches SBV6A wurden 90 kg Trockengemisch und 14,9 kg Lösung verbraucht. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,85. Der Rückprallanteil (inklusive Verluste) betrug 30,5 %.

Für das Spritzen des Versuches SBV6B wurden 105 kg Trockengemisch und 18,8 kg Lösung verwendet. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,92. Der Rückprallanteil war mit 27,1 % geringer als beim Versuch SBV6A.

Tabelle 34: Spritzbetonrezepturvarianten 6A und 6B

Versuch		SBV6A	SBV6B
geplantes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,85	0,90
Zuschlag		Salz 0 – 8 mm	
Anteil Zuschlag	[Ma.%]	69,0	69,0
Anteil MgO	[Ma.%]	16,8	16,3
Anteil S30-Lösung	[Ma.%]	14,2	14,7
Verhältnis Zuschlag/MgO	[-]	4,12	4,23
ausgeführtes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,85	0,92
Verbrauch Trockengemisch	[kg]	90,0	105,0
Verbrauch S30-Lösung	[kg]	14,9	18,8
Rückprall (inklusive Verluste)	[%]	30,5	27,1

Auswertung Festigkeit SBV6

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV6A** wurden 6 Bohrkern ausgebohrt. An drei Prüfkörpern wurde nach 28 Tagen die einaxiale Druckfestigkeit und an vier Prüfkörpern die Spaltzugfestigkeit ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 6A sind in Tabelle 35 und in Tabelle 36 zusammengefasst.

Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit betrug nach 28 Tagen 27,4 MPa. Die mittlere Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen betrug 3,6 MPa. Die mittlere Dichte aller Proben betrug 1,85 g/cm³.

Tabelle 35: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV6A

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
6A-1	28	28,7	1,84
6A-2	28	27,5	1,85
6A-3	28	26,0	1,84

Tabelle 36: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV6A

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
6A-4	28	4,4	1,84
6A-5	28	2,9	1,85
6A-6	28	4,3	1,85
6A-7	28	2,8	1,85

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV6B** wurden 7 Bohrkern entnommen und an den Prüfkörpern dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und viermal die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 6B sind in Tabelle 37 und in Tabelle 38 zusammengefasst. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit betrug 31,3 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 4,2 MPa. Die mittlere Dichte aller Proben betrug 1,85 g/cm³.

Tabelle 37: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV6B

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
6B-1	28	28,7	1,84
6B-2	28	32,0	1,85
6B-3	28	33,3	1,85

Tabelle 38: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV6B

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
6B-4	28	4,7	1,85
6B-5	28	4,0	1,84
6B-6	28	4,0	1,85
6B-7	28	4,3	1,86

SBV7

Der **siebte Spritzbetonversuch (SBV7)** bestand aus 2 Teilversuchen mit jeweils einem Zuschlag aus einem Salz-Kies-Gemisch. Beim Teilversuch SBV7A bestand der Zuschlag zu 82% aus Quarzzuschlag mit einer Korngröße von 0,4 mm bis 8 mm und zu 18 % aus Salzzuschlag mit einer Korngröße von 0 mm bis 0,4 mm. Beim Teilversuch SBV7B bestand der Zuschlag zu 83% aus Salzzuschlag mit einer Korngröße von 0 mm bis 4 mm und zu 17 % aus Quarzzuschlag mit einer Korngröße von 4 mm bis 8 mm. Das Lösung/MgO-Verhältnis beider Teilversuche sollte jeweils bei 0,85 liegen.

Dabei wurden jeweils Spritzkästen mit einer Höhe von 40 cm, einer Breite von 35 cm und einer Tiefe von 25 cm gespritzt.

Beim Spritzen des Versuches SBV7A wurden 105 kg Trockengemisch und 17,9 kg Lösung verbraucht. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,88. Der Rückprallanteil (inklusive Verluste) betrug 34,0 %.

Für das Spritzen des Versuches SBV7B wurden 84 kg Trockengemisch und 16,7 kg Lösung verwendet. Das ausgeführte Lösung/MgO-Verhältnis betrug 1,06. Der Rückprallanteil war mit 34,5 % etwa genauso hoch wie beim Versuch SBV7A.

Tabelle 39: Spritzbetonrezepturvarianten 7A und 7B

Versuch		SBV7A	SBV7B
geplantes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,85	0,85
Zuschlag		Quarz: 0,4 - 8 mm Salz: 0 – 0,4 mm	Quarz: 4 - 8 mm Salz: 0 – 4 mm
Anteil Zuschlag	[Ma.%]	Quarz: 57,4 Salz: 12,6	Quarz: 12,3 Salz: 57,7
Anteil MgO	[Ma.%]	16,2	16,2
Anteil S30-Lösung	[Ma.%]	13,8	13,8
Verhältnis Zuschlag/MgO	[-]	4,32	4,32
ausgeführtes Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,88	1,06
Verbrauch Trockengemisch	[kg]	105,0	84,0
Verbrauch S30-Lösung	[kg]	17,9	16,7
Rückprall (inklusive Verluste)	[%]	34,0	34,5

Auswertung Festigkeit SBV7

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV7A** wurden acht Bohrkern entnommen. An drei Prüfkörpern wurde nach 28 Tagen die einaxiale Druckfestigkeit und an fünf Prüfkörpern die Spaltzugfestigkeit ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 7A sind in Tabelle 40 und in Tabelle 41 zusammengefasst.

Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit betrug nach 28 Tagen 51,6 MPa. Die mittlere Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen betrug 4,9 MPa. Die mittlere Dichte aller Proben betrug 2,13 g/cm³.

Tabelle 40: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV7A

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
7A-1	28	55,9	2,12
7A-2	28	44,4	2,12
7A-3	28	54,5	2,13

Tabelle 41: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV7A

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
7A-4	28	5,2	2,11
7A-5	28	5,7	2,16
7A-6*	28	6,3	2,07
7A-7	28	3,5	2,16
7A-8	28	3,7	2,16

* Anmerkung: Das Kernstück 7A-6 hat mit 6,3 MPa die höchste Spaltzugfestigkeit und mit 2,07 g/cm³ die geringste Dichte. Die Ursache für diesen Unterschied konnte nicht geklärt werden.

Aus dem Spritzkasten des **Teilversuches SBV7B** wurden acht Bohrkern entnommen und an den Prüfkörpern dreimal die einaxiale Druckfestigkeit und fünfmal die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Die Einzelwerte zum Teilversuch 7B sind in Tabelle 42 und in Tabelle 43 zusammengefasst.

Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit betrug 34,8 MPa und die mittlere Spaltzugfestigkeit 3,8 MPa. Die mittlere Dichte aller Proben betrug 1,91 g/cm³.

Tabelle 42: Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV7B

Kernstück	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
7B-1	28	37,6	1,90
7B-2	28	34,6	1,90
7B-3	28	32,2	1,90

Tabelle 43: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV7B

Kernstück	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
7B-4	28	4,3	1,89
7B-5	28	4,0	1,91
7B-6	28	3,8	1,91
7B-7	28	3,9	1,91
7B-8	28	3,0	1,92

6.4.3 Abschließende Betrachtungen zu den Technikumsversuchen

Im Laufe der Versuche wurden die "Peripherie der Anlage" (Durchflussmesser für den Lösungsverbrauch mit Messwertauswertung, angepasste Spritzkästen) verbessert, damit die Versuche präziser ausgewertet werden konnten.

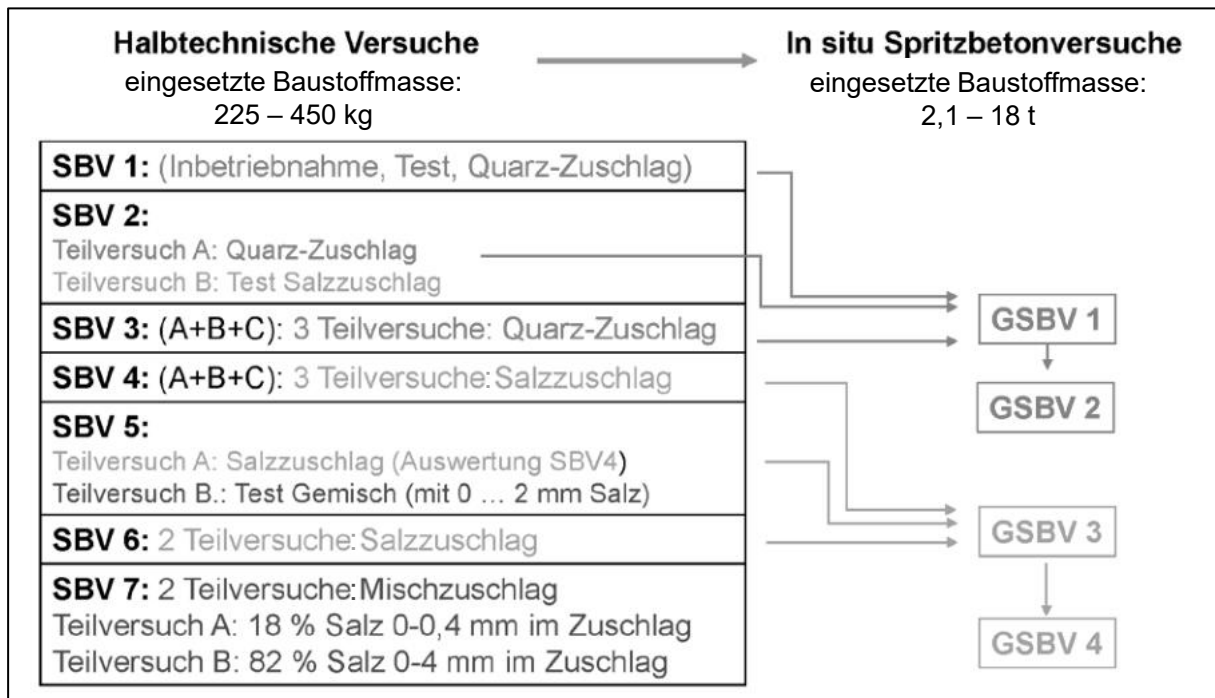


Abbildung 75: Schema zu den Spritzbetonversuchen im Technikum und in situ

Die Ergebnisse der halbtechnischen Spritzversuche können hinsichtlich der Robustheit der Rezeptur wie folgt zusammengefasst werden:

1. Während des Spritzens konnte das über den Massenstrom der Lösung voreingestellte geplante Massenverhältnis Lösung/MgO-Lieferware nicht exakt eingehalten werden, da an der Düse entsprechend der gewünschten Konsistenz nachgeregelt werden musste.
2. Die Referenzrezeptur GV2 mit dem STYROMAG-MgO (mit 4,4 % natürlichem Talkgehalt und < 0,5 % CaO), der S30-Lösung und dem silikatischen Zuschlag 0 - 8 mm konnte in mehreren Spritzbetonversuchen in ihrem Spritzverhalten reproduziert werden. Die Rezeptur verhält sich gegenüber Schwankungen der Spritzparameter robust. Das mittlere Verhältnis Lösung/MgO-Lieferware lag zwischen 0,63 und 0,91. Dies entspricht einer Schwankung des Massenverhältnisses Lösung/Trockengemisch zwischen 0,11 und 0,16. Aus dem angegebenen Bereich resultieren Unterschiede in der Endrezeptur bei dem MgO zwischen 15,20 % bis 15,87 %, bei der Lösung zwischen 10,0 % und 13,8 % und beim Zuschlag zwischen 71,0 % und 74,1 %. Dabei wird angenommen, dass das Trockengemisch eine konstante Zusammensetzung hat (Massenverhältnis Zuschlag/MgO-Bindemittel = 4,67 bzw. Zusammensetzung 17,6 % MgO + 82,4 % Zuschlag).
3. Mit Steinsalzzuschlag 0-8 mm (an Stelle des silikatischen Zuschlags) wurden Versuche mit unterschiedlichen Masseverhältnissen Zuschlag/MgO-LW (3,2 bis 4,2) und Lösung/MgO-LW (Mittelwert 0,57 bis 0,95) durchgeführt. Im Gegensatz zur Rezeptur mit silikatischem Zuschlag waren die Verluste (Rückprall) geringer und die "Klebrigkeit" besser. In den Versuchen SBV6A und SBV6B wurde eine Rezeptur mit einem Lösung/MgO-Verhältnis von etwa 0,8 bis 0,92 favorisiert und später in in situ Versuchen (GSBV) im großen Maßstab umgesetzt.
4. In drei Teilversuchen wurden Hybridzuschläge aus Salzgrus und Quarzzuschlag mit unterschiedlichen Anteilen untersucht. Die Salzfraktion war immer der feinere Anteil, die Sand- bzw. Kiesfraktion immer der grobkörnigere Anteil. Die Grenze zwischen

beiden Fraktionen war bei 0,4 mm, bei 2 mm oder bei 4 mm. Alle Gemischvarianten mit gemischtem Zuschlag konnten als Spitzbeton verarbeitet werden.

Eine wichtige Frage ist die Höhe des MgO-Überschusses im Binder und im Spritzbeton. Der Binder besteht aus dem Bindemittel (MgO-LW) und der Lösung. Die MgO-Lieferware besteht wiederum aus dem reinen MgO und den Nebenbestandteilen. Bei den Berechnungen muss deshalb der reine MgO-Gehalt (als Periklas) im Bindemittel berücksichtigt werden. Der MgO-Überschuss wird als Differenz aus dem vorliegenden MgO-Gehalt im Binder und dem MgO-Gehalt im Binder bei einem Molverhältnis $MgO/MgCl_2 = 5$ berechnet:

$$MgO\text{-Überschuss} = MgO_{\text{Binder}} - MgO_{\text{Binder}} \text{ (bei Molverhältnis } MgO/MgCl_2 = 5)$$

Der reine MgO-Gehalt im Binder errechnet sich wie folgt:

$$MgO_{\text{Binder}} = \frac{1}{1 + \frac{\text{Lösung}}{BM(MgO)}} \cdot x_{MgO}$$

Das hier angegebene Massenverhältnis Lösung/BM(MgO) ist das bereits erwähnte Massenverhältnis Lösung/MgO-LW. Es kann auch wie folgt berechnet werden:

$$\frac{\text{Lösung}}{BM(MgO)} = \frac{x_{MgO}}{MV \cdot G_{MgCl_2}} \cdot \frac{M_{MgCl_2}}{M_{MgO}}$$

x_{MgO}	Gehalt von Periklas im MgO-Produkt (Bindemittel)
MV	Molverhältnis MgO/MgCl ₂
G_{MgCl_2}	Gehalt an MgCl ₂ in der Lösung
M_{MgCl_2}	Molmasse MgCl ₂ (95,211 g/mol)
M_{MgO}	Molmasse MgO (40,304 g/mol)

Für $x_{MgO} = 0,794$ (79,4 % Periklas im Bindemittel) und $G_{MgCl_2} = 0,30$ (Lösung mit 30 % MgCl₂) erhält man die in Abbildung 76 dargestellte Abhängigkeit.

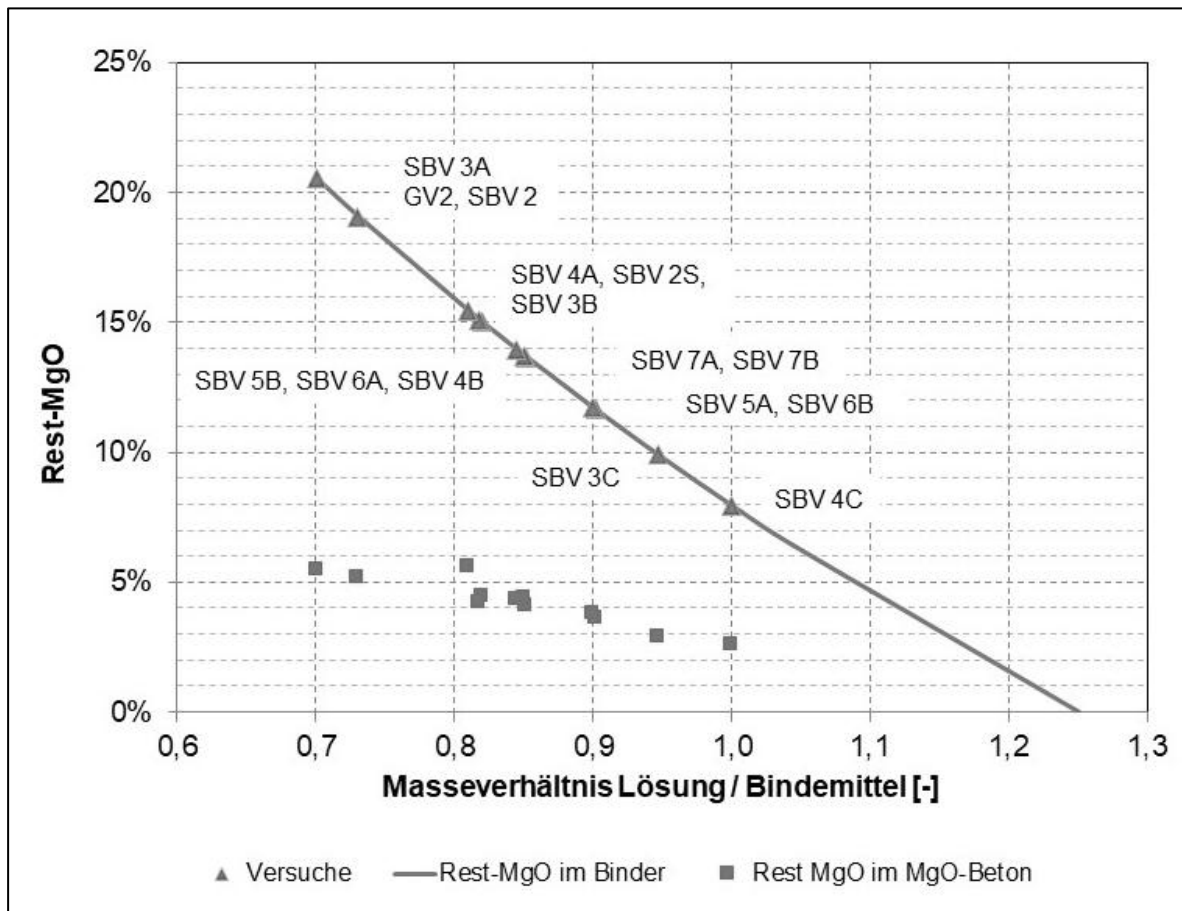


Abbildung 76: Abhängigkeit des MgO-Überschusses (Rest MgO) im Binder und im MgO-Beton

Die Berechnung des im Binder (Bindemittel + Lösung) und im MgO-Beton verbleibenden (nicht umgesetzten) reinen MgO ist komplex. Eingangsgrößen sind die Rezeptur (Masseverhältnis Lösung/MgO-LW, Masseverhältnis Zuschlag/MgO-LW), die Qualität des Bindemittels (Gehalt an reaktivem MgO im Bindemittel) und die Zusammensetzung der Lösung (MgCl₂-Gehalt). In der Praxis ist das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW nicht konstant, da an der Spritzdüse die Lösungszufuhr je nach erzielter Konsistenz manuell nachgeregelt wird. Alle anderen Parameter sind je nach Ansatz (Versuch) und Chargen der Einsatzmaterialien auch veränderlich, jedoch innerhalb eines Ansatzes konstant (konstante Zusammensetzung des Trockengemisches). Als Bezugspunkt wurden die stöchiometrischen Verhältnisse zur vollständigen Bildung der 5-1-8-Bindemittelphase gewählt (hier kein Rest-MgO).

Die in Abbildung 76 gezeigten Berechnungsergebnisse beziehen sich auf ein Bindemittel mit 79,4 % Periklas und einer Lösung mit 30 Ma.% MgCl₂. In diesem Fall erfolgt eine vollständige Umsetzung bei einem Masseverhältnis Lösung/MgO-LW von 1,25 (keine Rest MgO). In der Praxis wird mit einem Masseverhältnis Lösung/Bindemittel von 0,7 bis 1,0 gearbeitet. Bei einem angestrebten festen Masseverhältnis Lösung/MgO-LW ergibt sich durch "Nachregeln" des Düsenführers ein entsprechender Schwankungsbereich.

Zu "trockenes" Spritzen bewirkt höhere Gehalte an Rest-MgO (> 21 % im Binder). Zu "nasses" Spritzen würde erst bei einem Masseverhältnis Lösung/Bindemittel > 1,25 ein MgO-Defizit bewirken. Der Gehalt des Rest-MgO im Binder beträgt 7,95 % bei einem Verhältnis Lösung/Bindemittel = 1.

Im Beton wird der Gehalt des Rest-MgO neben dem Verhältnis Lösung/MgO-LW noch durch das Masseverhältnis Zuschlag/MgO-LW bzw. dem Zuschlaggehalt beeinflusst. Im Beton sind zwischen 2,6 % und 5,5 % Rest-MgO enthalten (im GV2-Spritzbeton 5,2 %). Somit kann das Verfahren als hinreichend robust bewertet werden. Die Gefahr eines MgO-Defizits besteht auch bei sehr "nassem" Spritzen nicht bzw. der Spritzbeton wäre dann zu flüssig.

6.5 In-situ-Test zur Variation der Rezepturbestandteile

6.5.1 Einleitung

Für die großtechnische Erprobung der im Labor und im Technikum getesteten Rezepturen wurden in situ in der Grube Teutschenthal vier Großspritzbetonversuche (GSBV) ausgeführt. Als Versuchsort wurde von der GTS eine Kammer im Steinsalz zur Verfügung gestellt. Die Versuchsorte haben Mitarbeiter von TS-Bau hergerichtet und die notwendige Technik aufgestellt. Als Düsenführer wurde ein im Umgang mit Spritzbeton erfahrener Mitarbeiter von TS-Bau eingesetzt. Das Spritzen erfolgte unter Berücksichtigung von [18].

Zum Einsatz kam bei den in situ Versuchen GSBV1, GSBV2 und GSBV3 eine Spritzbetonmaschine mit Rotorkammerprinzip (Aliva 237 der Firma Sika) von TS-Bau. Beim GSBV4 wurde die Spritzbetonmaschine mit dem Taschenradprinzip (WM-14 FU der Firma Werner Mader) der TU Freiberg verwendet.

Für den GSBV1 und GSBV2 wurde Quarzzuschlag, für den GSBV3 und GSBV4 wurde Salzzuschlag verwendet. Die Korngröße aller Zuschläge lag zwischen 0 mm bis 8 mm.

Bei den Versuchen GSBV1, GSBV3 und GSBV4 wurde ein Spritzbetonvolumen von 1,5 m Breite, 3,0 bis 3,2 m Höhe und eine Tiefe von ca. 1 m gespritzt. Der GSBV2 wurde kleiner ausgeführt und hatte Abmessungen von 0,8 m Breite, 1,2 m Höhe und 0,6 m Tiefe. Bei allen Spritzbetonversuchen wurde der gesamte Rückprall gesammelt und gewogen, um den Rückprallanteil je Schicht zu bestimmen.

In die Spritzkörper der Großspritzbetonversuche, außer GSBV2, wurden an diversen Positionen an der jeweiligen Spitzbetonschichtunterseite und in der Schichtmitte Thermolemente verbaut, die die Temperatur des Betons beim Abbinden und Abkühlen aufzeichneten. Weiterhin wurde bei allen Versuchen in einem Raster über die gesamte Spritzfläche die Mächtigkeit aller Schichten gemessen.

Nach jeder Schicht wurde die Frühfestigkeit des Spritzbetons bestimmt. Dazu wurde an Messpunkten über die gesamte Fläche in regelmäßigen Abständen der Eindringwiderstand mit einem Penetrometer bestimmt, aus dem sich die Druckfestigkeit zu diesem Zeitpunkt errechnet.

Durch die Spritzbetonkörper wurden zahlreiche Kernbohrungen abgeteufelt, um die Festigkeit (einaxiale Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, direkte Zugfestigkeit) zu verschiedenen Abbindezeitpunkten (3 bis 28 Tage) zu bestimmen. Alle Bohrungen wurden durch die TUBAF mit einem Durchmesser von 105 mm gebohrt, sodass die Bohrerkerne einen Durchmesser von 100 mm hatten. Bei allen Kernbohrungen wurde Luft zur Spülung verwendet.

In ausgewählten Bohrlöchern wurde in situ die Permeabilität mit Gas und Lösung gemessen. Zudem wurde bei den Versuchen GSBV1, GSBV3 und GSBV4 eine Messfläche für Ultraschalluntersuchungen der BAM vorgesehen, um mögliche Fehlstellen oder Risse zu detektieren.

In Tabelle 44 sind einige Kenndaten zu den Großspritzbetonversuchen zusammengestellt.

Tabelle 44: Überblick zu den GSBV1 bis GSBV4

	GSBV1	GSBV2	GSBV3	GSBV4
Zuschlag (0 – 8 mm)	Quarz	Quarz	Salz	Salz
Abmessungen (B x H x T)	1,5 m x 3,2 m x 1,05 m	0,8 m x 1,2 m x 0,63 m	1,5 m x 3,2 m x 0,92 m	1,5 m x 3,2 m x 0,95 m
Anzahl Thermolemente	37	-	46	89
Anzahl Bohrungen	36	17	45	35

6.5.2 Großspritzbetonversuch 1 (GSBV1)

6.5.2.1 Einleitung

Im ersten Großspritzbetonversuch (GSBV1) sollte die GV2-Rezeptur, angepasst an die aktuell verfügbaren Bestandteile (MgO, Lösung), wiederholt werden. Außerdem sollte die Spritzschichtmächtigkeit gegenüber dem GV2 erhöht werden. Während beim GV2 die Schichten im Mittel 9,9 m dick waren, sollten jetzt 15 cm bis 20 cm erreicht werden. Der Spritzbetonkörper sollte eine Gesamtmächtigkeit von ca. 1 m aufweisen, sodass sechs Spritzschichten vorgesehen wurden. Für den GSBV1 wurde folgende Rezeptur geplant:

MgO	M.-%	15,6
S30-Lösung	M.-%	11,4
Sand/Kies-Zuschlag (0 - 8 mm)	M.-%	73,0
Verhältnis Zuschlag/MgO	-	4,68
Verhältnis Lösung/MgO	-	0,73

Das MgO wurde in Säcken á 25 kg geliefert. Um das Zuschlag/MgO-Verhältnis einfach einhalten zu können, wurde der Zuschlag in Big Bags á 350 kg bestellt, sodass drei Säcke MgO und ein Big Bag Zuschlag für einen Mischeransatz Trockengemisch notwendig waren. Das Gewicht des Zuschlags in den Big Bags wurde vor Ort geprüft.

Es wurde dieselbe Spritzmaschine verwendet wie bei der Erstellung des GV2 im Jahr 2008. Dies war eine Rotorkammermaschine der Firma Sika. In Abbildung 77 ist der Aufbau mit Zwangsmischer, in dem der Zuschlag und das MgO zunächst vorgemischt wurden, die Förderschnecke, mit der das Trockengemisch vom Mischer in die Spritzmaschine transportiert wurde, und die Spritzmaschine am Versuchsort zu sehen.



Abbildung 77: Aufbau zur Spritzmaschine

Der Spritzbeton wurde auf den Salzstoß aufgespritzt. Als seitliche Begrenzungen wurden Wände aus Schalungsholz in einem Abstand von 1,5 m aufgestellt. Die Firsthöhe betrug an der Versuchsfläche 3,0...3,2 m, was auch der Höhe des späteren Spritzbetonkörpers entspricht. Für einen ebenen Untergrund wurde die Sohle mit Beton ausgegossen und eine Metallplatte in der Sohle ausgelegt. Der Salzstoß an der Rückseite wurde nicht nachbehandelt und wies die Rauigkeit nach der Bearbeitung mit der Teilschnittmaschine auf. In Abbildung 78 ist die vorbereitete Versuchsfläche dargestellt.

Um die Abbinde temperatur jeder Schicht messen zu können, wurden an vier Positionen Thermoelemente (TE) eingebaut. Die Geber befanden sich jeweils in der Mitte der Spritzfläche 0,75 m vom Rand und in vier verschiedenen Höhen: bei 1,5 m Höhe (Position A), bei 2,0 m Höhe (Position B), bei 2,5 m Höhe (Position C) und an der Firste bei 3,0 m bis 3,2 m Höhe (Position D). Die Thermoelemente wurden jeweils vor dem Spritzen der nächsten Schicht angebracht (Abbildung 79). Dazu wurden jeweils Stäbe horizontal in vorgebohrte Löcher in das Salz gesetzt, an denen die Thermoelemente in der Schichtmitte der nächsten Schicht angebracht wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Messspitze des Thermoelementes wenige Zentimeter Abstand zum Stab hat und vollständig mit Spritzbeton eingespritzt wurde. Die insgesamt 37 verbauten Thermoelemente wurden an eine Messanlage angeschlossen, die während der Spritzarbeiten im 5-Minuten-Intervall und während längerer Pausen (über das Wochenende) im 10-Minuten-Intervall Messdaten aufgezeichnet hat.

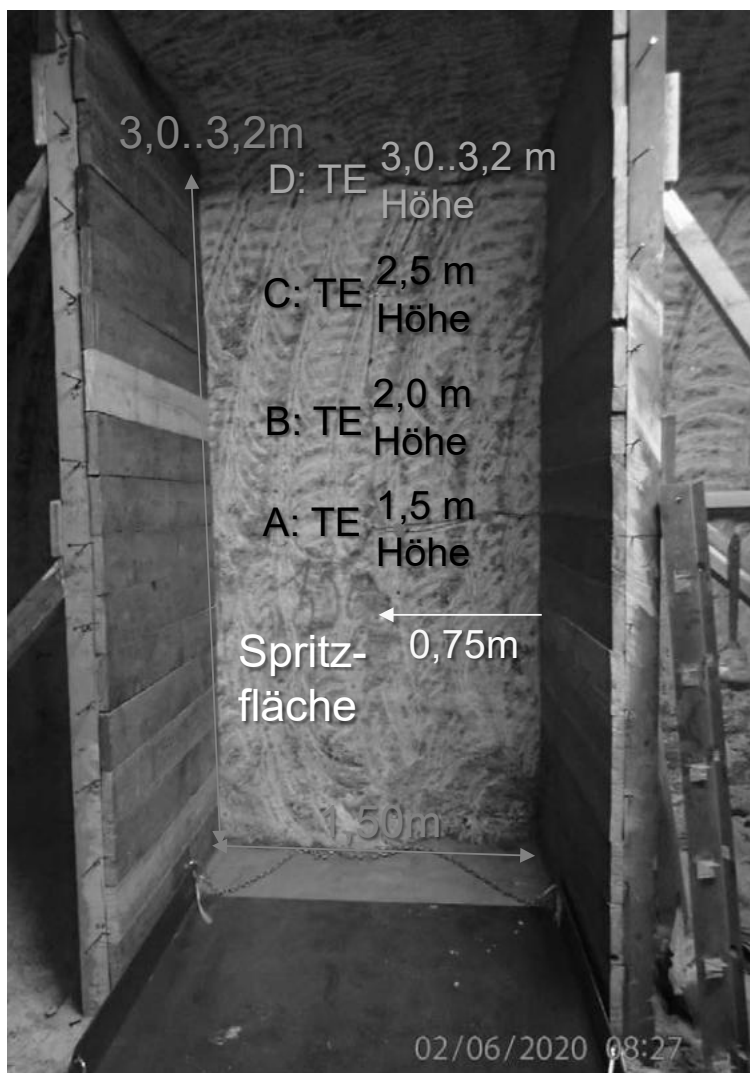


Abbildung 78: vorbereitete Spritzfläche mit seitlichen Begrenzungen aus Holz und den Positionen der Thermoelemente (TE) beim GSBV1



Abbildung 79: Positionierung der Thermoelemente

6.5.2.2 Der Spritzprozess

Mit dem Spritzen der *Schicht 1* wurde am 02.06.2020 begonnen. Die geplante Schichtmächtigkeit betrug 10 cm, sodass die Thermoelemente dementsprechend bei 5 cm Abstand zum Untergrund angebracht wurden. Aufgrund weiterer Vorbereitungs- und Einrichtungsarbeiten wurde erst spät mit dem Spritzen begonnen, sodass die erste Spritzschicht nur eine Mächtigkeit von im Mittel 5,3 cm hatte. Bei der geringen Mächtigkeit waren die Thermoelemente in der geplanten Schichtmitte kaum bedeckt und dienten für die Schicht 2 als Geber für die Untergrundtemperatur. Entsprechend der kurzen Spritzzeit wurde nur ein geringer Anteil an Zuschlag, MgO-Lieferware und Lösung verbraucht. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW der ersten Schicht betrug 0,754. Insgesamt wurden 1084 kg Beton verspritzt, 42,3 % davon waren Rückprall. Aufgrund der ebenen Salzfläche ist dieser Wert vergleichsweise hoch.

Die *Schicht 2* wurde am 03.06.2020 gespritzt. Die geplante Schichtmächtigkeit betrug 10 cm, sodass die Thermoelemente dementsprechend bei 5 cm Abstand zum Untergrund angebracht wurden. Es wurde hierbei eine Schichtmächtigkeit von im Mittel 21,7 cm gespritzt. Es hat sich gezeigt, dass solch hohe Spritzmächtigkeiten problemlos möglich sind. Allerdings waren die zuvor eingebauten Thermoelemente nicht mittig in der Schicht positioniert, sodass für die zentrumsnahe Geberposition in 1,5 m Höhe (Position A) ein weiterer Geber in den gespritzten Beton gesteckt wurde, um die maximale Temperatur in der Schichtmitte messen zu können. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW lag bei 0,984. Während der Spritzdauer von knapp 3,5 Stunden wurden 3.630 kg Beton verbraucht. Der Rückprallanteil betrug 34,1 %.

Die *Schicht 3* wurde am 04.06.2020 gespritzt. Es sollte nochmals eine Schichtmächtigkeit von ca. 20 cm wiederholt werden. In der dritten Schicht wurden nur 2 Thermoelemente in der Schichtmitte bei 1,5 m Höhe (Position A) und an der Firste (Position D) in einem Abstand zum Untergrund von 10 cm eingebaut. Die tatsächlich gespritzte Schichtmächtigkeit betrug im Mittel 23,5 cm. Für diese Schicht wurden 4.074 kg Beton gespritzt, davon waren 28,3 % Rückprall. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW der dritten Schicht betrug 0,867.

Die *Schicht 4* wurde nach mehrtägiger Pause am 08.06.2020 gespritzt. Die Schichtmächtigkeit betrug, wie geplant, 12,1 cm. Es wurden knapp 2.400 kg Beton verspritzt, davon entfielen 30,9 % auf den Rückprall. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW betrug 0,759.

Die *Schicht 5* wurde am 09.06.2020 gespritzt. Die Schichtmächtigkeit sollte wieder etwa 12 cm betragen. Es wurden knapp 2000 kg Beton gespritzt, 31,5 % davon waren Rückprall. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW der fünften Schicht betrug 0,887.

Die *Schicht 6* wurde nach mehrtägiger Pause am 15.06.2020 gespritzt. Hier wurde eine Schichtmächtigkeit von 25 cm angestrebt. Die Thermoelemente wurden dementsprechend bei einem Abstand von 12,5 cm zum Untergrund angebracht. Nach Fertigstellung der Schicht wurden oberflächlich vier Thermoelemente angebracht, die die Oberflächentemperatur des abbindenden Spritzbetons gemessen haben. Die tatsächlich gespritzte Mächtigkeit betrug im Mittel 29,9 cm, was problemlos umzusetzen war. Für diese Schicht wurden knapp 4.800 kg Beton verspritzt, wovon 29,6 % Rückprall war. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW betrug 0,931.

Tabelle 45: Kenndaten der 6 Spritzschichten des GSBV1

Schicht	1	2	3	4	5	6
Datum	02.06. 2020	03.06. 2020	04.06. 2020	08.06. 2020	09.06. 2020	15.06. 2020
Mittlere Schichtmächtigkeit [cm]	5,3	21,7	23,5	12,1	12,7	29,9
Spritzbeton [kg]	1084,0	3629,9	4073,9	2398,0	1993,9	4798,8
Zuschlag [kg]	789,0	2551,4	2910,3	1741,0	1413,1	3372,4
MgO [kg]	168,1	543,5	623,3	373,5	307,7	738,9
Lösung [kg]	126,9	535,0	540,3	283,5	273,1	687,5
Verhältnis Lösung/ MgO [-]	0,754	0,984	0,867	0,759	0,887	0,931
Rückprall [kg]	459	1236	1154	740	628	1420
Rückprall [%]	42,3	34,1	28,3	30,9	31,5	29,6

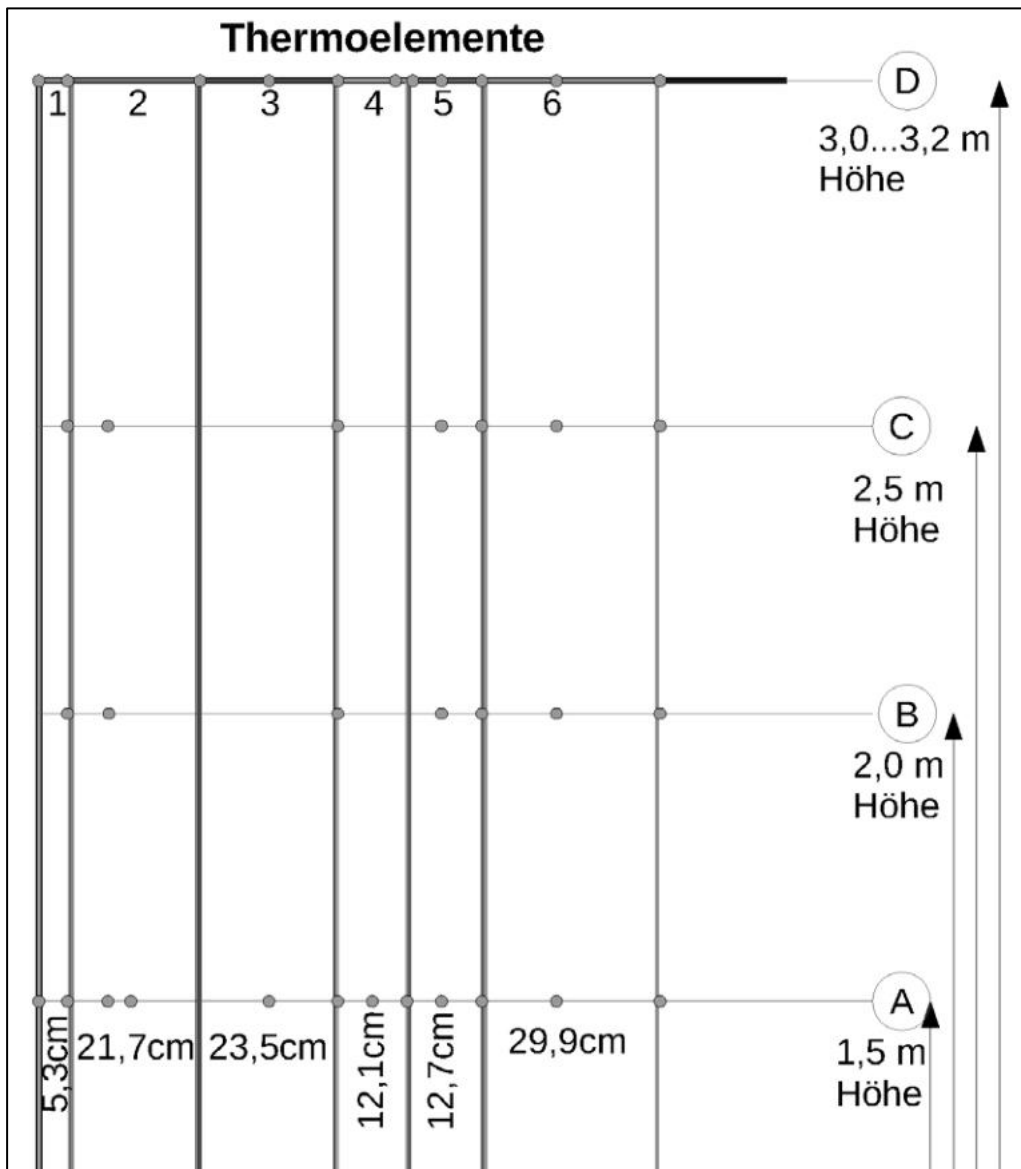


Abbildung 80: schematische Seitenansicht des GSBV1 mit Position der Thermolemente

Für die Bewertung des **Rückpralls** wurde geprüft, ob sich die Kornverteilungskurve des reinen Zuschlags von dem Zuschlag im Rückprall unterscheidet, da vermutet wurde, dass vor allem grobe Körner im Rückprall enthalten sind und sich damit die Kornverteilung des haftenden Zuschlages von der Kornverteilung des zugegebenen Zuschlags unterscheidet. Beim Aufprall des Spritzstrahls an der Wand haften eventuell die größeren, schweren Körner aufgrund ihres Eigengewichtes schlechter an der Wand als die kleineren, leichteren Quarzkörner. Beim GSBV1 wurden daher drei Proben (je 4 kg bis 6 kg) aus drei verschiedenen Schichten des Rückpralls entnommen und das MgO und die Salzlösung ausgewaschen. Der rückgewonnene Zuschlag wurde anschließend getrocknet und gesiebt.

In Abbildung 81 sind im Vergleich die Kornverteilungskurven des gelieferten Maxit-Zuschlags (in blau) und die Sieblinien der drei Rückprallproben dargestellt. Alle drei Rückprallproben haben praktisch die gleiche Sieblinie. Der Zuschlag im Rückprall ist dabei nur geringfügig gröber als die Lieferware. Die Differenz bei 1 mm Siebdurchgang beträgt maximal 10 %. Die geringfügige Veränderung der Kornverteilung des haftenden Zuschlags durch den Spritzprozess mit dem Rückprall wurde in Kauf genommen. Die Rezeptur wurde nicht weiter angepasst.

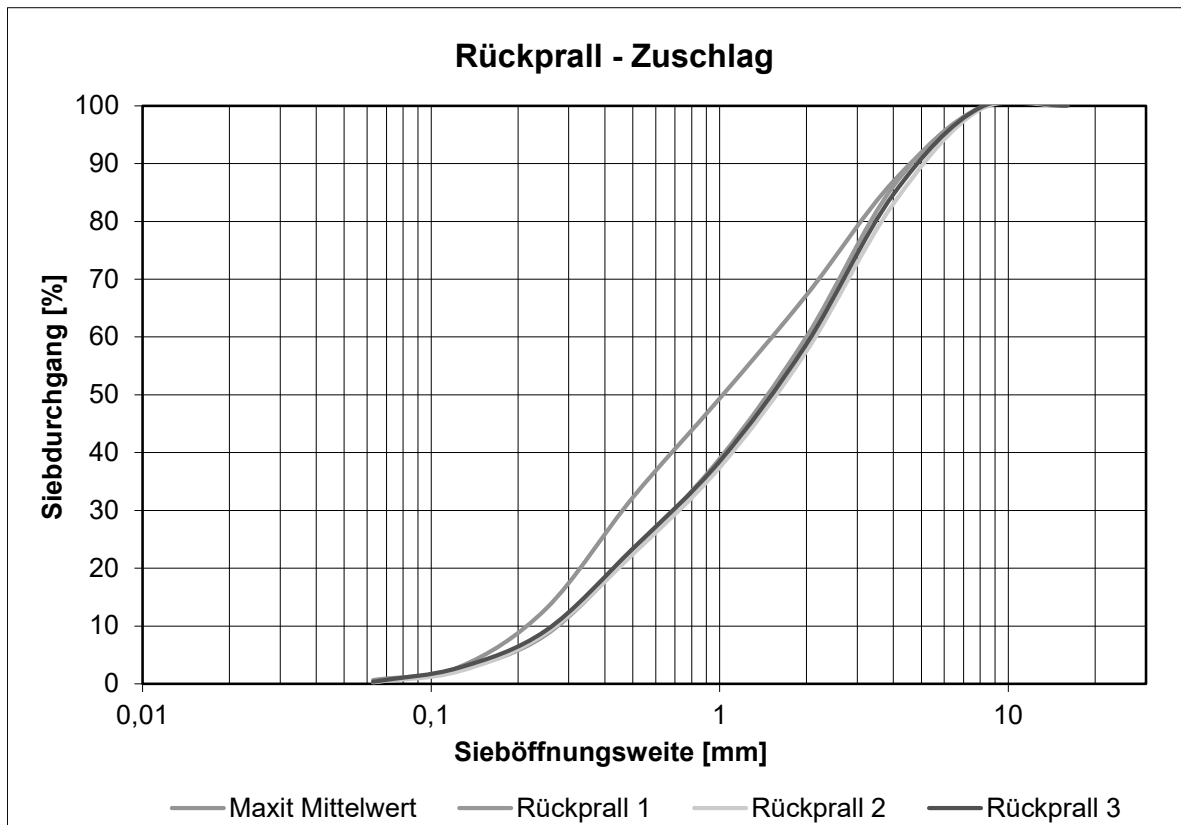


Abbildung 81: Kornverteilungskurven des Zuschlags aus der Lieferware und aus dem Rückprall

6.5.2.3 Auswertung Bohrkerne

Aus dem Spritzbetonkörper des GSBV1 wurden insgesamt 36 Bohrkerne mit 19,5 Bohrmetern entnommen. Die Lage der einzelnen Bohransatzpunkte ist in Abbildung 82 zu sehen. Mit dem Bohren wurde bereits einen Tag nach Spritzende der letzten Schicht begonnen, um die Kerne für die Festigkeit 3 Tage nach dem Spritzen zu prüfen.

In der Abbildung 82 ist außerdem das Messfeld der BAM für die Ultraschalluntersuchungen enthalten. Die Bohrung innerhalb dieser Fläche (B36) wurde erst nach der Ultraschallprüfung ausgeführt.

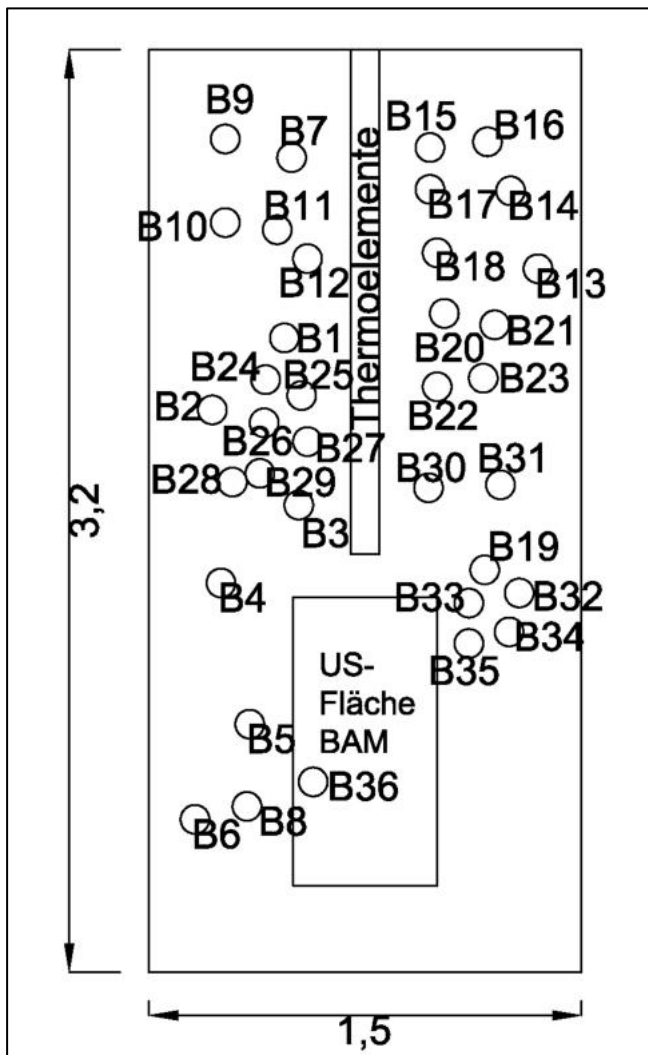


Abbildung 82: Spritzbetonfläche des GSBV1 mit den Kernbohrungen

In Abbildung 83 bis Abbildung 85 sind beispielhaft drei Bohrkern dargestellt. Diese waren optisch von guter Qualität. An einigen der Kernstücke sind die Betonierabschnittsgrenzen (BAG) anhand von Farbunterschieden erkennbar. An den BAG ist der Beton dunkler. An dem Kern der Bohrung B35 (Abbildung 85) sind die BAG, insbesondere zwischen der Schicht 3 und 4 bei 54 cm Kernlänge, gut sichtbar.

Die BAG scheinen hier keine Schwächezonen zu sein, da die Kerne bei Bohren und Herauslösen nicht an den BAG gebrochen sind. Der Verbund zwischen den einzelnen Schichten ist daher als sehr gut zu bewerten. Die Kerne müssen technisch bedingt gebrochen werden, da die Bohrkronen ca. 40 cm lang waren und die Kerne dementsprechend eine maximale Länge von 35 cm bis 40 cm haben.



Abbildung 83: Bohrkern der Bohrung B14 aus dem GSBV1



Abbildung 84: Bohrkern der Bohrung B17 aus dem GSBV1



Abbildung 85: Bohrkern der Bohrung B35 aus dem GSBV1

Einige der Bohrkern waren optisch nicht zufriedenstellend, da an einigen Kernen Lunker, Risse, poröse oder scheinbar trockene Stellen vorhanden waren (siehe Abbildung 86 bis Abbildung 90).

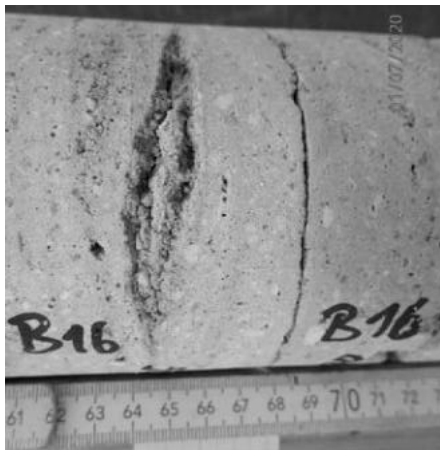


Abbildung 86: Lunker am Kern der B16

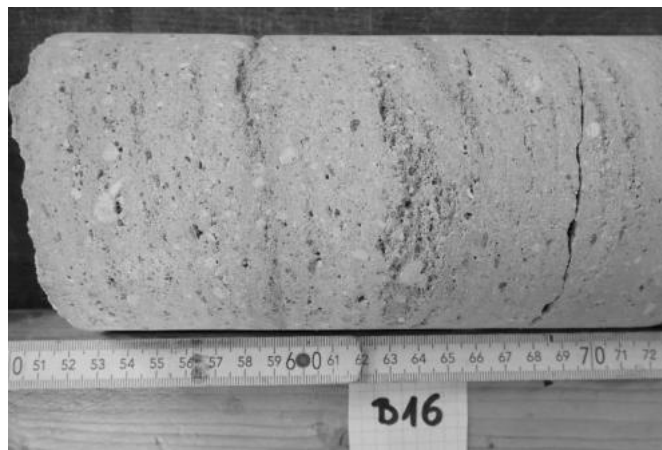


Abbildung 87: poröser Bereich am Kern der B16



Abbildung 88: Riss am Kern der B2



Abbildung 89: Riss am Kern der B18



Abbildung 90: trockener Bereich an einer Bruchfläche der B8

6.5.2.4 Auswertung Festigkeit

Frühfestigkeit

Um die Festigkeitsentwicklung von jungem Spritzbeton zu bewerten, wurde ein Penetrometer nach DIN EN 14488-2 [17] verwendet. Mit dem Penetrometer wurde der Eindringwiderstand des Frischbetons gemessen, aus dem sich über eine gerätespezifische Umrechnung die Druckfestigkeit berechnen lässt. Nach 20 Minuten bis 4 Stunden nach Spritzende wurden je Zeitpunkt 10 Einzelwerte (Widerstandskraft des Eindringens) über die gesamte Spritzfläche genommen und gemittelt. Anschließend wurde der Eindringwiderstand in eine Druckfestigkeit umgerechnet. In Abbildung 91 ist die Entwicklung der Frühfestigkeit je Schicht dargestellt. Für die erste Schicht konnte die Frühfestigkeit aufgrund der geringen Schichtmächtigkeit nicht gemessen werden.

Bei allen Schichten lag die Frühfestigkeit nach 20 Minuten zwischen 0,06 MPa und 0,1 MPa. Nach 2 Stunden stieg die Festigkeit moderat auf 0,1 MPa bis 0,14 MPa. Die Festigkeit der Schichten 3 und 5 stieg danach stärker als bei den anderen Schichten. Die Festigkeit betrug nach 3,5 bzw. 4 Stunden 0,29 MPa bzw. 0,27 MPa. Bei den Schichten 4 und 6 war die Festigkeit nach 4 Stunden mit 0,17 MPa deutlich geringer. Die schnellere Festigkeitszunahme der Schichten 3 und 5 ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die unterliegende Schicht am Vortag gespritzt wurde und der Untergrund somit noch warm war.

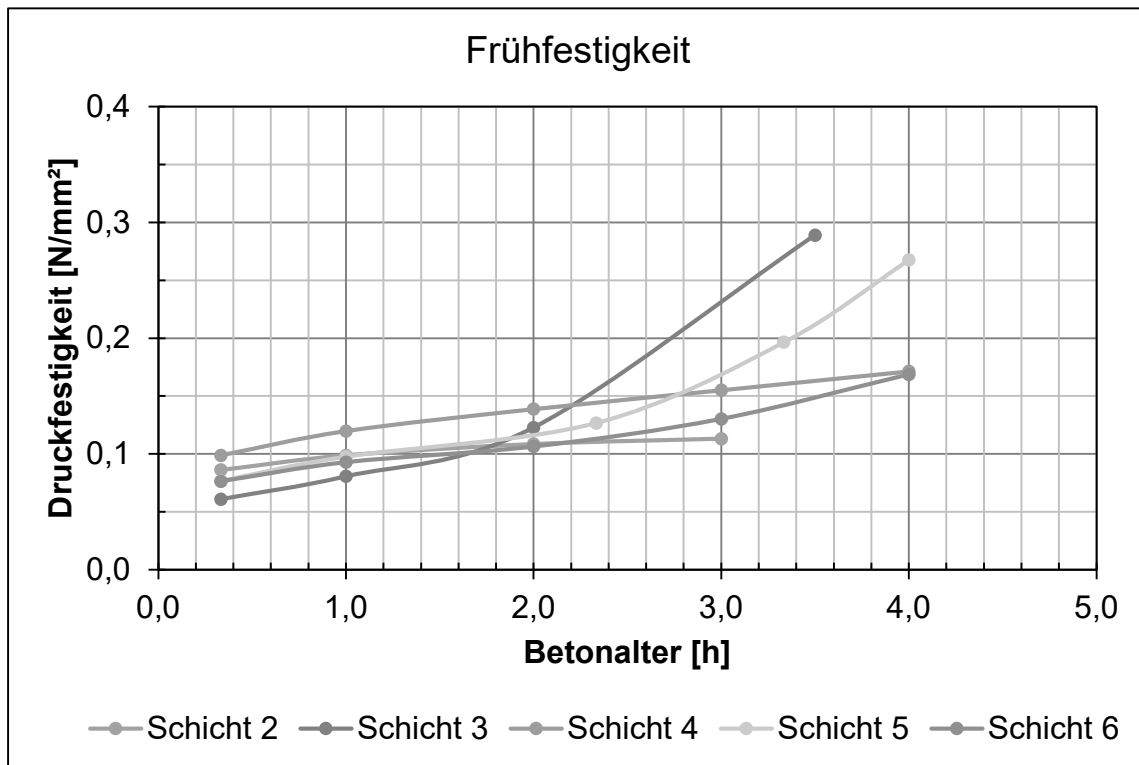


Abbildung 91: Frühfestigkeit der Schichten 2 bis 6 beim GSBV1

Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde an Kernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 20 cm nach 3 Tagen, 9 bzw. 10 Tagen, 16 bzw. 17 Tagen und 28 bzw. 29 Tagen bestimmt. Die abgedrückten Proben stammen aus verschiedenen Schichten. In Tabelle 46 sind die Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit enthalten. In Tabelle 47 sind jeweils Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung der einaxialen Druckfestigkeit je Prüfalter zusammengefasst.

Nach 3 Tagen betrug die einaxiale Druckfestigkeit bereits 30,6 MPa, nach 9 bzw. 10 Tagen stieg sie auf 34,7 MPa an, nach 16 bzw. 17 Tagen stieg sie nochmals gering auf 37,1 MPa. Nach 28 bzw. 29 Tagen lag die einaxiale Druckfestigkeit bei 37,0 MPa. Es ist auffällig, dass zu allen Prüfaltern der Minimalwert bei etwa 25 MPa lag und der Maximalwert mit zunehmendem Alter von 33,2 MPa nach 3 Tagen auf 49,5 MPa nach 28 Tagen anstieg. Die Streubreite der Einzelwerte ist noch relativ hoch. Dies liegt einerseits daran, dass auch Proben aus den langsamer abbindenden Schichten 4 und 5 enthalten sind, andererseits liegt es an der noch zu großen Inhomogenität der einzelnen Bohrkerne bzw. des gesamten Spritzbetonkörpers.

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper lag zwischen 2,13 g/cm³ und 2,22 g/cm³ und im Mittel bei 2,17 g/cm³.

In Abbildung 92 ist die einaxiale Druckfestigkeit über die Tiefe für alle Proben bzw. alle Prüfalter dargestellt.

In Abbildung 93 ist die einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Prüfalters dargestellt.

Tabelle 46: Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV1

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B1-1	6	11,5	3	31,5	2,17
B5-1	6	14,1	3	33,2	2,14
B6-1	6	12,2	3	27,2	2,15
B13-1	6	17,3	10	36,7	2,16
B14-1	6	20,2	10	38,1	2,17
B15-1	6	16,2	10	35,6	2,15
B19-1	6	14,0	17	27,8	2,14
B20-1	6	17,3	17	39,0	2,17
B21-1	6	15,5	17	35,1	2,19
B23-1	6	11,9	28	30,7	2,16
B27-1	6	14,2	28	31,3	2,19
B28-1	6	11,2	28	41,8	2,20
B32-1	6	14,9	28	24,5	2,13
B33-2	5/6	26,1	29	24,5	2,14
B1-2	4/5	41,2	9	37,1	2,17
B2-2	4/5	44,0	9	24,7	2,15
B4-2	4/5	43,6	9	36,2	2,17
B12-2	4/5	44,5	16	45,9	2,17
B13-2	4/5	45,3	16	39,7	2,17
B14-2	4/5	46,5	16	39,0	2,16
B15-2	4/5	43,0	16	33,6	2,16
B26-1	4/5	45,7	29	39,8	2,16
B27-2	4/5	46,1	29	41,0	2,15
B30-1	4/5	43,6	29	33,1	2,16
B32-2	4/5	40,9	29	32,6	2,14
B17-4	2/3	87,7	28	46,8	2,21
B16-3	2/3	88,0	28	48,9	2,22
B15-3	2/3	84,7	28	49,5	2,20

Tabelle 47: Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV1

Nach ... Tagen	3	9/10	16/17	28/29
Minimalwert [MPa]	27,2	24,7	27,8	24,5
Maximalwert [MPa]	33,2	38,1	45,9	49,5
Gemittelte Festigkeit [MPa]	30,63	34,73	37,16	37,04
Standardabweichung [MPa]	2,52	4,55	5,27	8,47
Anzahl Einzelwerte [-]	3	6	7	12

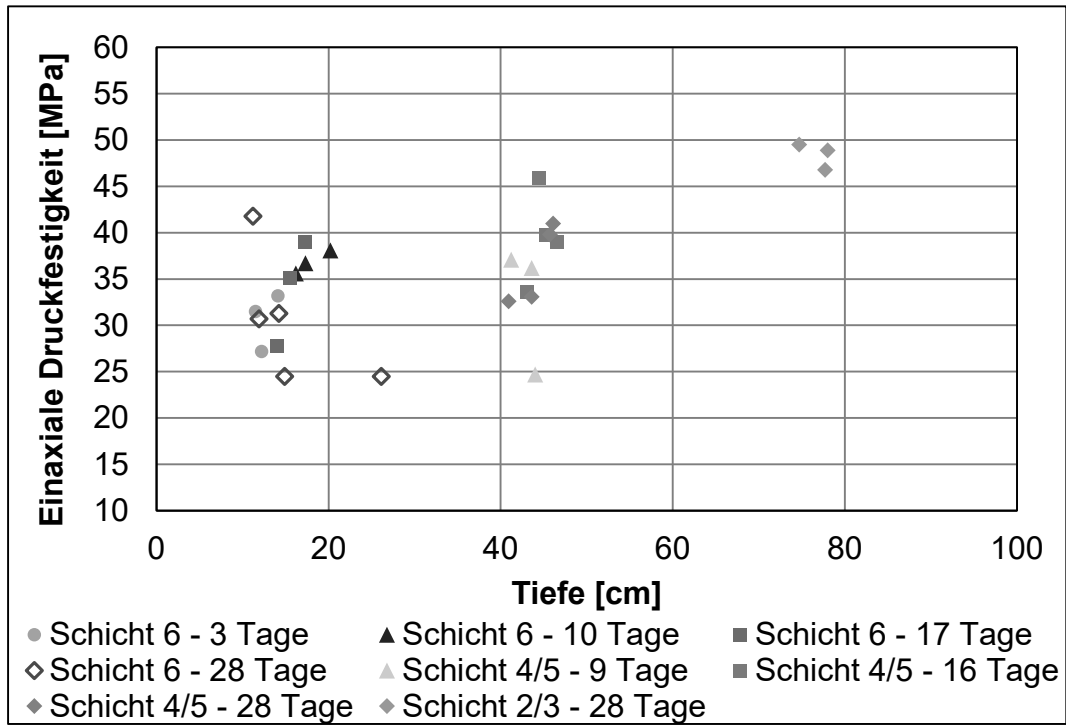


Abbildung 92: einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV1 über die Tiefe

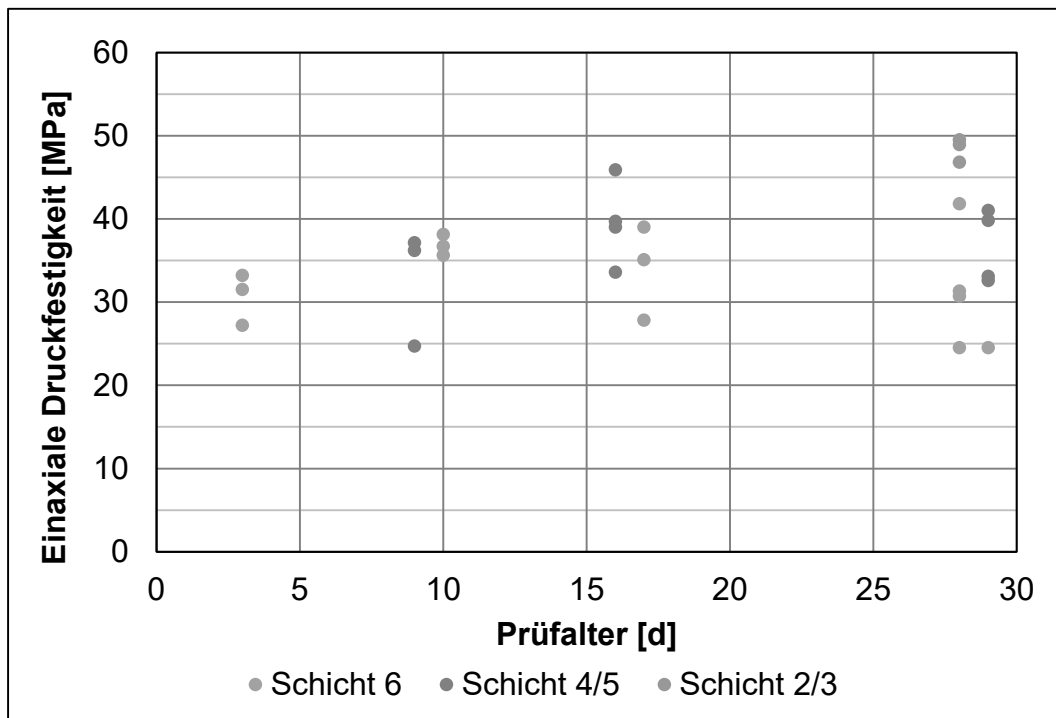


Abbildung 93: einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV1 in Abhängigkeit des Prüfalters

Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 10 cm nach 3 Tagen, 8 bis 10 Tagen, 14 bzw. 17 Tagen und 28 bzw. 29 Tagen bestimmt. In Tabelle 48 sind die Einzelwerte zur Spaltzugfestigkeit enthalten. In Tabelle 49 sind jeweils Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung der Spaltzugfestigkeit je Prüfalter zusammengefasst.

Nach 3 Tagen betrug die Spaltzugfestigkeit bereits 10,8 MPa, nach 8 bis 10 Tagen sank sie auf 6,8 MPa, nach 14 bzw. 17 Tagen lag sie im Mittel bei 6,5 MPa. Nach 28 bzw. 29 Tagen lag die Spaltzugfestigkeit bei 6,8 MPa.

Ähnlich zu der einaxialen Druckfestigkeit war auch bei der Spaltzugfestigkeit die Streuung zwischen Minimum und Maximum hoch. Auch hier zeigte sich die Inhomogenität der einzelnen Bohrkerns bzw. des gesamten Spritzbetonkörpers.

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper lag zwischen 2,11 g/cm³ und 2,23 g/cm³ und im Mittel bei 2,17 g/cm³.

In Abbildung 94 ist die Spaltzugfestigkeit über die Tiefe für alle Proben bzw. alle Prüfalter dargestellt.

In Abbildung 95 ist die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit des Prüfalters dargestellt.

Tabelle 48: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV1

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B2-1	6	10,8	3	11,6	2,17
B3-1	6	7,0	3	8,0	2,19
B3-2	6	28,0	3	14,0	2,17
B4-1	6	7,3	3	9,5	2,18
B7-1	6	12,8	8	7,9	2,17
B8-1	6	12,5	8	7,2	2,15
B14-0	6	5,8	10	6,1	2,14
B16-1	6	10,0	17	7,9	2,17
B16-2	6	20,2	17	7,1	2,15
B17-1	6	7,0	17	6,5	2,16
B17-2	6	18,6	17	6,3	2,14
B18-1	6	19,2	17	8,0	2,18
B24-1	6	20,5	28	5,7	2,14
B31-1	6	5,7	28	7,3	2,16
B31-2	6	21,7	28	8,4	2,19
B33-1	6	6,8	28	7,0	2,12
B18-2	3/4	78,8	28	7,9	2,21
B18-3	2/3	93,5	28	7,0	2,23
B17-3	4/5	64,2	28	6,1	2,16
B15-4	4/5	62,4	28	8,0	2,20
B22-1	4/5	40,4	29	4,4	2,13
B22-2	4/5	50,7	29	6,7	2,17
B23-2	4/5	52,8	29	7,2	2,18
B25-1	4/5	51,5	29	7,2	2,15
B28-2	4/5	48,2	29	8,2	2,19
B33-3	4/5	45,4	29	4,7	2,19
B3-3	4/5	38,5	9	6,1	2,14
B3-4	4/5	49,0	9	6,7	2,16
B6-2	4/5	43,5	14	5,7	2,15
B7-2	4/5	39,0	14	4,8	2,11
B8-2	5/6	33,0	14	5,9	2,17

Tabelle 49: Spaltzugfestigkeit an Kernen des GSBV1

Nach ... Tagen	3	8-10	14/17	28/29
Minimalwert [MPa]	8,0	6,1	4,8	4,4
Maximalwert [MPa]	14,0	7,9	8,0	8,4
Gemittelte Festigkeit [MPa]	10,78	6,80	6,53	6,84
Standardabweichung [MPa]	2,26	0,69	1,03	1,19
Anzahl Einzelwerte [-]	4	5	8	14

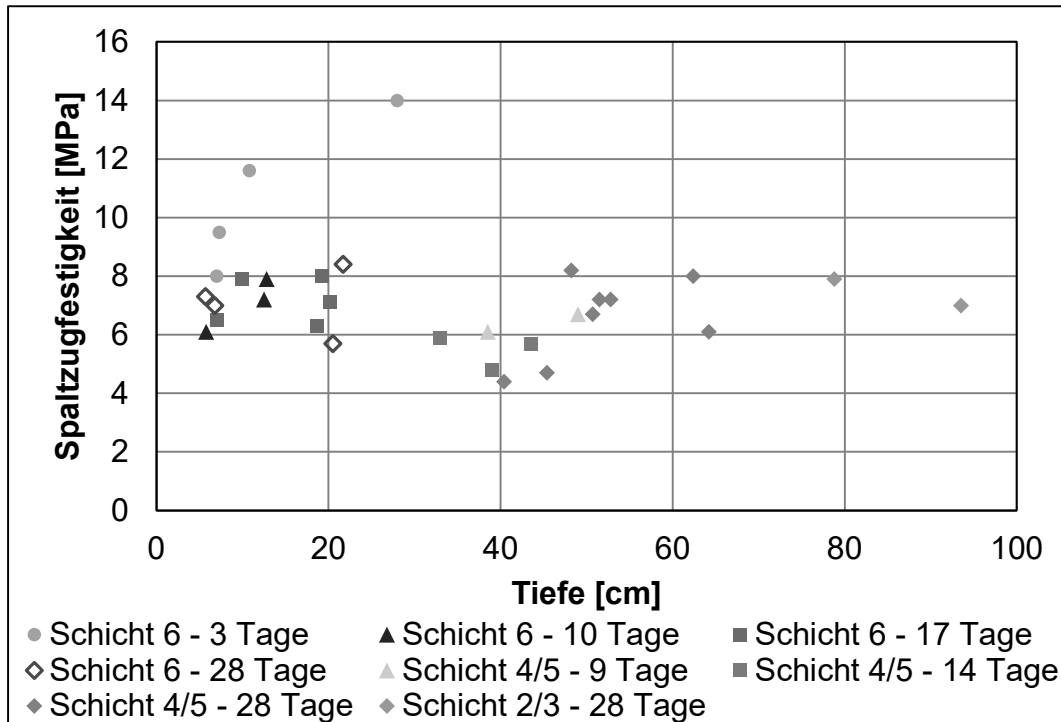


Abbildung 94: Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV1 über die Tiefe

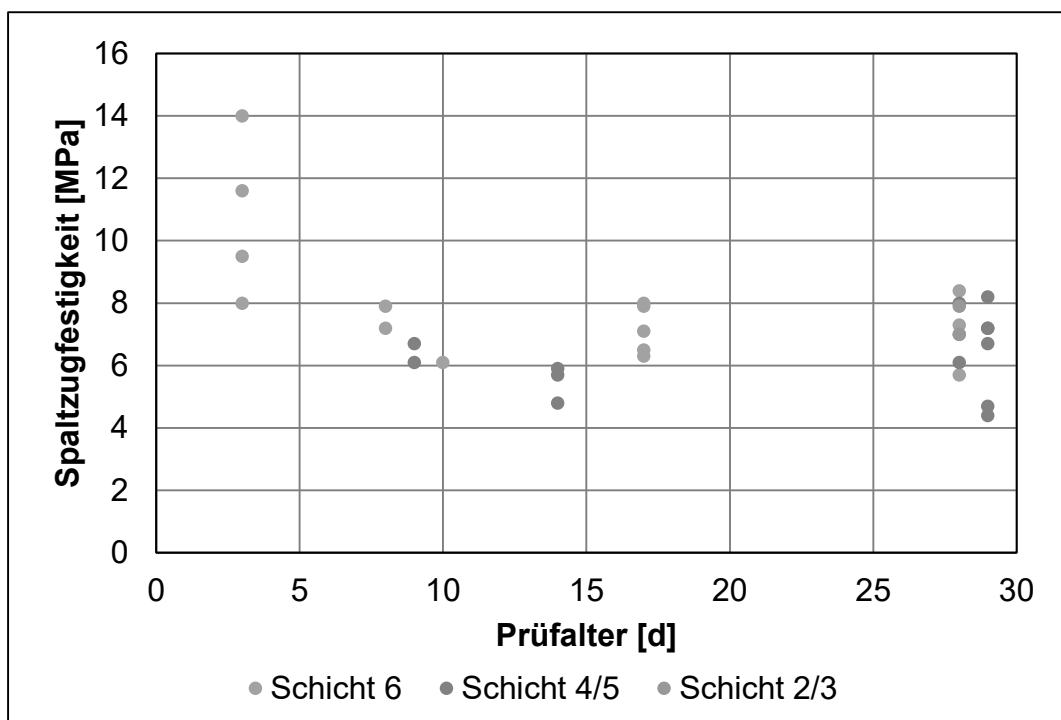


Abbildung 95: Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV1 in Abhängigkeit des Prüfaltes

6.5.2.5 Direkte Zugfestigkeit

Aufgrund der bekannten, methodisch bedingten Unterschiede zwischen indirekter Zugfestigkeit (Spaltzugversuch) sowie der direkten (Haft-)Zugfestigkeit von Baustoffen (s. Abschnitt 5.2.5.2) wurden durch das IfG Haftzugversuche an Proben verschiedener Spritzbetonabschnitte durchgeführt. Dabei wurden Bohrkerne aus der Schicht 6 (kompaktes Material) mit einem Prüfalter von 17 d (Probenserie 718) bzw. 23 d (Probenserie 720), sowie Bohrkerne aus der Schicht 5 (Probenserie 719) mit einem Prüfalter von 25 d bzw. 28 d (Abbildung 96) verwendet.

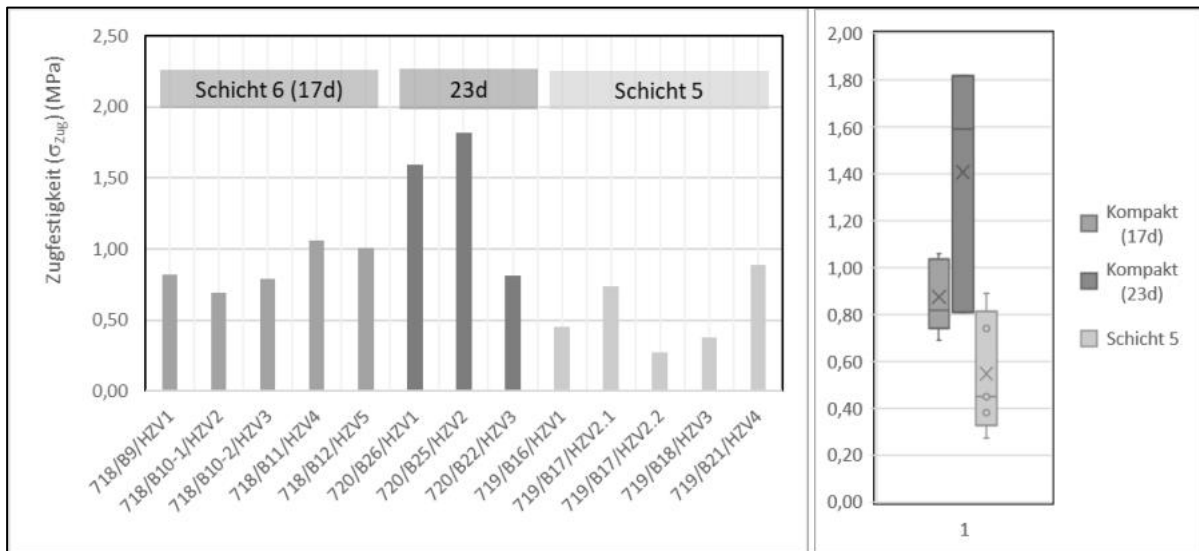


Abbildung 96: Direkte Zugfestigkeit an Proben des GSBV1 aus Schicht 6 nach 17 bzw. 23 d Prüfalter bzw. aus Schicht 5 nach 25 bzw. 28 d: (li.) Einzelergebnisse, (re.) Boxplots zur Darstellung der Streuung der verschiedenen Einzelversuche (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75, sowie als Strich der Medianwert (0,5), und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x).

Bei der Schicht 6 handelt es sich um einen ca. 30 cm mächtigen Betonageabschnitt mit der größten im Vorhaben realisierten Schichtmächtigkeit. Die Schicht 6 ließ sich problemlos herstellen (z.B. ohne Abrutschen), wobei allerdings der Spritzanfang der Schicht 6 ca. 6 Tage nach dem Spritzende der Schicht 5 lag (vgl. Abschnitt 6.5.2.2).

Die gemessene Zugfestigkeit (hier Matrixwerte) variiert zwischen 0,69 MPa und 1,82 MPa als Minimum und Maximum, wobei der Median 0,82 MPa (für die Haftzugfestigkeit nach 17 d) bzw. 1,59 MPa (nach 23 d) beträgt. Damit ist die gemessene Zugfestigkeit erwartungsgemäß deutlich niedriger (um einen Faktor 4 bis 5) als die Spaltzugfestigkeit der Schicht 6. (s. Abschnitt 6.5.2.4).

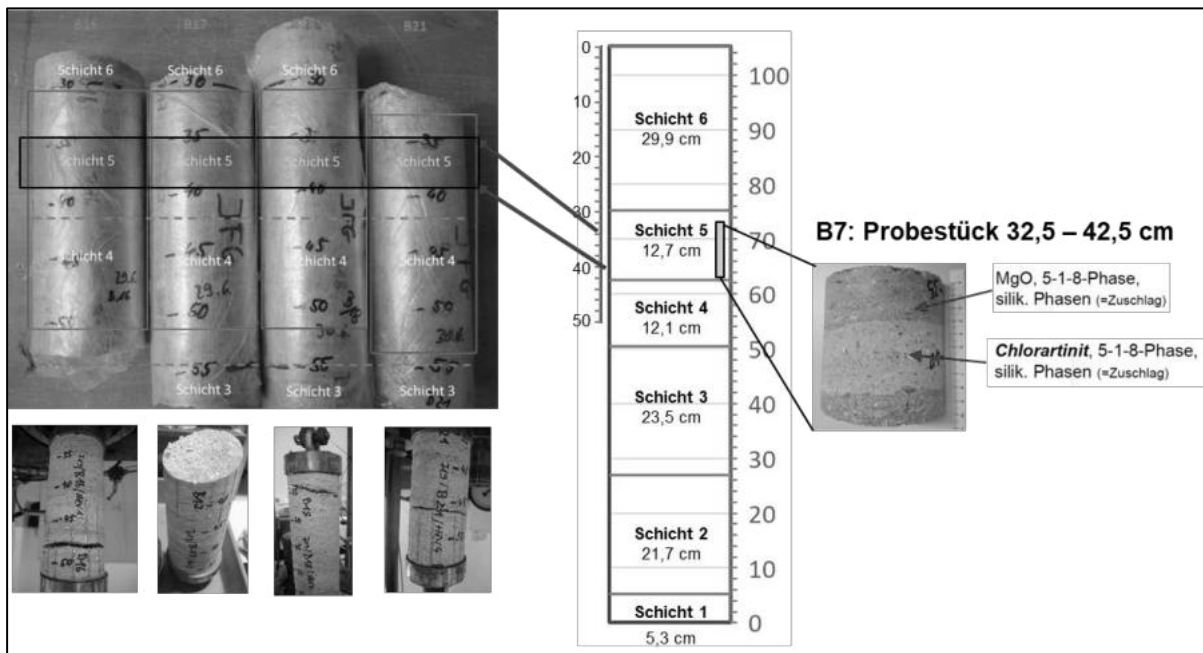


Abbildung 97: Untersuchung der Schicht 5 (Auftreten von Chlorartinit): (li) Kernstücke mit Prüfbereich, darunter die jeweiligen Prüfkörper mit der Versagensfläche nach Zugversuch; (Mitte) Schichtprofil GSBV1 mit Kernstückausschnitt zum Auftreten von Chlorartinit.

Die Zugfestigkeit der Proben aus der Schicht 5 ist im Vergleich zu Proben aus der Schicht 6 geringer, obwohl wegen der Abhängigkeit der Festigkeit von der Abbindezeit die Festigkeit höher sein sollte (hier nachgewiesen für die Schicht 6 mit der Zunahme der Zugfestigkeit von der Messung bei 17 Tagen zu der Messung nach 23 Tagen Abbindezeit (vgl. Abbildung 96)). Sie variiert zwischen 0,38 MPa und 0,89 MPa mit einem Median von nur 0,45 MPa. Die Versagensflächen liegen zumeist im „hellen“ Bereich der Schicht 6, wobei allerdings die Probe aus der Kernbohrung 16 (719/B16/HZV1) außerhalb dieses Bereichs versagte (Ausnahme). Es ist nicht eindeutig nachweisbar, dass Chlorartinit-Einschaltungen die direkte Zugfestigkeit reduzieren. Chlorartinit bildet sich durch Kontakt von MgO oder Mg(OH)₂ in einem MgCl₂-haltigem Milieu oder aus Sorelphasen in Kontakt mit CO₂ in Gegenwart von Lösung oder Luftfeuchte. Am GV2 bzw. an der Kontaktfläche zwischen Bauwerk und Salzgebirge wurde ein Überzug von Chlorartinit beobachtet. [4] (siehe auch Abschnitt 7.4.1)

Insgesamt wurde aus den Ergebnissen zur Messung der direkten Zugfestigkeit an Probekörpern des GSBV1 abgeleitet, dass die direkte Zugfestigkeit aller untersuchten Spritzbetonproben aus dem GSBV1 im Vergleich zu allen anderen bisher untersuchten Bohrkernen niedriger ist, insbesondere zu den Ergebnissen aus der Nachuntersuchung an Probekörpern des GV2 (vgl. Abschnitt 6.7).

6.5.2.6 Permeabilitätsuntersuchungen in situ

Im Spritzbetonversuch GSBV1 wurden die ersten in situ-Permeabilitätsuntersuchungen an einem untertage hergestellten Spritzbetonkörper durchgeführt. Dazu wurde die Bohrung B36 abgeteuft. Die Bohrung wurde im Trockenkernbohrverfahren unter Verwendung von Druckluft als Spülmedium gebohrt. Das Kernmaterial aus der Bohrung wurde für Laboruntersuchungen verwendet (Abschnitt 5.2.2.3.5). Das Programm der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Gas ist in Anlage 3.2.1 dargestellt. Abbildung 98 gibt eine Übersicht über die Anordnung der Prüfintervalle in Bezug auf die einzelnen Spritzbetonschichten bzw. Betonageabschnitte.

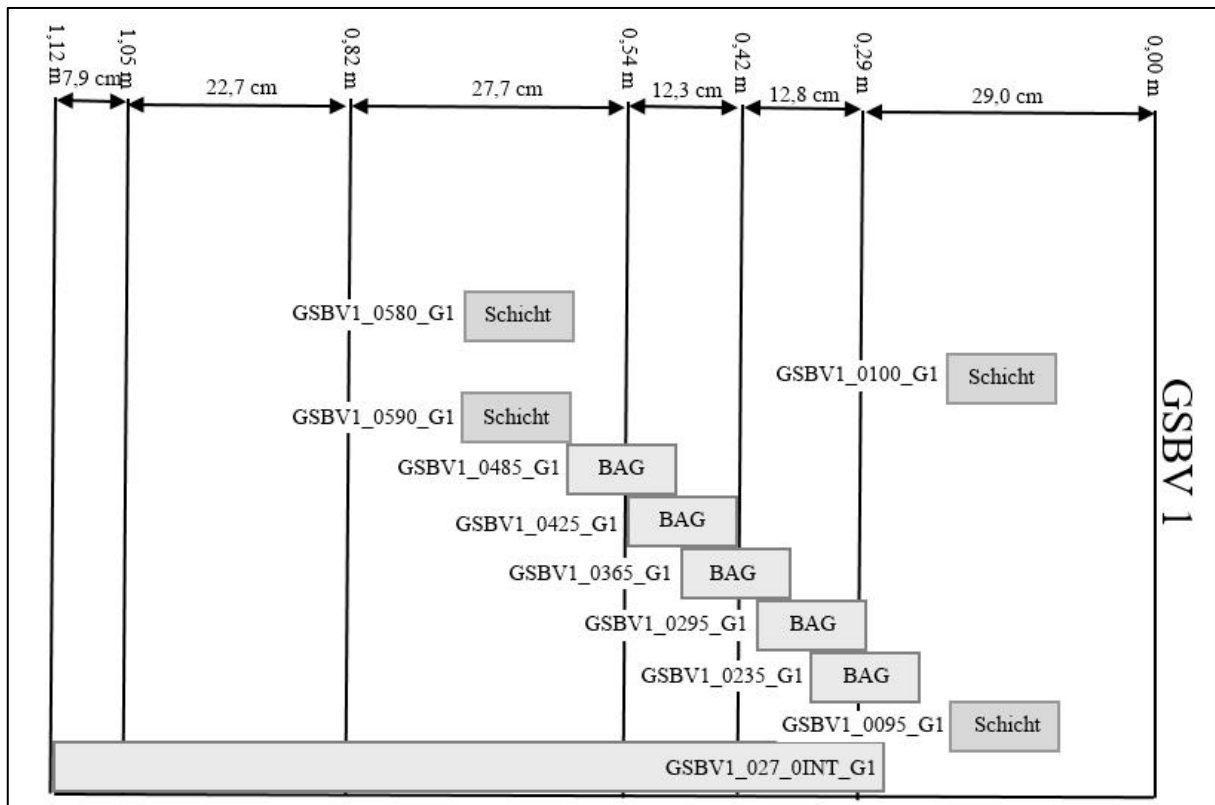


Abbildung 98: Übersicht zur Anordnung der Messpunkte und der Spritzbetonschichten/BAG im GSBV1 /B36

Die Permeabilitätsuntersuchungen in der Bohrung B36 an dem Spritzbetonkörper GSBV1 wurden in der Grube Teutschenthal vom 03.02.2021 bis 10.02.2021 durchgeführt.

Trotz mehrfacher Versuche und der Kontrolle der Dichtheit und des Dichtsitzes der Packerausrüstung in der Bohrung war ein Druckimpuls an den in Tabelle 50 angegebenen Messpunkten nicht möglich. Es wurde vermutet, dass ein wesentlicher Abstrom des Gases durch die BAG hervorgerufen wurde. Allerdings war auch in den Prüfintervalen, die innerhalb einer Spritzschicht lagen, ein Druckaufbau nicht möglich.

Tabelle 50: Ergebnisse der in situ Permeabilitätsmessung mit Gas im GSBV1 (B36)

Messpunkt- bezeichnung	Prüfdruck	Teufe OK	Teufe MP	Teufe UK	Permeabilität	Bemerkung
[-]	[MPa]	[m v. AP]			[m ²]	[-]
GSBV1_0270_INT_G1	0,5	0,270	0,695	1,120	kein Druckaufbau möglich	integral Bohrung
GSBV1_0095_G1	0,5	0,095	0,150	0,205	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 100 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton
GSBV1_0100_G1	0,5	0,100	0,155	0,210	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 120 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton
GSBV1_0235_G1	0,5	0,235	0,290	0,345	kein Druckaufbau möglich	BAG
GSBV1_0295_G1	0,5	0,295	0,850	1,405	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 30 s auf Luftdruck gefallen	BAG
GSBV1_0365_G1	0,5	0,365	1,420	2,475	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 25 s auf Luftdruck gefallen	BAG
GSBV1_0425_G1	0,5	0,425	0,480	0,535	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 35 s auf Luftdruck gefallen	BAG
GSBV1_0485_G1	0,5	0,485	0,540	0,595	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 3,5 min auf Luftdruck gefallen	BAG
GSBV1_0580_G1	0,5	0,580	0,635	0,690	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 40 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton
GSBV1_0590_G1	0,5	0,590	0,645	0,700	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 79 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton

6.5.2.7 Auswertung Temperaturentwicklung

Mit den insgesamt 37 in den Spritzbetonkörper eingebauten Thermoelementen wurde die Entwicklung der Temperatur beim Spritzen und Abbinden des Spritzbetons aufgezeichnet. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 99 dargestellt.

In der Tabelle 51 ist je Schicht für ausgewählte Zeitpunkte (zu Spritzbeginn, zum Spritzende und das Maximum) die Temperatur in der Schichtmitte im Zentrum des Spritzbetonkörpers angegeben.

Mit dem Spritzen der ersten Schicht am 02.06.2020 mit einer Schichtmächtigkeit von nur 5,3 cm im Mittel waren die Thermoelemente für die geplante Schichtmitte praktisch nicht eingespritzt, sodass hier nur ein geringer Temperaturanstieg von 1,5 °C gemessen wurde. Am Folgetag wurde die zweite Schicht mit einer mittleren Mächtigkeit von 21,7 cm gespritzt. Knapp 13 Stunden nach dem Spritzende stieg die Temperatur auf 68,4 °C. Beim Spritzbeginn am Folgetag betrug die Temperatur an der Betonoberfläche 31,4 °C. Die Schicht 3 hatte eine

Mächtigkeit von 23,5 cm. Die Maximaltemperatur in der Schichtmitte lag unerwartet hoch bei 90,6 °C und wurde nach nur 7,3 Stunden nach Spritzende erreicht, was deutlich schneller war als bei anderen Schichten. Die Abkühlung dauerte ebenfalls sehr lange an. Bei Spritzbeginn der vierten Schicht nach drei Tagen Pause hatte die Temperatur der Betonoberfläche noch immer nicht die Umgebungstemperatur erreicht. Die Schichten 4 und 5 hatten mit 12,1 cm und 12,7 cm eine ähnliche Mächtigkeit. Die Maximaltemperatur der Schicht 5 ist mit 48,3 °C deutlich höher als bei der Schicht 4 mit nur 40,5 °C. Dieser Unterschied ergibt sich aus den unterschiedlichen Untergrundtemperaturen zu Spritzbeginn. Bei Schicht 4 betrug die Untergrundtemperatur 29,1 °C, während bei Schicht 5 eine Untergrundtemperatur von 36,8 °C vorlag. Schicht 6 war mit knapp 30 cm Mächtigkeit die dickste Schicht. Die Maximaltemperatur lag hier bei 81,8 °C.

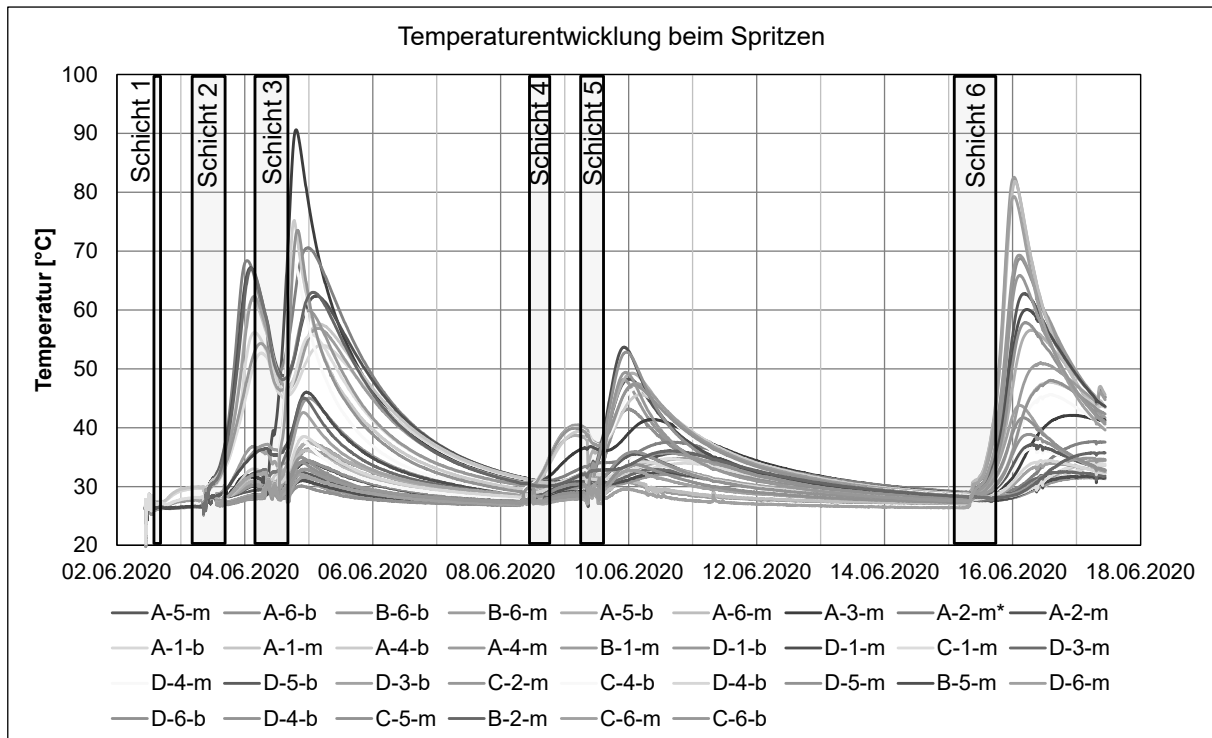


Abbildung 99: Temperaturentwicklung beim GSBV1

Tabelle 51: Auswertung Temperatur in der Mitte des Spritzbetonkörpers beim GSBV1

Schicht	1	2	3	4	5	6
Untergrundtemp. zu Spritzbeginn [°C]	25,4	26,1	31,4	29,1	36,8	27,7
Temp. zu Spritzende [°C]	27,1	31,3	41,4	30,3	31,9	32,0
max. Temp. [°C]	30,0	68,4	90,6	40,5	48,3	81,8
Δt (Spritzende – max. Temperatur) [h]	16,6	12,8	7,3	15,9	13,2	12,7

In Abbildung 100 ist die Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Mächtigkeit der Spritzschichten dargestellt. Hier lässt sich eindeutig erkennen, dass mit zunehmender Schichtmächtigkeit auch die maximale Abbinde-temperatur im Spritzbetonkörper ansteigt. Die Maximaltemperatur in der Schichtmitte beim Abbinden wird außerdem durch die Untergrundtemperatur zu Spritzbeginn beeinflusst. Je wärmer die Untergrundtemperatur,

desto höher auch die Maximaltemperatur im Spritzbetonkörper beim Abbinden. So haben Schicht 4 und 5 eine sehr ähnliche Mächtigkeit, aber unterschiedliche Maximaltemperaturen, da die Untergrundtemperatur bei Spritzbeginn von Schicht 5 (36,8 °C) höher war als bei Schicht 4 (29,1 °C).

In Abbildung 101 ist die Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Zeit zwischen Spritzende bis zum Erreichen der Maximaltemperatur dargestellt. Hier zeigt sich, dass je höher die Maximaltemperatur in der Schichtmitte beim Abbinden ist, desto kürzer ist die Zeit, die zwischen Spritzende und Erreichen der Maximaltemperatur liegt. Bei mächtigen Schichten und damit hoher maximaler Abbinde-temperatur wird das Temperaturmaximum schneller erreicht als bei dünneren Schichten.

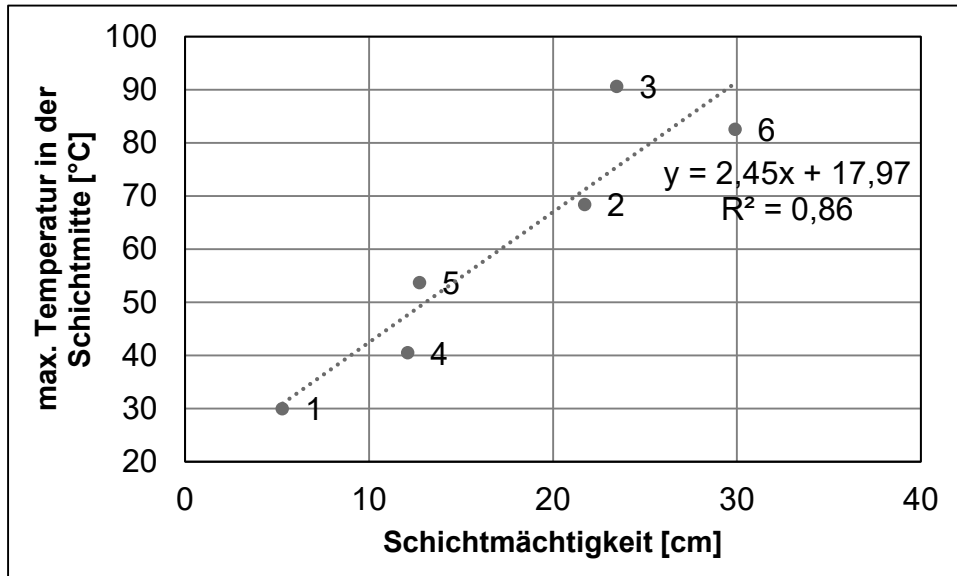


Abbildung 100: Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Schichtmächtigkeit beim GSBV1

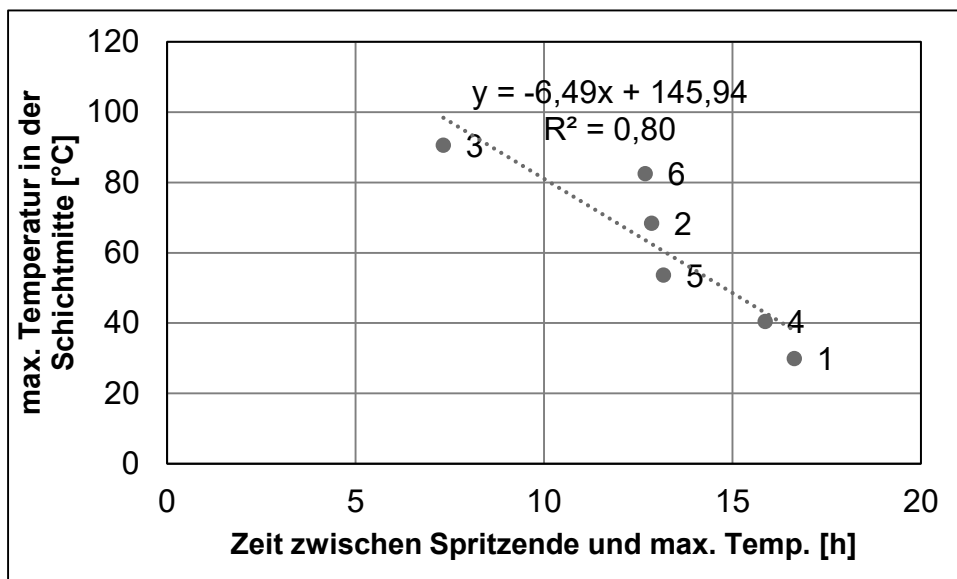


Abbildung 101: Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Zeit zwischen Spritzende und Erreichen der Maximaltemperatur beim GSBV1

6.5.2.8 Zusammenfassung GSBV1

Die Ausführung des GSBV1 diente der Wiederholung der Rezeptur des GV2 mit den aktuell verfügbaren Bestandteilen. So wurden das MgO und die Salzlösung ausgetauscht, sodass sich ein etwas höherer Lösungsbedarf ergeben hat. Außerdem sollte geprüft werden, ob sich die Schichtmächtigkeit der Spritzschichten von 10 cm beim GV2 auf 15 cm bis 20 cm erhöhen lässt.

Im Juni 2020 wurde der GSBV1 gespritzt. Der Spritzbetonkörper hatte eine Breite von 1,5 m, eine Höhe von 3,0 m bis 3,2 m (entsprechend der Firstkontur) und eine Tiefe von 1 m. Es wurden sechs Schichten mit einer Mächtigkeit von bis zu 30 cm gespritzt, was problemlos möglich war.

Bei den hohen Schichtmächtigkeiten waren auch die Abbinde Temperaturen sehr hoch. Die maximale Temperatur wurde bei der dritten Schicht (23,5 cm Mächtigkeit) mit 90,6 °C gemessen.

Das Lösung-MgO-Verhältnis der einzelnen Schichten liegt zwischen 0,75 und 0,98. Dieses kann nicht exakt eingestellt oder vorgegeben werden, sondern erst in der Auswertung berechnet werden.

Die gebohrten Kerne wiesen zahlreiche Risse, Lunker oder weniger dichte Bereiche auf. Die Festigkeit war nach drei Tagen bereits hoch (einaxiale Druckfestigkeit: 30,6 MPa; Spaltzugfestigkeit: 10,8 MPa), streute aber stark, was die Inhomogenität des Spritzkörpers belegt. Außerdem war die Dichte geringer als bei den Kernen des GV2. Dies war möglicherweise auf unzureichendes Mischen durch eine zu geringe Mischzeit oder eine Entmischung während des Transportes über die Förderschnecke und den Schlauch zurückzuführen. Weiterhin waren möglicherweise nicht optimale Maschineneinstellungen ursächlich für die mangelhafte Verdichtung des Spritzkörpers.

Die direkte Zugfestigkeit / Haftzugfestigkeit (12 Proben aus den Schichten 6 und 5) variierte zwischen 0,39 MPa und 1,82 MPa als Extremwerte mit einem Median von 0,81 MPa. Sie ist damit gegenüber der standardmäßig gemessenen Spaltzugfestigkeit um einen Faktor 4 bis 5 niedriger, was auf die vorliegende Schichtung des Spritzbetons (abgeminderte Festigkeiten senkrecht zur Spritzbetonschale) zurückgeführt wurde (vgl. Diskussion in Kap. 6.7).

In der Auswertung des Versuches und der Ausführung untertage wurde einige mögliche Ursachen für die mäßige Qualität der Bohrkerns bzw. des Spritzkörpers identifiziert.

So sollte die Mischzeit des Trockengemisches erhöht und zusätzlich der Mischer abgedichtet werden, sodass kein Feinmaterial bzw. MgO verloren gehen kann. Die Förderschnecke darf nicht leer laufen. Es sollte zukünftig eine andere Spritzdüse verwendet werden, die eine bessere Lösungszufuhr ermöglicht. Es sollte ein längerer Förderschlauch verwendet werden und der Schlauch gerade bzw. in großen Schlaufen gelegt werden. Es sollte der Förderdruck sowohl für das Trockengemisch als auch für die Lösung erhöht werden.

Diese Vorgaben wurden in den nächsten Versuchen umgesetzt, um einen homogenen Spritzbetonkörper zu erhalten.

6.5.3 Großspritzbetonversuch 2 (GSBV2)

6.5.3.1 Der Spritzprozess

Für den GSBV2 wurde die gleiche Rezeptur (s. nachfolgende Tabelle) verwendet wie beim GSBV1. Dabei wurden die optimierten Einstellungen verwendet (s.o.).

MgO	M.-%	15,6
S30-Lösung	M.-%	11,4
Sand/Kies-Zuschlag (0 - 8 mm)	M.-%	73,0
Verhältnis Zuschlag/MgO	-	4,68
Verhältnis Lösung/MgO	-	0,73

Es wurden in diesem Versuch keine Thermoelemente verbaut, da nur ein homogener Spritzbetonkörper hergestellt werden sollte. Außerdem wurde durch die geringeren Abmessungen des Spritzbetonkörpers auch die Abbindezeit reduziert.

Der GSBV2 wurde in einem großen Spritzkasten mit einer Höhe von 1,2 m und einer Breite von 0,8 m ausgeführt. Es wurden zwei Schichten an zwei aufeinanderfolgenden Tagen im September 2020 gespritzt.

Mit dem Spritzen der *Schicht 1* wurde am 15.09.2020 begonnen. Es wurde eine Schichtmächtigkeit von 20,0 cm gespritzt. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW der ersten Schicht betrug 0,582. Das Spritzgut war damit vergleichsweise trocken. Insgesamt wurden 843 kg Beton verbraucht, 30,4 % davon waren Rückprall.

Die *Schicht 2* wurde am 16.09.2020 gespritzt. Es wurde eine Mächtigkeit von 43,0 cm gespritzt. Das Masseverhältnis Lösung/MgO-LW der ersten Schicht betrug 0,868. Insgesamt wurden 1302 kg Spritzbeton verbraucht, 31,7 % davon waren Rückprall.

Tabelle 52: Kenndaten der 2 Spritzschichten des GSBV2

Schicht	1	2
Datum	15.09.2020	16.09.2020
Mittlere Schichtmächtigkeit [cm]	20,0	43,0
Spritzbeton [kg]	843,3	1302,1
Zuschlag [kg]	624,0	927,2
MgO [kg]	140,4	200,7
Lösung [kg]	78,9	174,2
Verhältnis Lösung/ MgO [-]	0,582	0,868
Rückprall [kg]	255,2	412,7
Rückprall [%]	30,4	31,7

6.5.3.2 Auswertung Bohrkern

Aus dem Spritzbetonkörper des GSBV2 wurden 17 Bohrkern gewonnen. Im Vergleich zu den Kernen des vorigen Versuches hatten diese Kerne eine wesentlich bessere Qualität mit deutlich weniger Fehlstellen (Risse, Lunker, weniger kompakte Bereiche). Die Verbesserungsmaßnahmen waren demzufolge sehr zielführend.

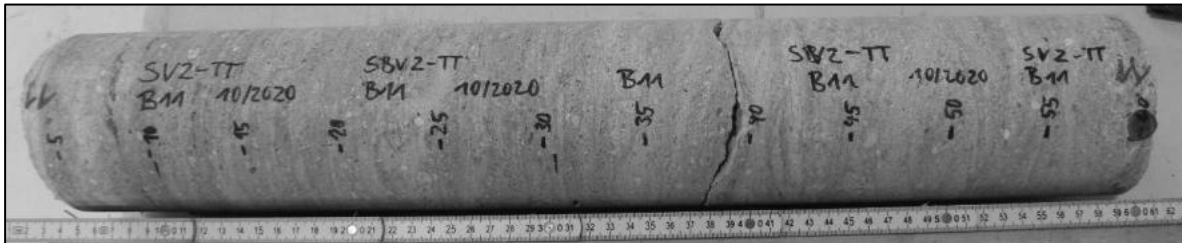


Abbildung 102: Bohrkern aus der Bohrung B11 aus dem GSBV2

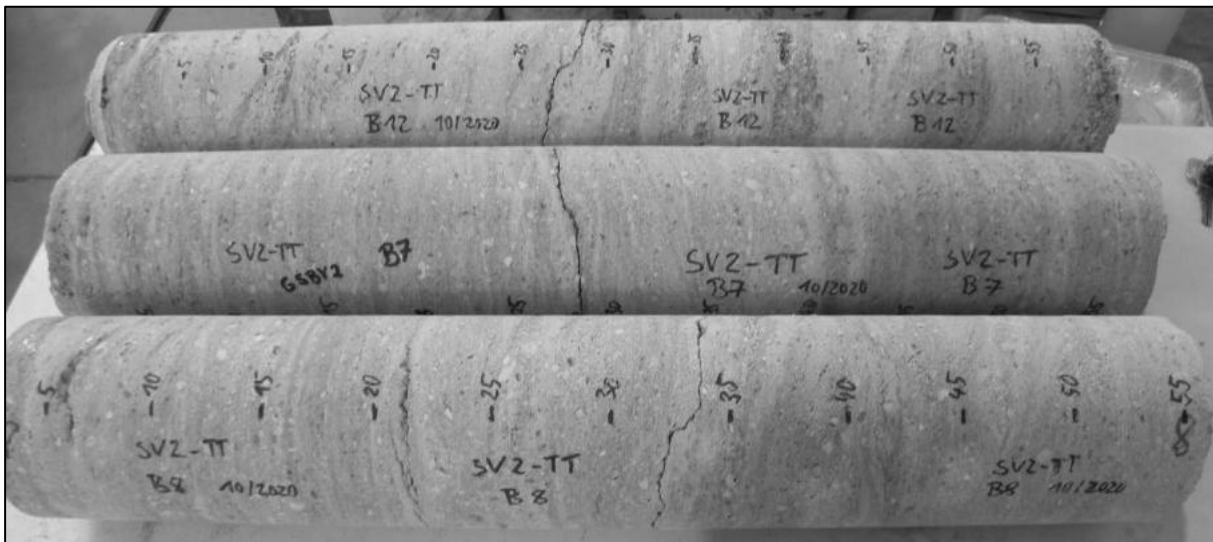


Abbildung 103: Bohrkern aus den Bohrungen B12, B7 und B8 aus dem GSBV2

6.5.3.3 Auswertung Festigkeit

Frühfestigkeit

Nach dem Spritzen jeder Schicht wurde die Frühfestigkeit mittels Penetrometer über drei Stunden in regelmäßigen Abständen ermittelt. Über die gesamte Spritzbetonoberfläche wurde aus vier Einzelmessungen der Mittelwert gebildet. Die Entwicklung der Frühfestigkeit ist in Abbildung 104 dargestellt.

Für die erste Schicht betrug die Frühfestigkeit nach 6 Minuten 0,19 MPa und stieg kontinuierlich bis auf 0,32 MPa nach drei Stunden an. Für die zweite Schicht betrug die Frühfestigkeit nach 7 Minuten 0,13 MPa und stieg kontinuierlich bis auf 0,30 MPa nach 3,2 Stunden an. Die unterschiedlichen Anfangswerte lagen möglicherweise in den unterschiedlichen Lösung/MgO-Verhältnissen. So hatte die Schicht 1 ein geringeres Lösung/MgO-Verhältnis und war trockener, während die Schicht 2 mit einem größeren Lösung/MgO-Verhältnis bzw. nasser gespritzt wurde.

Die Frühfestigkeit am Spritzbetonkörper des GSBV2 war damit sowohl am Anfang nach wenigen Minuten nach Spritzende als auch beim Endwert nach drei Stunden deutlich höher als beim GSBV1. Hier wurde nach 3 Stunden eine Festigkeit zwischen 0,12 MPa und 0,23 MPa gemessen.

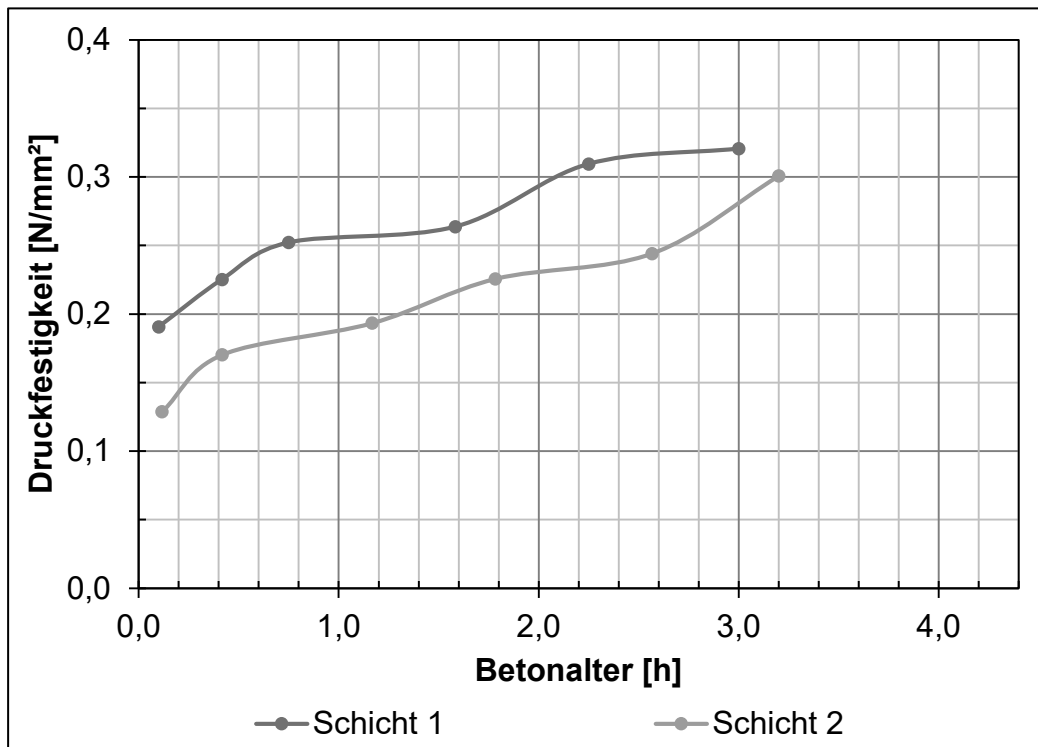


Abbildung 104: Frühfestigkeit der Schichten 1 und 2 beim GSBV2

Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 20 cm bestimmt. Da der Spritzbetonkörper deutlich kleiner war als der des GSBV1, konnten nicht so viele Proben gewonnen werden, deshalb wurde nur die Festigkeit nach 28 Tagen geprüft.

In Tabelle 53 sind die Einzelwerte zur einaxialen Druckfestigkeit enthalten. In Tabelle 54 sind Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung der einaxialen Druckfestigkeit zusammengefasst.

Im Mittel lag die einaxiale Druckfestigkeit bei 39,7 MPa und damit etwas höher als beim GSBV1. Während beim GSBV1 die minimale Druckfestigkeit bei 24,5 MPa lag, war diese beim GSBV2 mit 35,3 MPa deutlich höher. Die Maximalwerte von etwa 49 MPa waren ähnlich hoch. Die Streubreite konnte somit verringert werden.

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper betrug zwischen 2,11 g/cm³ und 2,29 g/cm³ und im Mittel bei 2,16 g/cm³.

Tabelle 53: Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV2

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B10-2	2	19,0	28	48,7	2,19
B15-2	2	23,5	28	43,9	2,18
B17-2	2	14,5	28	37,5	2,19
B14-2	1	47,0	28	38,5	2,18
B9-1	2	37,0	28	38,1	2,15
B9-2	2	13,0	28	41,7	2,18
B4-1	2	19,0	28	36,7	2,16

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B4-2	1	46,5	28	36,7	2,14
B11-2	2	20,5	28	39,8	2,18
B3-3	1	48,5	28	35,3	2,11
B8-1	1	45,5	28	39,7	2,17

Tabelle 54: Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV2

Nach ... Tagen	28
Minimalwert [MPa]	35,3
Maximalwert [MPa]	48,7
Gemittelte Festigkeit [MPa]	39,69
Standardabweichung [MPa]	3,68
Anzahl Einzelwerte [-]	11

Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 10 cm ermittelt. Da der Spritzbetonkörper deutlich kleiner war als der GSBV1, wurde nur die Festigkeit nach 28 Tagen geprüft.

In Tabelle 55 sind die Einzelwerte zur Spaltzugfestigkeit enthalten. In Tabelle 56 sind Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung der Spaltzugfestigkeit zusammengefasst.

Im Mittel lag die Spaltzugfestigkeit bei 6,3 MPa und damit etwas geringer als beim GSBV1 (6,8 MPa). Die minimale Spaltzugfestigkeit betrug 4,5 MPa, ähnlich wie beim GSBV1 mit 4,4 MPa. Der Maximalwert von 7,7 MPa war etwas geringer als bei GSBV1 (8,4 MPa).

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper betrug zwischen 2,11 g/cm³ und 2,22 g/cm³ und im Mittel bei 2,16 g/cm³. Sie war somit genauso hoch wie bei den Proben des GSBV1.

Tabelle 55: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV2

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B6-1	1	56,5	28	5,2	2,15
B13-1	2	34,5	28	7,7	2,22
B1-1	2	24,0	28	5,9	2,12
B14-1	2	8,0	28	7,0	2,17
B3-1	2	33,0	28	4,5	2,15
B3-2	2	14,5	28	7,0	2,19
B11-1	1	52,5	28	5,2	2,12
B17-1	1	47,0	28	6,7	2,18
B16-1	2	8,5	28	7,7	2,18
B16-2	2	29,0	28	6,8	2,17
B15-1	1	45,5	28	6,8	2,12
B10-1	1	49,5	28	4,6	2,13

Tabelle 56: Zusammenfassung Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV2

Nach ... Tagen	28
Minimalwert [MPa]	4,5
Maximalwert [MPa]	7,7
Gemittelte Festigkeit [MPa]	6,26
Standardabweichung [MPa]	1,06
Anzahl Einzelwerte [-]	12

6.5.3.4 Permeabilitätsuntersuchungen in situ

Für die Permeabilitätsuntersuchungen an dem Spritzbetonkörper des GSBV2 wurden zunächst drei Bohrungen mit einem Durchmesser von 105 mm hergestellt. Abbildung 105 zeigt die Anordnung sowie den Abstand der getesteten Messbohrungen (markiert mit roten Kreisen). Außerdem wurde eine weitere Bohrung mit einem Durchmesser von 70 mm erstellt (grüner Kreis in Abbildung 105). In den Bohrungen wurde in situ die Permeabilität mit Gas gemessen.

Das Untersuchungsprogramm der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen ist in Anlage 3.2.2 dargestellt.

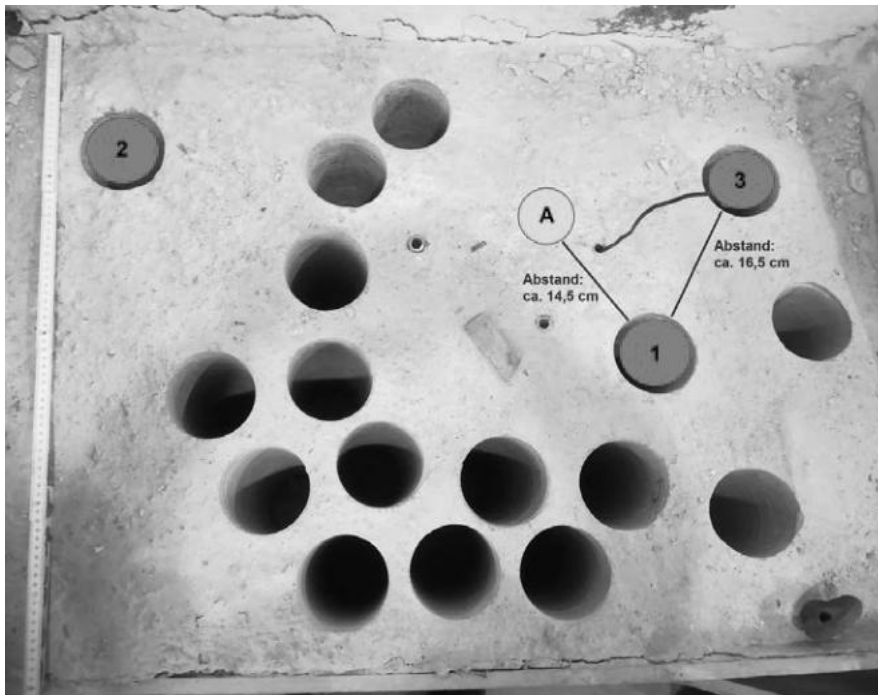


Abbildung 105: Anordnung der Messbohrungen am Spritzbetonkörper des GSBV2

Die Permeabilitätsuntersuchungen an dem Spritzbetonkörper GSBV2 wurden in der Versuchshalle des Institutes für Bergbau und Spezialtiefbau am 11.11.2020 durchgeführt. Trotz mehrfacher Versuche und der Kontrolle der Dichtheit und des Dichtsitzes der Packer-ausrüstung in den Bohrungen war ein Druckimpuls an den vorgesehenen Messpunkten nicht möglich (s. Tabelle 57). Es wurde vermutet, dass das Gas über die BAG abgeströmt ist.

Für die ersten Messungen wurden 3 Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 105 mm ausgewählt, die einen möglichst großen Abstand zu den benachbarten Bohrlöchern aufwiesen. Die Teufe der Bohrungen betrug ca. 0,58 m. Die verwendeten Gummielemente

des 2-fach-Packers sind für einen Bohrlochdurchmesser von 98 mm bis 103 mm ausgelegt. Aufgrund des größeren Durchmessers der Bohrlöcher war der Aufbau eines Gasdruckes nicht möglich.

Für die nachfolgende Messung wurde eine Bohrung mit einem Durchmesser von 70 mm gestoßen. Die verwendeten Gummielemente des 2-fach-Packers wurden entsprechend des neuen Bohrlochdurchmessers angepasst, sodass der Packer dicht im Bohrloch saß. Trotz des Dichtsitzes war die Untersuchung nicht erfolgreich. Das Gas strömte über eine Verbindung über eine BAG zwischen der Bohrung 1 (Ø 105 mm) und der Bohrung A (Ø 70 mm) ab – siehe Abbildung 106. Dieser Abstrom war hör- und fühlbar.



Abbildung 106: Bereiche mit Rissen, Fehlstellen und erhöhter Porosität in den Bohrungen am GSBV2

Tabelle 57: Ergebnisübersicht GSBV2

Bohrung	Messpunkt- bezeichnung	Prüfdruck	Prüfmedium	Teufe OK	Teufe MP	Teufe UK	Auswertung
GSBV-2 (L=0,58 m; a=-90,0°; D=105 mm)	BL_1_0240	0,5	Gas	0,115	0,235	0,355	kein Druckaufbau möglich
	BL_2_0240	0,5		0,115	0,235	0,355	Prüfdruck (ca. 4,2 bar _{rel}) innerhalb von ca. 3 min auf Luftdruck gesunken
	BL_2_0080	0,5		0,115	0,155	0,195	kein Druckaufbau möglich
	BL_3_0080	0,5		0,115	0,155	0,195	Prüfdruck (ca. 1,6 bar _{rel}) innerhalb von ca. 45 s auf Luftdruck gesunken
GSBV-2 (L=0,58 m; a=-90,0°; D=105 mm)	BL_A_0080	0,5	Gas	0,115	0,155	0,195	kein Druckaufbau möglich (Gas strömte ins Bohrloch 2 ab, da BAG durchlässig)

6.5.3.5 Zusammenfassung GSBV2

Für den GSBV2 wurde die gleiche Rezeptur wie beim GSBV1 und dem GV2 verwendet. Da die Bohrkern des GSBV1 zahlreiche Fehlstellen aufwiesen, wurden die Technik und die Einstellungen überprüft und verbessert. Der GSBV2 diente somit der Prüfung des optimierten Spritzens. So wurden beispielsweise der Förderdruck für Trockengemisch und Lösung erhöht, um eine bessere Kompaktion des Spritzguts zu erzielen und eine andere Düse verwendet, mit der das Trockengemisch und die Lösung besser gemischt wurden.

Für den GSBV2 wurde im September 2020 ein Spritzbetonkörper mit einer Breite von 0,8 m und einer Höhe von 1,2 m und einer Mächtigkeit von 0,63 m in zwei Schichten hergestellt. Bei diesem Versuch wurden keine Thermolemente verbaut.

Die mit dem Penetrometer bestimmte Frühfestigkeit war bei beiden Schichten des GSBV2 deutlich höher als beim GSBV1.

Die Bohrkern waren zufriedenstellend und von sehr guter Qualität mit nur sehr wenigen Fehlstellen. Dies belegt den Erfolg der optimierten Einstellungen und Technik.

Aufgrund des kleineren Spritzbetonkörpers wurde nur die Festigkeit nach 28 Tagen bestimmt. Die einaxiale Druckfestigkeit betrug im Mittel 39,7 MPa und war somit etwas höher als bei den Proben des GSBV1 (37,0 MPa). Die mittlere Spaltzugfestigkeit betrug 6,3 MPa und war damit ähnlich hoch wie bei den Proben des GSBV1. Die mittlere Dichte lag bei den Proben beider Versuche bei 2,16 g/cm³ bzw. 2,17 g/cm³. Dennoch wirkten die Proben des GSBV2 kompakter.

Trotz der Verbesserung der Spritzbetonqualität konnte in den Permeabilitätstests kein Gasdruck aufgebaut werden.

6.5.4 Großspritzbetonversuch 3 (GSBV3)

6.5.4.1 Einleitung

Für den dritten Großspritzbetonversuch GSBV3 wurde erstmals ausschließlich Salzzuschlag im großtechnischen Einsatz verwendet. Zuvor wurden durch die TUBAF mehrere Spritzbetonversuche im Technikumsmaßstab ausgeführt und die Vorzugsvariante für den in situ Einsatz ausgewählt. Hierbei war die Haftung bzw. Klebrigkeit des frisch gespritzten Betons sehr gut, sodass für den GSBV3 hohe Spritzschichtmächtigkeiten von 18 cm bis 30 cm geplant und angestrebt wurden. Der Spritzbetonkörper sollte eine Gesamtmächtigkeit von ca. 1 m aufweisen, sodass vier Spritzschichten vorgesehen wurden. Für den GSBV3 wurde folgende Rezeptur geplant:

MgO	M.-%	17,1
S30-Lösung	M.-%	14,5
Salzzuschlag (0 - 8 mm)	M.-%	68,4
Verhältnis Zuschlag/MgO	-	4,0
Verhältnis Lösung/MgO	-	0,85...1,0

Das Salz stammte aus der Grube Teutschenthal und wurde dort aufbereitet und in Big Bags á 300 kg geliefert. Ein Big Bag und 3 Säcke MgO ergaben jeweils einen Mischeransatz.

Der Versuchsaufbau mit Mischer, Förderschnecke und Spritzmaschine war derselbe wie bei den vorigen Versuchen.

Der Versuchsort wurde von TS-Baus vorbereitet. Der Spritzort war ca. 0,5 m neben dem GSBV1. Der Spritzbeton wurde auf den Salzstoß aufgespritzt. Als seitliche Begrenzungen

wurden Wände aus Schalungsholz in einem Abstand von 1,5 m aufgestellt. Die Firsthöhe betrug an der Versuchsfläche 3,0...3,2 m, was auch der Höhe des späteren Spritzbetonkörpers entspricht. Für einen ebenen Untergrund wurde die Sohle mit Beton ausgegossen und eine Metallplatte in der Sohle ausgelegt. Der Salzstoß an der Rückseite wurde nicht nachbehandelt und wies die Rauigkeit nach der Bearbeitung mit der Teilschnittmaschine auf.

Um die Abbinde temperatur jeder Schicht messen zu können, wurden an sieben Positionen Thermoelemente (TE) eingebaut. In Abbildung 107 ist der Aufbau mit den Positionen der Thermoelemente dargestellt. Eine Geberreihe befand sich in der Mitte der Spritzfläche bei einem Abstand von 0,75 m zum Rand und bei vier verschiedenen Höhen: bei 1,5 m Höhe (Position A), bei 2,0 m Höhe (Position B), bei 2,5 m Höhe (Position C) und an der Firste bei 3,0 m bis 3,2 m Höhe (Position D). Auf diesen Positionen wurden die Thermoelemente jeweils an der Schichtunterseite und in der Schichtmitte angebracht. Eine zweite Geberreihe befand sich auf der rechten Hälfte bei 0,38 m Abstand zum rechten Rand auf drei verschiedenen Höhen: bei 1,5 m Höhe (Position E), bei 2,25 m Höhe (Position F) und an der Firste bei 3,0 m bis 3,2 m Höhe (Position G). In dieser Reihe wurden die Thermoelemente jeweils nur in der Schichtmitte eingebaut.

Zusätzlich wurden auf der letzten Schicht 4 Thermoelemente an den Positionen A, B, C und D auf der Oberfläche angebracht.

Die Thermoelemente wurden jeweils vor dem Spritzen der nächsten Schicht angebracht. Dazu wurden jeweils Stäbe horizontal in vorgebohrte Löcher in das Salz gesetzt, an denen die Thermoelemente in der Schichtmitte der nächsten Schicht angebracht wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Messspitze des Thermoelementes wenige Zentimeter Abstand zum Stab hat und vollständig mit Spitzbeton eingespritzt wird. Die insgesamt 48 verbauten Thermoelemente wurden an eine Messanlage angeschlossen, die während der Spritzarbeiten im 5-Minuten-Intervall und während längerer Pausen (über das Wochenende) im 10-Minuten-Intervall aufgezeichnet hat.

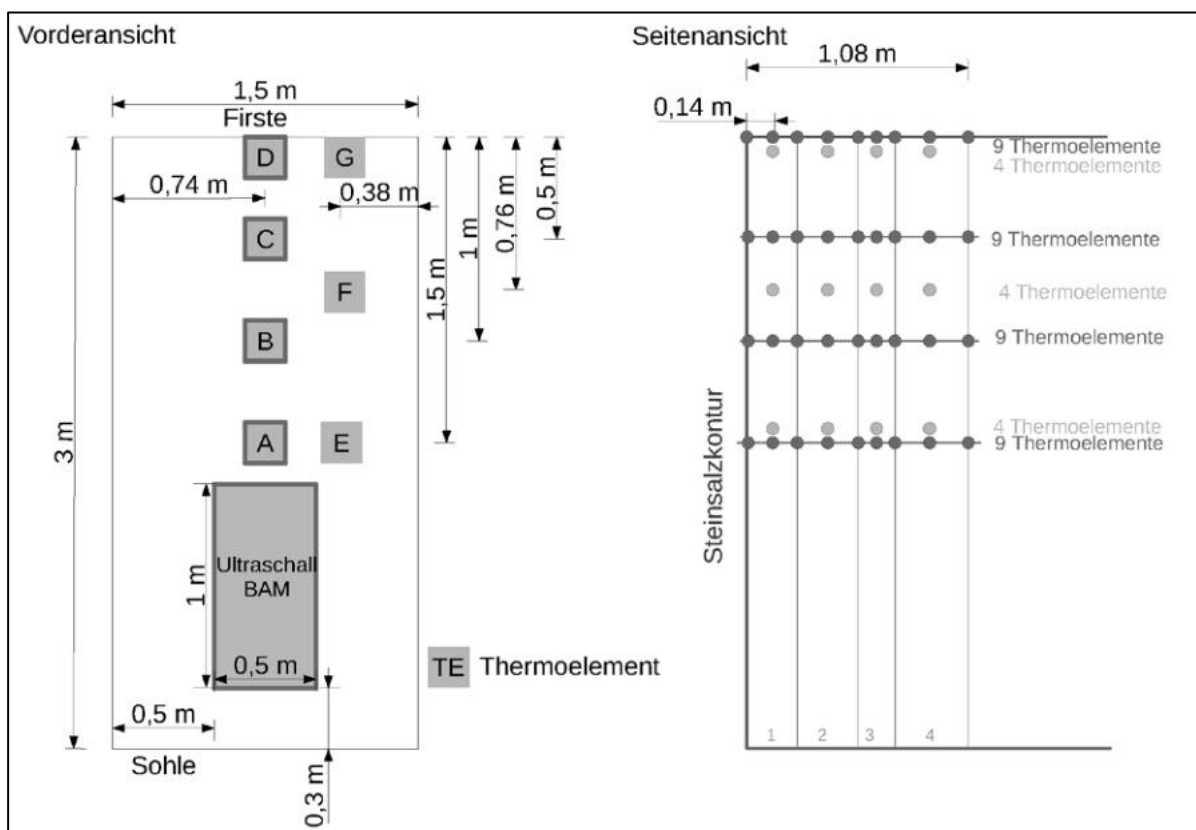


Abbildung 107: Aufbau des GSBV3 mit Position der Thermoelemente

6.5.4.2 Der Spritzprozess

Mit dem Spritzen der *Schicht 1* wurde am 10.11.2020 begonnen. Die geplante Schichtmächtigkeit betrug 24 cm, sodass die Thermolemente dementsprechend bei 12 cm Abstand zum Untergrund angebracht wurden. Die tatsächlich gespritzte mittlere Mächtigkeit betrug 16,3 cm. Das Lösung-/MgO-Verhältnis der ersten Schicht lag bei 0,948. Insgesamt wurden 2265 kg Spritzbeton verbraucht, 31,6 % davon sind Rückprall.

Die *Schicht 2* wurde am 11.11.2020 gespritzt. Die geplante Schichtmächtigkeit betrug 30 cm, sodass die Thermolemente dementsprechend bei 15 cm Abstand zum Untergrund angebracht wurden. Es wurde hier eine Schichtmächtigkeit von im Mittel 28,9 cm gespritzt. Es hat sich gezeigt, dass solch hohe Spritzmächtigkeiten problemlos zu spritzen sind. Das Lösung-/MgO-Verhältnis lag bei 0,998. Während der Spritzdauer von über 5,5 Stunden wurden 3033 kg Beton verbraucht. Der Rückprallanteil betrug 33,0 %.

Die *Schicht 3* wurde nach viertägiger Pause am 16.11.2020 gespritzt. Es sollte eine Schichtmächtigkeit von ca. 18 cm gespritzt werden. Die tatsächlich gespritzte Schichtmächtigkeit betrug im Mittel 18,9 cm. Für diese Schicht wurden 3091 kg Beton verbraucht, davon waren 37,1 % Rückprall. Das Lösung-/MgO-Verhältnis der dritten Schicht betrug 0,852.

Die *Schicht 4* wurde am 17.11.2020 gespritzt. Die Schichtmächtigkeit betrug 27,8 cm. Es wurden etwa 4143 kg Beton verspritzt, davon entfielen 33,9 % auf den Rückprall. Das Lösung/MgO-Verhältnis betrug 0,864.

Tabelle 58: Auswertung zum Spritzen des GSBV3

Schicht	1	2	3	4
Datum	10.11.2020	11.11.2020	16.11.2020	17.11.2020
Mittlere Schichtmächtigkeit [cm]	16,3	28,9	18,9	27,8
Spritzbeton [kg]	2264,6	45,31,4	3091,4	4142,9
Zuschlag [kg]	1534,0	3033,0	2119,0	2828,4
MgO [kg]	375,0	750,0	525,0	705,0
Lösung [kg]	355,6	748,4	447,4	609,5
Verhältnis Lösung/ MgO [-]	0,948	0,998	0,852	0,864
Rückprall [kg]	716,0	1495,0	1148,0	1404,0
Rückprall [%]	31,6	33,0	37,1	33,9

6.5.4.3 Auswertung Bohrkern

Am GSBV3 wurden insgesamt 42 Kerne mit 32 Bohrmeter entnommen. Die Lage der einzelnen Bohrungen ist in Abbildung 108 zu sehen. Mit dem Bohren wurde bereits einen Tag nach dem Spritzende der letzten Schicht begonnen, um die Kerne für die Festigkeitsprüfung 3 Tage nach Spritzende zu prüfen.

In der Abbildung ist außerdem das Messfeld der BAM für die Ultraschalluntersuchungen enthalten. Die Bohrungen innerhalb dieser Fläche (B43, B44, B45) wurden erst nach der Ultraschallprüfung ausgeführt.

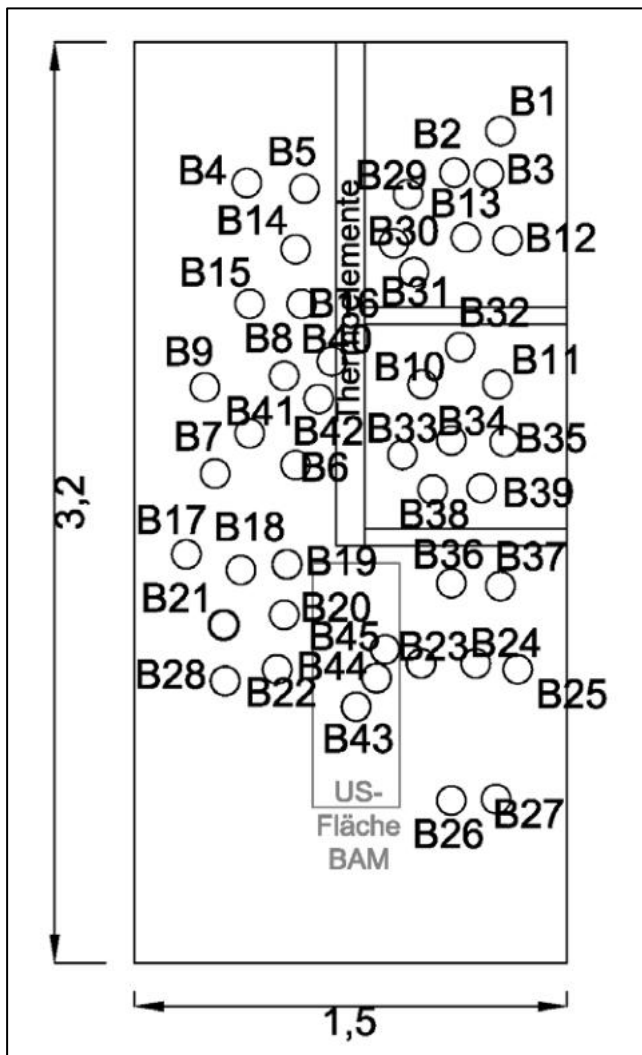


Abbildung 108: Spritzbetonfläche des GSBV3 mit den Kernbohrungen

In Abbildung 109 und Abbildung 110 sind einige der Bohrkerne in einer Übersicht dargestellt, sodass sich jeweils am linken Rand die jüngste Schicht 4 befindet und die Schichtgrenzen auf einer Linie liegen. Bei allen Kernen gibt es eine auffällige Hell-Dunkel-Maserung. An den meisten Kernen sind die Betonierabschnittsgrenzen deutlich an einem schmalen, sehr dunklen Bereich zu erkennen, wie aus Abbildung 110 hervorgeht. Die BAG stellen hier keine Schwächezone dar, da beim Bohren und Herausbrechen der Kerne aus dem Bohrloch diese nicht vermehrt an den BAG gebrochen sind. An vielen Bruchflächen ist das Material eher trocken, wie beispielsweise in Abbildung 111 zu sehen ist. An den Kernen sind nur wenige Fehlstellen (Risse, Lunker) vorhanden.

Die Hell-Dunkel-Maserung und die trockenen Bruchflächen wurden wahrscheinlich durch die ungleichmäßige Zufuhr des Trockengemisches verursacht. Das eckige Salzkorn rieselt schlechter als das runde Quarzkorn, sodass das Trockengemisch bzw. insbesondere das Salz vom Trichter in die einzelnen Rotorkammern der Spritzmaschine nicht gleichmäßig transportiert wurde und somit die Kammern unterschiedlich gefüllt waren. An der Spritzdüse kommen dann diese unterschiedlich großen Portionen Trockengemisch an und kommen mit der gleichmäßig zugeführten Lösung in Kontakt. Das aufgebraute Spritzgut unterliegt sehr kurzzeitigen Schwankungen (wenige Sekunden) beim Lösung/MgO-Verhältnis. Bei geringerer Zufuhr von Trockengemisch (als nötig, um das geplante Lösung/MgO-Verhältnis zu erreichen)

wird das Spritzgut zu nass und wirkt dunkler. Bei höherer Zufuhr des Trockengemisches wird das Spritzgut zu trocken und erscheint heller.



Abbildung 109: Überblick Kerne des GSBV3 (Auswahl: B1 bis B7)



Abbildung 110: Überblick Kerne des GSBV3 (Auswahl: B17 bis B27)



Abbildung 111: Bruchfläche mit trockenem Bereich am Bohrkern B3 des GSBV3

6.5.4.4 Auswertung Festigkeit

Frühfestigkeit

Um die Festigkeitsentwicklung von jungem Spritzbeton zu bewerten, wurde ein Penetrometer nach DIN EN 14488-2 ([17]) verwendet. Mit dem Penetrometer wurde der Eindringwiderstand des Frischbetons gemessen, aus dem sich über eine gerätespezifische Umrechnung die Druckfestigkeit berechnen lässt. Nach 10 Minuten bis 4,5 Stunden nach Spritzende wurden je Zeitpunkt 10 Einzelwerte (Eindringwiderstand) über die gesamte Spritzfläche genommen, gemittelt und in die Druckfestigkeit umgerechnet. In Abbildung 112 ist die Entwicklung der Frühfestigkeit je Schicht dargestellt.

Bei allen Schichten lag der Anfangswert nach 10 bzw. 20 Minuten zwischen 0,1 MPa und 0,16 MPa. Über die nächsten knapp 2 Stunden nahm die Festigkeit stetig zu. Bei den Schichten 2 und 4 stieg die Festigkeit zwischen 2 und 3 Stunden sehr schnell und stark auf über 0,5 MPa an. Bei den Schichten 1 und 3 stieg die Festigkeit deutlich langsamer an und erreichte nach 4,5 Stunden eine Festigkeit von etwa 0,4 MPa. Diese Unterschiede können zum einen auf die unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten zurückgeführt werden, da die Schichten 2 und 4 wesentlich dicker waren und so mehr Betonmasse eine höhere Abbindewärme erzeugte. Zum anderen wurden die Schichten 1 und 3 auf einen kalten bzw. abgekühlten Untergrund gespritzt, während die Schichten 2 und 4 auf den noch warmen, am Vortag gespritzten Beton aufgetragen wurden.

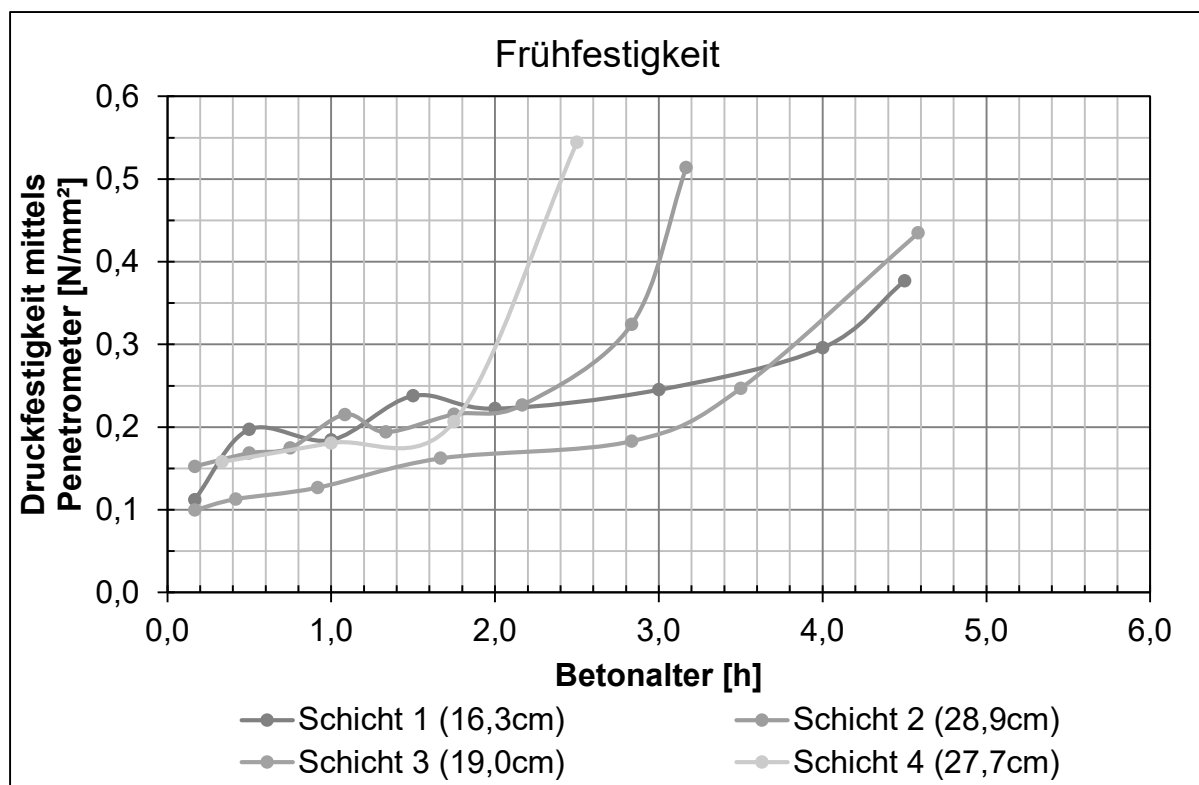


Abbildung 112: Frühfestigkeit der einzelnen Schichten beim GSBV3

Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 20 cm nach 3 Tagen, 8 bzw. 9 Tagen, 14 Tagen und 28 Tagen bestimmt. Die abgedrückten Proben stammen aus verschiedenen Schichten. In Tabelle 59 sind die Einzelwerte zur einaxialen Druckfestigkeit enthalten. In Tabelle 60 sind jeweils Mittelwert,

Minimum, Maximum und Standardabweichung der einaxialen Druckfestigkeit je Prüfalter zusammengefasst.

Nach 3 Tagen betrug die mittlere einaxiale Druckfestigkeit bereits 28,4 MPa, nach 8 bzw. 9 Tagen verblieb sie bei 28,5 MPa, nach 14 Tagen stieg sie gering auf 31,0 MPa. Nach 28 Tagen stieg die einaxiale Druckfestigkeit nochmals auf 33,1 MPa an.

Bei allen Prüfaltern lag der Minimalwert zwischen 22 MPa und 27 MPa, während der Maximalwert mit zunehmendem Alter von 31,5 MPa nach 3 Tagen auf 45 MPa nach 28 Tagen anstieg.

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper lag zwischen 1,85 g/cm³ und 1,96 g/cm³ und im Mittel bei 1,91 g/cm³.

In Abbildung 113 ist die einaxiale Druckfestigkeit über die Tiefe für alle Proben bzw. alle Prüfalter dargestellt.

In Abbildung 114 ist die einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Prüfalters dargestellt.

Tabelle 59: Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV3

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B6-2	3/4	13,5	3	29,0	1,88
B2-2	3/4	27,0	3	26,9	1,89
B5-1	3/4	27,0	3	27,8	1,89
B1-1	3/4	22,0	3	26,9	1,89
B7-1	3/4	12,0	3	31,5	1,91
B2-3	1/2	64,0	9	32,8	1,94
B1-2	1/2	64,5	9	35,6	1,94
B5-2	1/2	62,5	9	26,2	1,94
B12-2	3/4	21,0	8	32,0	1,90
B16-2	3/4	15,0	8	30,1	1,91
B13-2	3/4	16,0	8	22,5	1,89
B11-3	3/4	14,0	8	24,9	1,87
B9-2	3/4	31,0	8	24,2	1,87
B9-3	1/2	62,0	14	36,6	1,92
B15-1	1/2	80,5	14	33,3	1,94
B13-2	1/2	62,2	14	35,1	1,93
B16-3	1/2	70,5	14	30,2	1,92
B24-2	3/4	13,0	14	25,0	1,90
B26-2	3/4	12,0	14	30,5	1,90
B18-2	3/4	11,5	14	28,3	1,91
B20-1	3/4	28,0	14	31,9	1,90
B17-2	3/4	23,5	14	31,6	1,90
B22-2	3/4	38,5	14	35,9	1,93
B27-2	3/4	18,0	14	22,3	1,87
B33-1	1/2	77,0	28	34,2	1,93
B41-2	1/2	74,0	28	32,1	1,92
B38-2	1/2	66,0	28	45,0	1,95
B37-2	1/2	69,0	28	42,3	1,95
B29-1	1/2	68,5	28	35,5	1,93
B33-2	3/4	17,5	28	30,9	1,90
B35-2	3/4	13,0	28	25,4	1,88
B41-3	3/4	11,5	28	31,6	1,90
B38-1	3/4	22,5	28	28,2	1,88
B31-2	3/4	31,5	28	26,0	1,90

Tabelle 60: Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV3

Nach ... Tagen	3	8/9	14	28
Minimalwert [MPa]	26,9	22,5	22,3	25,4
Maximalwert [MPa]	31,5	35,6	36,6	45,0
Gemittelte Festigkeit [MPa]	28,41	28,54	30,97	33,13
Standardabweichung [MPa]	1,73	4,43	4,24	6,38
Anzahl Einzelwerte [-]	5	8	11	10

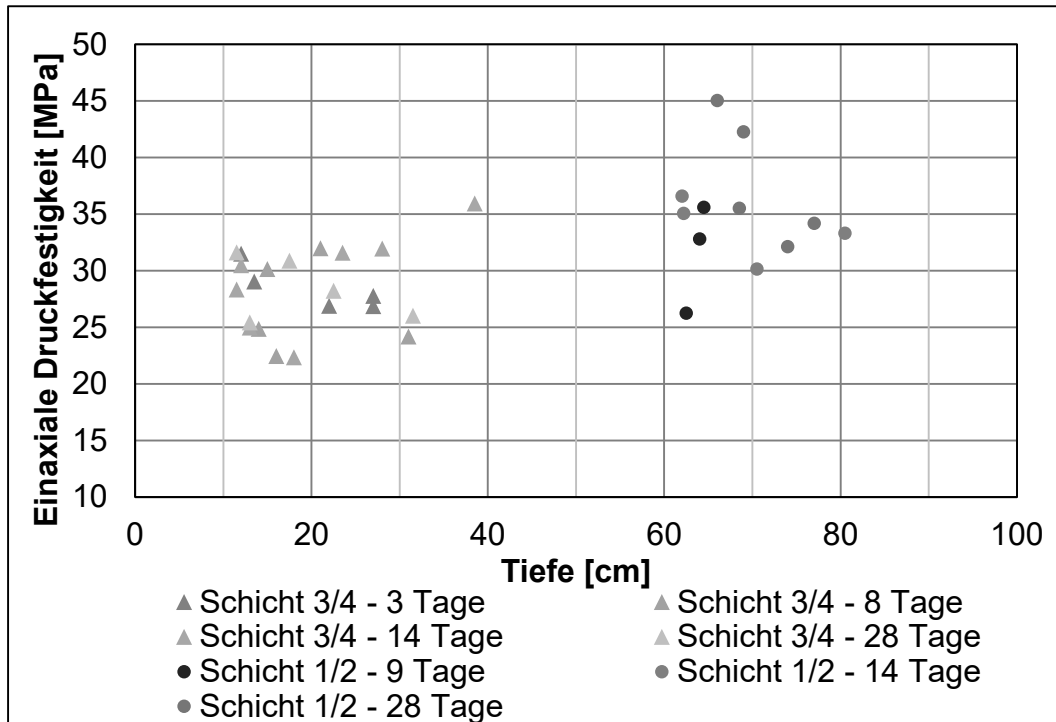


Abbildung 113: Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV3 über die Tiefe

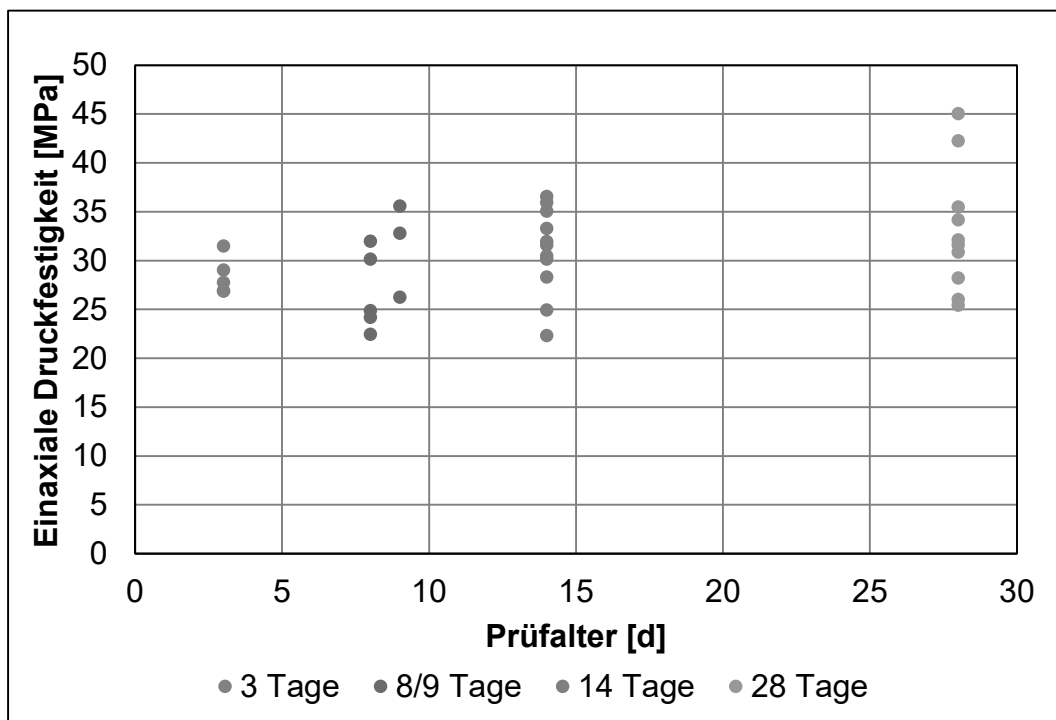


Abbildung 114: Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV3 in Abhängigkeit des Prüfdauer

Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 10 cm nach 3 Tagen, 8 bzw. 9 Tagen, 14 Tagen und 28 Tagen bestimmt. Die abgedrückten Proben stammen aus verschiedenen Schichten. In Tabelle 61 sind die Einzelwerte zur Spaltzugfestigkeit enthalten. In Tabelle 62 sind jeweils Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung der Spaltzugfestigkeit je Prüfalter zusammengefasst.

Nach 3 Tagen betrug die Spaltzugfestigkeit im Mittel 4,0 MPa, nach 8 bzw. 9 Tagen 4,2 MPa, nach 14 Tagen stieg sie nochmal auf 4,7 MPa an. Nach 28 Tagen lag die mittlere Spaltzugfestigkeit bei 4,1 MPa.

Ähnlich zu der Druckfestigkeit ist auch bei der Spaltzugfestigkeit die Streuung zwischen Minimum und Maximum relativ hoch.

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper betrug zwischen 1,85 g/cm³ und 1,96 g/cm³ und lag im Mittel bei 1,91 g/cm³.

In Abbildung 115 ist die Spaltzugfestigkeit über die Tiefe für alle Proben bzw. alle Prüfalter dargestellt.

In Abbildung 116 ist die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit des Prüfalters dargestellt.

Tabelle 61: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV3

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B6-1	3/4	38,0	3	5,2	1,91
B4-1	3/4	11,5	3	4,4	1,91
B2-1	3/4	8,0	3	3,0	1,86
B1-2	3/4	38,0	3	3,6	1,89
B4-2	3/4	20,0	3	3,8	1,94
B6-3	1/2	88,0	9	4,3	1,95
B3-1	1/2	62,5	9	4,0	1,91
B7-2	1/2	84,0	9	3,4	1,95
B9-1	3/4	12,0	8	4,4	1,88
B8-1	3/4	8,0	8	3,8	1,85
B13-1	3/4	41,5	8	5,4	1,93
B11-2	3/4	34,0	8	4,2	1,89
B12-3	3/4	43,0	8	4,0	1,90
B11-1	1/2	54,0	14	6,3	1,96
B10-1	1/2	66,0	14	4,5	1,92
B12-1	1/2	71,0	14	5,1	1,94
B8-2	1/2	67,5	14	4,8	1,94
B16-1	1/2	81,5	14	5,3	1,94
B14-1	1/2	69,0	14	4,5	1,93
B24-1	3/4	35,0	14	4,6	1,89
B26-1	3/4	41,5	14	4,5	1,88
B22-1	3/4	17,5	14	4,1	1,89
B18-1	3/4	32,0	14	4,0	1,89
B27-1	3/4	37,5	14	4,3	1,90
B17-1	3/4	28,5	14	3,8	1,90
B35-1	1/2	69,5	28	4,8	1,91
B41-1	1/2	59,0	28	4,2	1,94
B31-3	1/2	59,0	28	3,5	1,95
B31-4	1/2	69,0	28	4,7	1,94
B39-1	1/2	87,5	28	3,4	1,93
B33-3	3/4	40,0	28	3,9	1,91
B38-3	3/4	7,5	28	3,7	1,92

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B41-4	3/4	30,0	28	4,6	1,89
B37-1	3/4	15,0	28	4,5	1,90
B31-1	3/4	16,5	28	3,3	1,91

Tabelle 62: Spaltzugfestigkeit an Kernen des GSBV3

Nach ... Tagen	3	8/9	14	28
Minimalwert [MPa]	3,0	3,4	3,8	3,3
Maximalwert [MPa]	5,2	5,4	6,3	4,8
Gemittelte Festigkeit [MPa]	4,00	4,18	4,65	4,07
Standardabweichung [MPa]	0,74	0,54	0,64	0,67
Anzahl Einzelwerte [-]	5	8	12	10

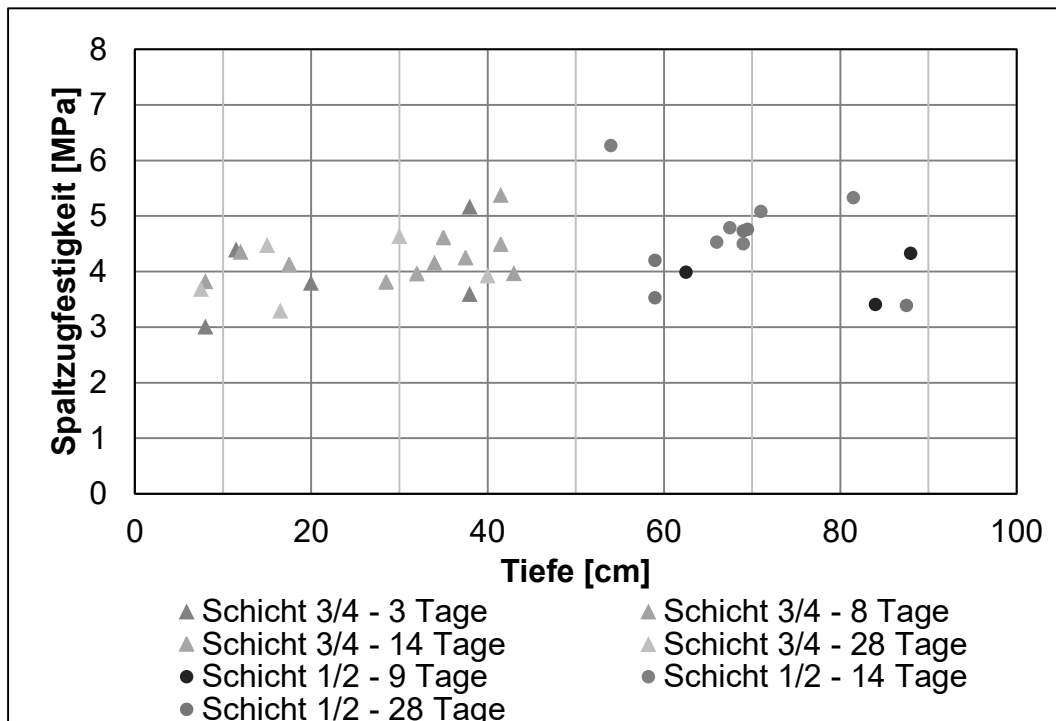


Abbildung 115: Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV3 über die Tiefe

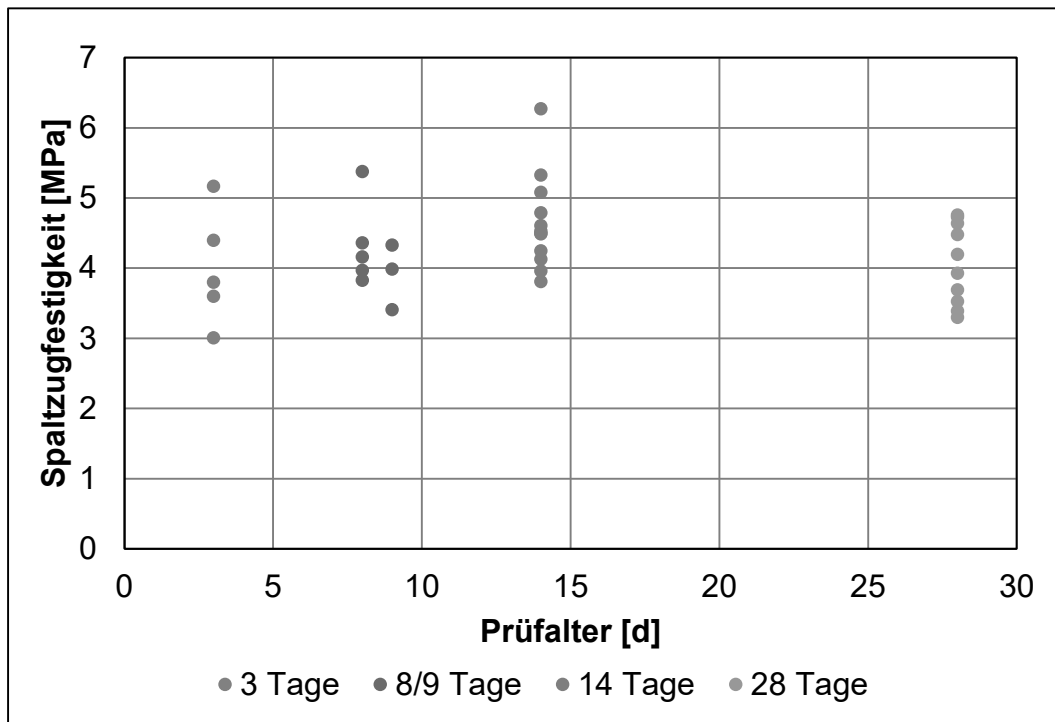


Abbildung 116: Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV3 in Abhängigkeit des Prüfalters

6.5.4.5 Hydro-mechanische Eigenschaften

Da beim „modifizierten“ Spritzbeton des GSBV3 erstmalig Salzgrus als Zuschlag verwendet wurde, sollten dessen hydro-mechanische Eigenschaften in Ergänzung der Standarduntersuchungen (u.a. Spaltzug- und einaxiale Druckfestigkeit durch TUBAF) durch ein Untersuchungsprogramm charakterisiert werden. Das in Abbildung 117 dargestellte Arbeitsprogramm bzw. das Probenraster an vier Kernbohrungen aus dem GSBV3 umfasst Untersuchungen zu den Matriceigenschaften (u.a. triaxiale Druckfestigkeit / Permeabilität) und Kontaktflächeneigenschaften (u.a. Haftzugversuche und Schertests). Gleichzeitig wurden auch 5 Proben für das HZDR vorbereitet.

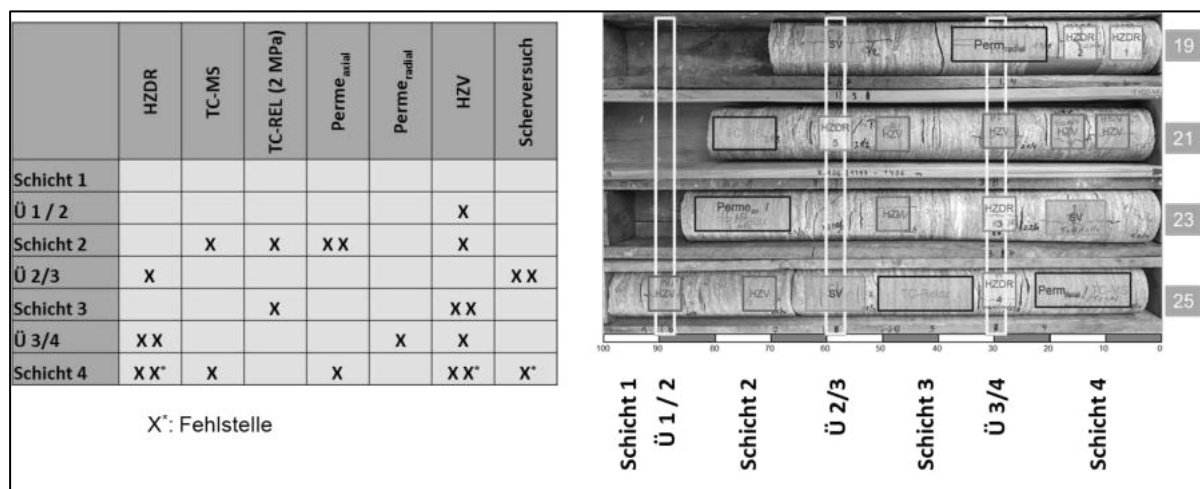


Abbildung 117: IfG-Untersuchungsprogramm an Proben des GSBV3

Haftzugeigenschaft (direkte Zugfestigkeit)

Zur repräsentativen Bestimmung der Haftzugeigenschaften (direkte Zugfestigkeit) von erbohrten Spritzbetonproben aus dem Spritzbetonkörper des GSBV3 standen 6 Prüfkörper zur Verfügung (Probenserie 753). Weil keine expliziten BAG erkennbar waren, wurden die erhaltenen Festigkeitskennwerte als Matriceigenschaften eingeordnet.

Die Ergebnisse der Einzelversuche (6 Proben) sind grafisch als Säulendiagramm sowie für die Auswertung der Stichprobe als Box-plot-Diagramm in Abbildung 118 dargestellt. Bei zwei Proben kam es zum Abriss am Stempel, wobei allerdings deren Festigkeitswerte am oberen Rand des Festigkeitsspektrums liegen.

Die Haftzugfestigkeit variiert zwischen 1,3 MPa bis 2,95 MPa mit einem Median von 2,58 MPa. Die Haftzugfestigkeit ist damit etwas höher als die Haftzugfestigkeit der Proben aus dem GSBV1 (vgl. Abschnitt 6.5.2.4).

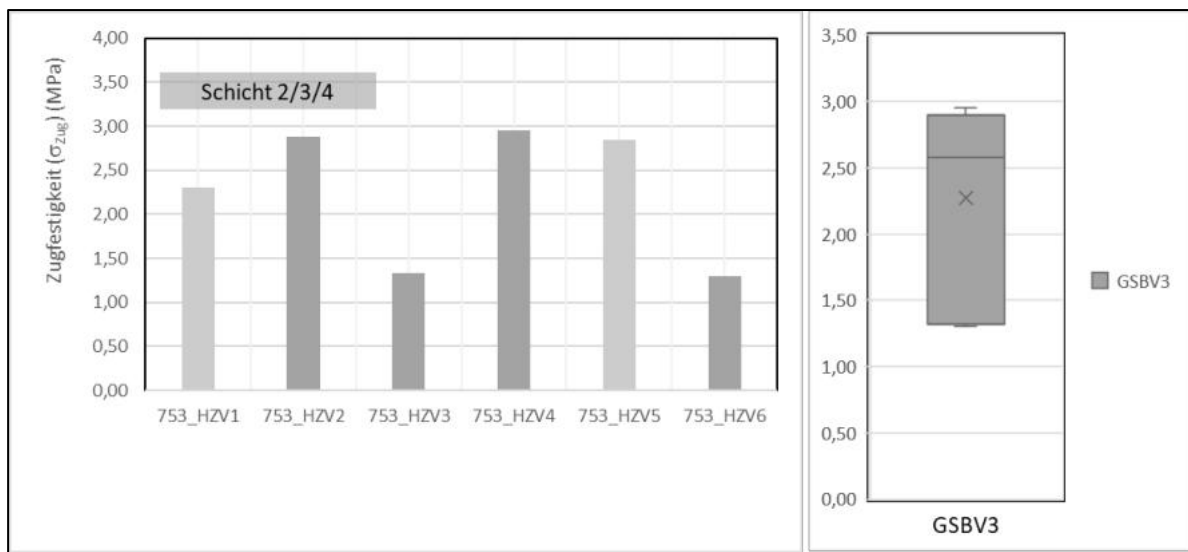


Abbildung 118: Direkte Zugfestigkeit an Proben des GSBV3 (Probenserie 753) aus den Schichten 2, 3 und 4 nach >28 Tagen Prüfalter: (li.) Einzelergebnisse – gelb markierte Säulen kennzeichnen Versagen an der Kontaktfläche Baustoff / Stahlstempel, (re.) Boxplot zur Darstellung der Streuung der verschiedenen Einzelversuche (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75, sowie als Strich der Median (0,5), und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x)

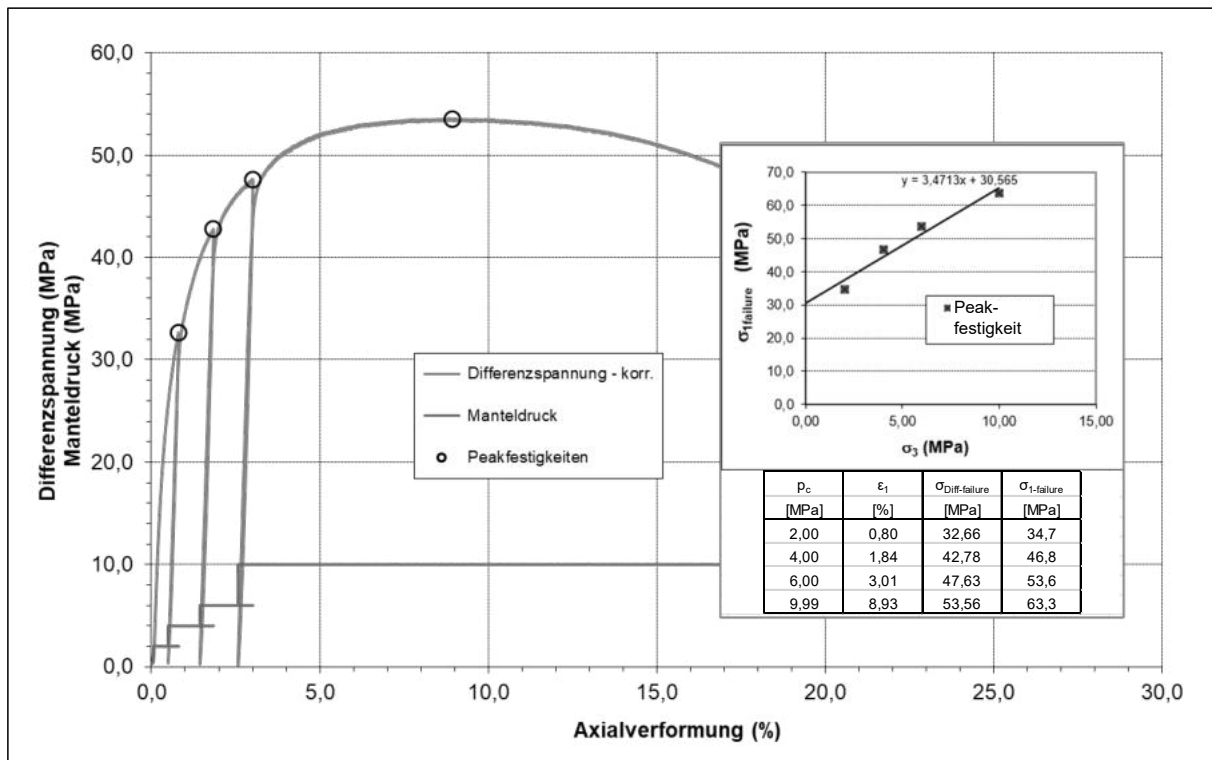


Abbildung 119: Festigkeits- und Verformungsverhalten im Mehrstufenversuch (732/TCM1): großes Diagramm: Spannungs-Verformungskurve σ_{Diff} vs. σ_{Ax} . Inset: Geomechanische Kennwerte aus den vier Belastungsstufen

Triaxiale Druckfestigkeit

In Ergänzung der einaxialen Festigkeit der TUBAF wurden in Analogie zur beschriebenen Methodik der Triaxialdruckfestigkeit in Anlage 1.6 Triaxialversuche an Zylinderproben aus dem GSBV3 als Mehrstufenversuche durchgeführt.

Beispielhaft für eine Probe (732/TCM1) ist in Abbildung 119 ein Mehrstufen-Festigkeitsversuch dargestellt. In den vier Belastungsstufen von $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$, 4 MPa , 6 MPa und 10 MPa wurde jeweils die Spitzenfestigkeit bestimmt und danach jeweils die Probe sofort entlastet, so dass keine größere Schädigung in die Probe eingetragen wurde. Damit liegen für vier Manteldrücke jeweils die Peakfestigkeiten vor, womit sich über die Darstellung der vorliegenden Spitzenfestigkeitsmesswerte im MOHR-COULOMB-Diagramm (σ_{IPeak} vs. σ_3) die Proben-spezifischen Festigkeitsparameter Kohäsion c und der Reibungswinkel ϕ ergeben.

Insgesamt liegen Ergebnisse von 3 Mehrstufentest vor, deren Ergebnisse in Tabelle 63 zusammengefasst sind.

Die erhaltenen MOHR-COULOMB-Geraden für die drei Proben sind in Abbildung 120 dargestellt. Aus den MOHR-COULOMB-Kurven können über Extrapolation die einaxialen Festigkeiten der Proben ($\sigma_{\text{1max-uni-axial}}$ (extrapoliert)) bestimmt werden, die zwischen 27 MPa und 35 MPa variieren. Dieser Streubereich stimmt sehr gut mit der Festigkeit aus den einaxialen Druckversuchen der TU BAF überein (vgl. Kap. 6.5.4.4).

Tabelle 63: Auswertung triaxiale Mehrstufenversuche mit den entsprechenden Peak-Festigkeiten und MOHR-COULOMB-Parameter GSBV3 und GSBV4

p_c	ε_1	$\sigma_{\text{Diff-failure}}$	$\sigma_{1\text{-failure}}$	ϕ	C
(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(°)	(MPa)
<i>GSBV3_753_TCMS1</i>					
2,0	0,96	35,15	37,2	31,8	8,6
4,0	1,43	40,03	44,0		
6,0	2,01	44,09	50,1		
10,0	10,78	56,03	66,0		
<i>GSBV3_753_TCMS2</i>					
2,0	0,55	34,31	36,3	27,6	9,4
4,0	0,71	37,95	41,9		
6,0	0,90	41,21	47,2		
10,0	7,41	57,89	67,9		
<i>GSBV3_732_TCMS1</i>					
2,00	0,80	32,66	34,7	33,6	8,2
4,00	1,84	42,78	46,8		
6,00	3,01	47,63	53,6		
9,99	8,93	53,56	63,6		
<i>GSBV4_758_TCMS1</i>					
2,0	0,86	44,43	46,4	30,6	12,1
4,0	1,38	53,28	57,3		
6,0	1,69	55,82	61,8		
10,0	4,27	62,20	72,2		

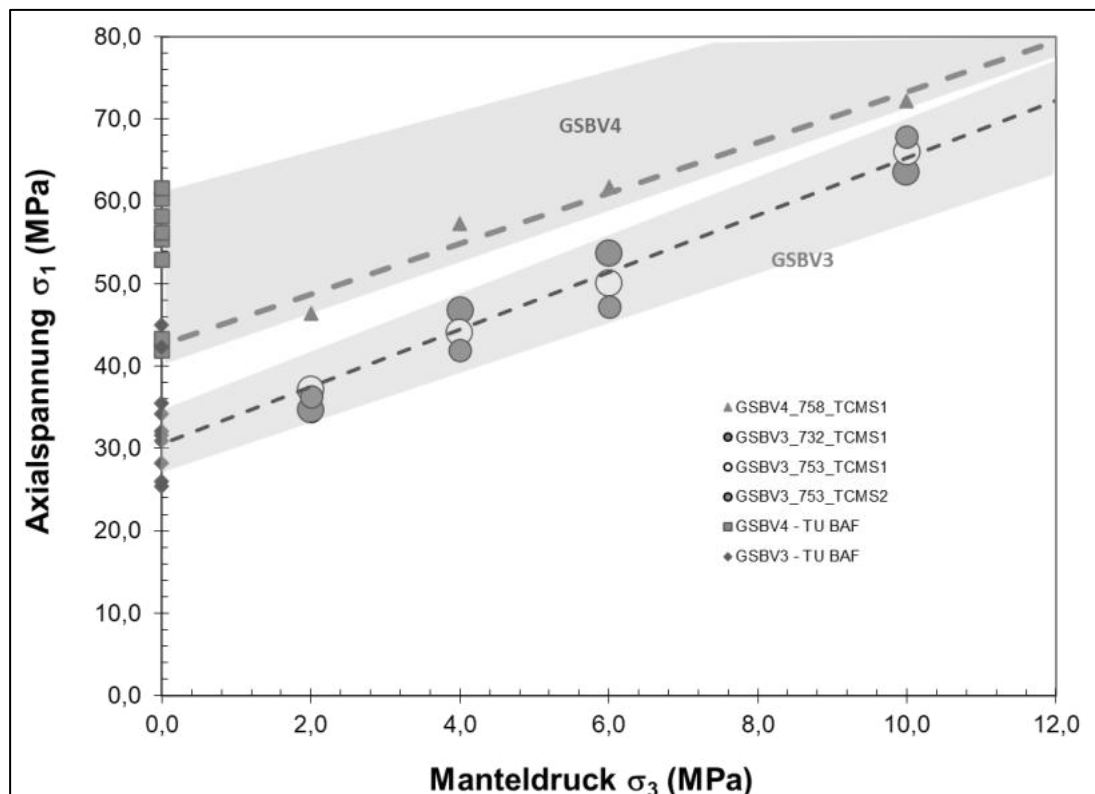


Abbildung 120: Triaxiale Festigkeit - MOHR-COULOMB-Diagramme für Proben aus dem GSBV3 und GSBV4. Zusätzlich ist die einaxiale Druckfestigkeit, wie sie standardmäßig von der TU BAF bestimmt wird (Festigkeit nach 28d), dargestellt.

Scherfestigkeit GSBV3 (Probenserie 732)

Da Spritzbeton schichtartig hergestellt wird, können sich Trennflächen sowohl an Spritzbetonübergängen als auch innerhalb einer Schicht potenziell ausbilden. Deshalb wurde an insgesamt 3 Proben die Matrix-Scherfestigkeit des abgebundenen Baustoffs bestimmt. Zur Festigkeitsbeschreibung wird erneut das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium verwendet, das hier die Abhängigkeit der in der Kontaktflächenebene wirkenden resultierenden Schubspannung τ_{res} von der senkrecht zur Kontaktfläche gerichteten Normalspannung σ_n beschreibt.

Für die Bestimmung der Scherfestigkeit der Spritzbetonmatrix wurde das MTS-Großschergerät des IfG eingesetzt, vgl. Anlage 1.8.

Beispielhaft für eine experimentelle Bestimmung dieser Parameter sind in Abbildung 121 die Ergebnisse eines 2-Stufenscherversuchs dargestellt, bei dem eine kompakte Spritzbetonprobe in zwei Belastungsstufen, jeweils mit unterschiedlicher Normalspannung, in Scherung belastet und dann abgeschert wird.

In der initialen Belastungsstufe ($\sigma_n = 0,5$ MPa) steigt mit fortschreitender Verformung der Scherwiderstand zunächst an, bis es mit Erreichen der Festigkeitsgrenze zu einem sprödebruchartigen Versagen, gefolgt von einem anschließenden Stick-Slip-Verhalten mit einem weiteren Festigkeitsabfall kommt (annähernder Übergang ins Restfestigkeitsniveau). Danach wurde die Normalspannung abgesenkt ($\sigma_n = 0,25$ MPa) und in dieser Laststufe ein weiterer Restscherfestigkeitskennwert bestimmt.

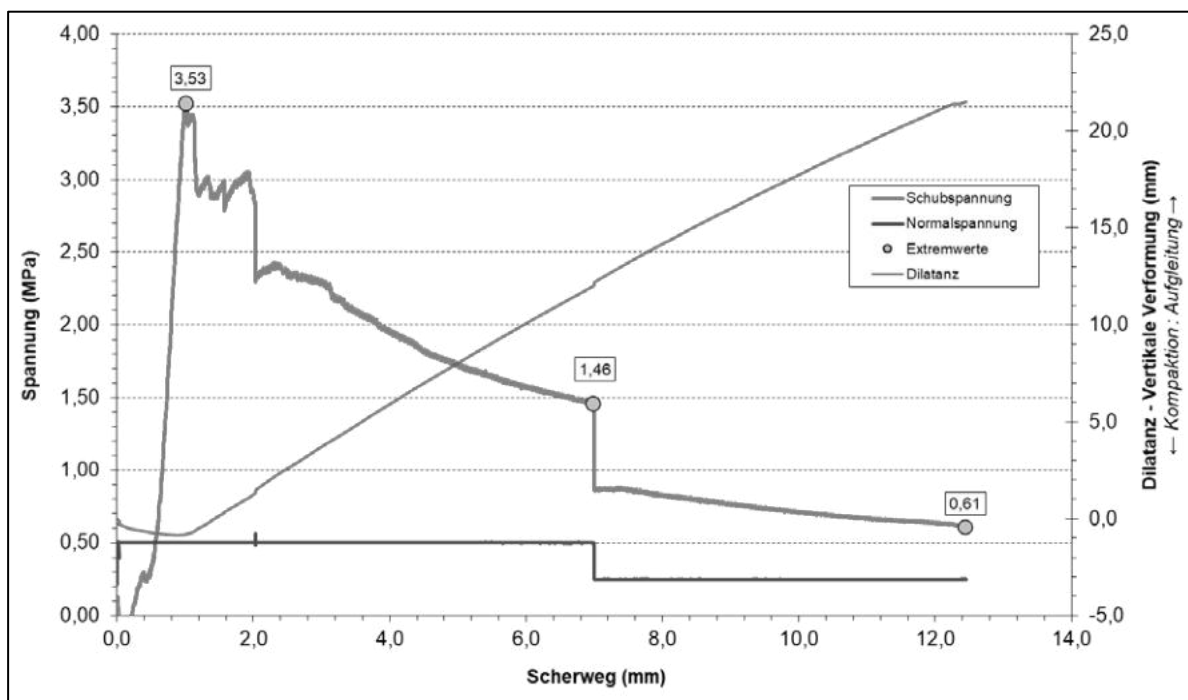


Abbildung 121: Zweistufenversuch zur Bestimmung der Scherfestigkeit der Spritzbetonmatrix einer Kernprobe aus dem GSBV3 - Exp. 732/SV1

Als Ergebnisse liegen die für eine Normalspannung definierten Peak- und die Restfestigkeit vor. Die entsprechenden Kennwerte der 3 Festigkeitsversuche (mit Normalspannungen zwischen $\sigma_n = 0,25$ und 4 MPa) sind in Tabelle 64 zusammengefasst bzw. in Abbildung 122 als Mohr-Coulomb-Diagramm dargestellt.

Über eine Regressionsanalyse wurden aus den Einzelwerten der Scherversuche die Mohr-Coulomb-Festigkeitsparameter einer potentiellen Scherfläche im MgO-Spritzbeton bestimmt

(bei der Restfestigkeit besteht die Prämisse, dass die Probe durchgeschert wird und keine Kohäsion vorliegt, $c = 0$):

$$\begin{aligned} \text{Peakfestigkeit:} & \quad \varphi_{\text{Trennfläche}} = 55^\circ & c_{\text{Trennfläche}} & = 2,87 \text{ MPa} \\ \text{Restfestigkeit:} & \quad \varphi_{\text{Trennfläche}} = 39^\circ & & \end{aligned}$$

Tabelle 64: Festigkeitskennwerte aus direkten Scherversuchen an der Spritzbeton-Matrix Spritzbeton (GSBV3):

Versuch	Stufe	Scherparameter	
		σ_n	τ_{res}
		MPa	MPa
GSBV3: 732/SV1	1 (Peak)	0,50	3,53
	1 (Rest)	0,50	1,46
	2 (Rest)	0,25	0,61
GSBV3: 732/SV2	1 (Peak)	1,00	4,34
	1 (Rest)	1,00	0,86
	2 (Rest)	0,75	0,50
GSBV3: 732/SV3	1 (Peak)	4,00	8,53
	1 (Rest)	4,00	3,12
	2 (Rest)	2,00	1,63

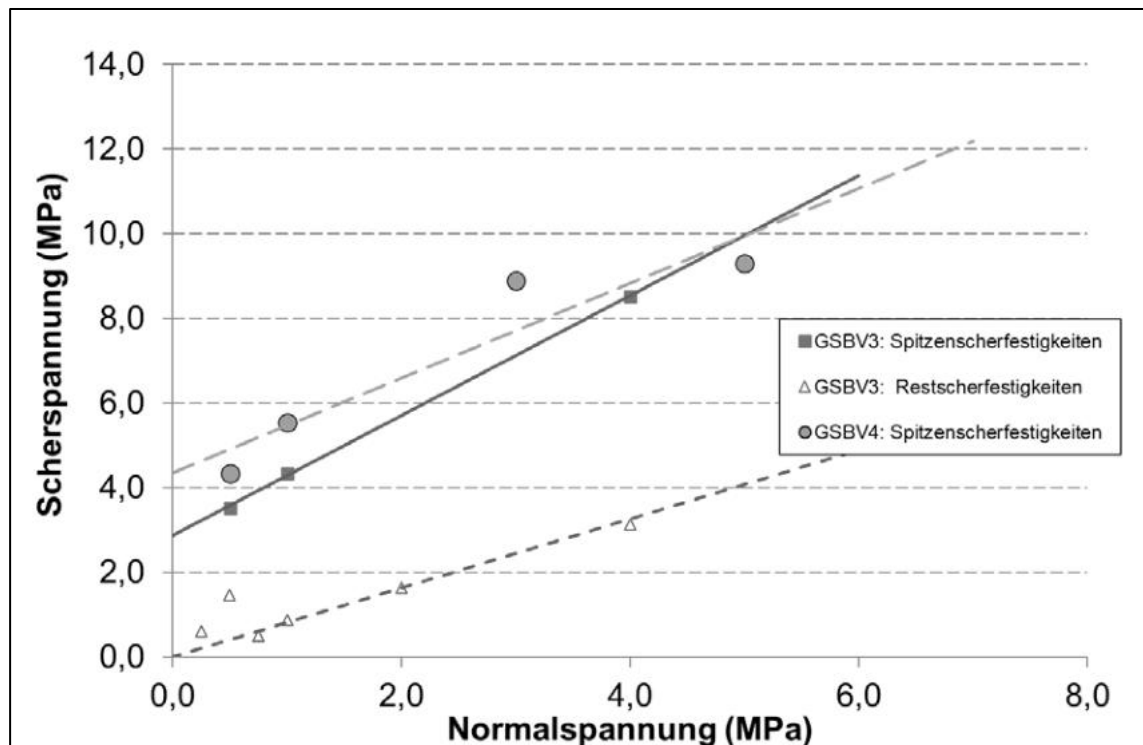


Abbildung 122: Mohr-Coulomb-Diagramm auf Basis von Schertests an Baustoff-Kernproben aus dem GSBV3 bzw. GSBV4

Relaxationstests GSBV3

Da der Zuschlag im Spritzbeton von granularem Silikatmaterial zu Steinsalz geändert wurde, bestand die Vermutung, dass beim neuen Baustoff auch signifikante plastische Verformungsanteile vorliegen können. Das würde bedeuten, dass der neue Spritzbeton-Baustoff neben belastungsabhängigen Effekten auch zeitabhängig kompaktiert (kriecht). Zur Quantifizierung bzw. für den Vergleich dieser Prozesse wurden Relaxationstests unter anfänglich hoher deviatorischer Belastung (80 % der Bruchfestigkeit) durchgeführt⁵. Die Durchführung der aufwendigen Relaxationstests ist in Anlage 1.6 beschrieben.

Zur Darstellung der Ergebnisse werden nachfolgend nur transformierte Kurven dargestellt, die eine Bewertung des von der Verformungsrate abhängigen Beanspruchungszustandes liefern. In Abbildung 123 sind links der jeweils auf den Ausgangsspannungszustand ($\dot{\sigma} = 1$) normierte Druckabfall dargestellt sowie rechts die über die Systemsteifigkeit über den Spannungsabfall in Verformungsraten transformierten Messkurven, d.h. der Tragwiderstand vs. Verformungsrate, dargestellt.

Der Vergleich der Messkurven in Abbildung 123 (links) zeigt einen exponentiellen Spannungsabfall, der innerhalb des Versuchszeitraums von > 2 d (Zeit im TZF) zwischen ca. 60% bis 48% der normierten Spannung liegt. Unter Berücksichtigung der Eigenverformung des geomechanischen Prüfsystems ergeben sich über die Kurventransformation in der halb-logarithmischen Darstellung (σ vs. $\log \dot{\epsilon}_{transf.}$) annähernd Geraden, die sich auf eine Restspannung unter in-situ relevanten Belastungsraten (hier: $\dot{\epsilon} = 10^{-10}$ 1/s) extrapolieren lassen.

Die extrapolierten Spannungen (Abbildung 123-re.) liegen in einem Bereich < 12 MPa bis ca. 17 MPa, wobei die Daten des GSBV4 sich gut einordnen (vgl. Kap. 6.5.5.5). Eine abschließende Bewertung unter Einbeziehung verschiedener Baustoffe erfolgt in Kap. 6.7.

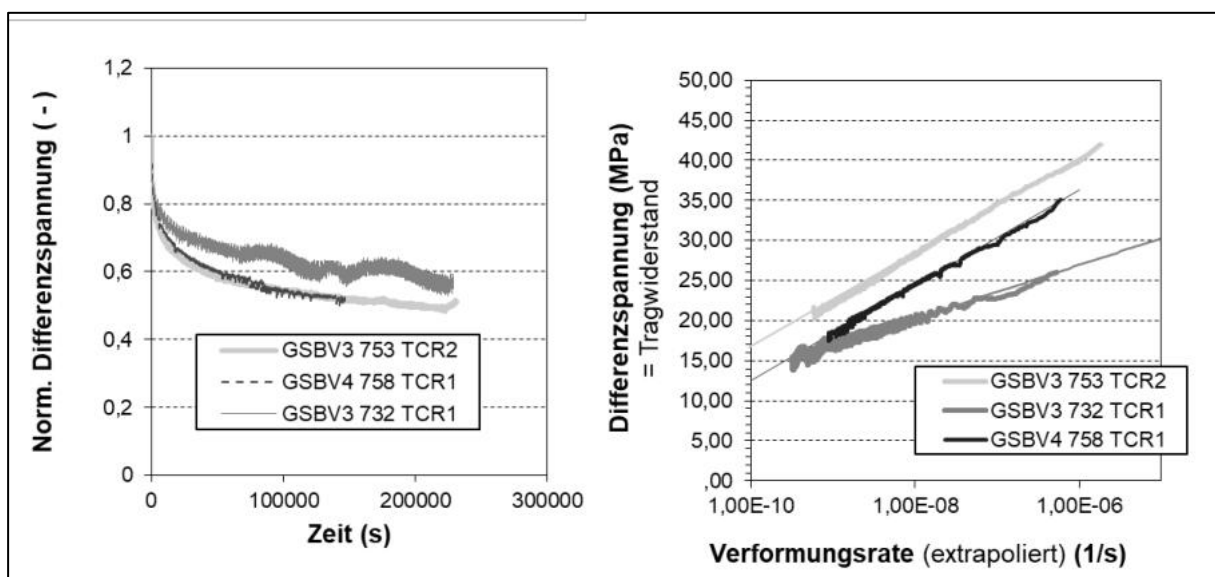


Abbildung 123: Relaxationsverhalten der GSBV3- und GSBV4-Proben; (li.) Spannungsabfall (normiert auf Startwert) vs. Zeit; (re.) Transformierter Spannungsverlauf vs. log Kriechrate

⁵ Wie Anlage 1.6 ausgeführt, dienen die hier durchgeführten Relaxationstests ausschließlich dem Vergleich zeitabhängiger Verformungseigenschaften im „Kurzzeitversuch“, wobei aus den ermittelten Relaxationskurven keine Quantifizierung des Kriechverhaltens eines Absperrbauwerkes möglich ist.

Permeabilitätstests

Die Permeabilität von Kernproben aus den GSBVs wurden in umfangreichen Untersuchungen bestimmt. Ergänzend dazu wurde vorlaufend zu den Festigkeitsprüfungen auch vom IfG als Indexversuche die Permeabilität an Kernproben senkrecht zu den Betonierabschnitten und parallel dazu bestimmt.

Beispielhaft sind in Abbildung 124 Ergebnisse eines Gasinjektionstests mit radialer Injektion, d.h. Gasfluss in Richtung der Spritzbeton-Schichtung, dargestellt. Es zeigte sich (in Bestätigung bereits vorliegender Ergebnisse), dass die Spritzbetonproben permeabel sind, wobei gleichzeitig mit zunehmender Standzeit bzw. Erhöhung der Einspannung die Permeabilität geringfügig abnahm:

- k_{init} ($\sigma_3 \approx \sigma_1 = 2 \text{ MPa}$): $1,9 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
- k_{end} ($\sigma_3 \approx \sigma_1 = 10 \text{ MPa}$, ca. 4 h Versuchszeit): $1,4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$

Ein Parallelversuch mit einer axialen Injektion, bei der der Gasdruck über Sinterplatten über die Stirnflächen der Betonprobe eingeleitet wurde, ergab (unter vergleichbaren Versuchsbedingungen) keine messbare Durchlässigkeit, obwohl der Gasdruck in der höchsten Einspannungsstufe bis auf 8 MPa erhöht worden war. Das bedeutet, dass in axialer Richtung des Bauwerks (senkrecht zu den Betonierabschnitten) die Permeabilität $k < 10^{-20} \text{ m}^2$ ist.

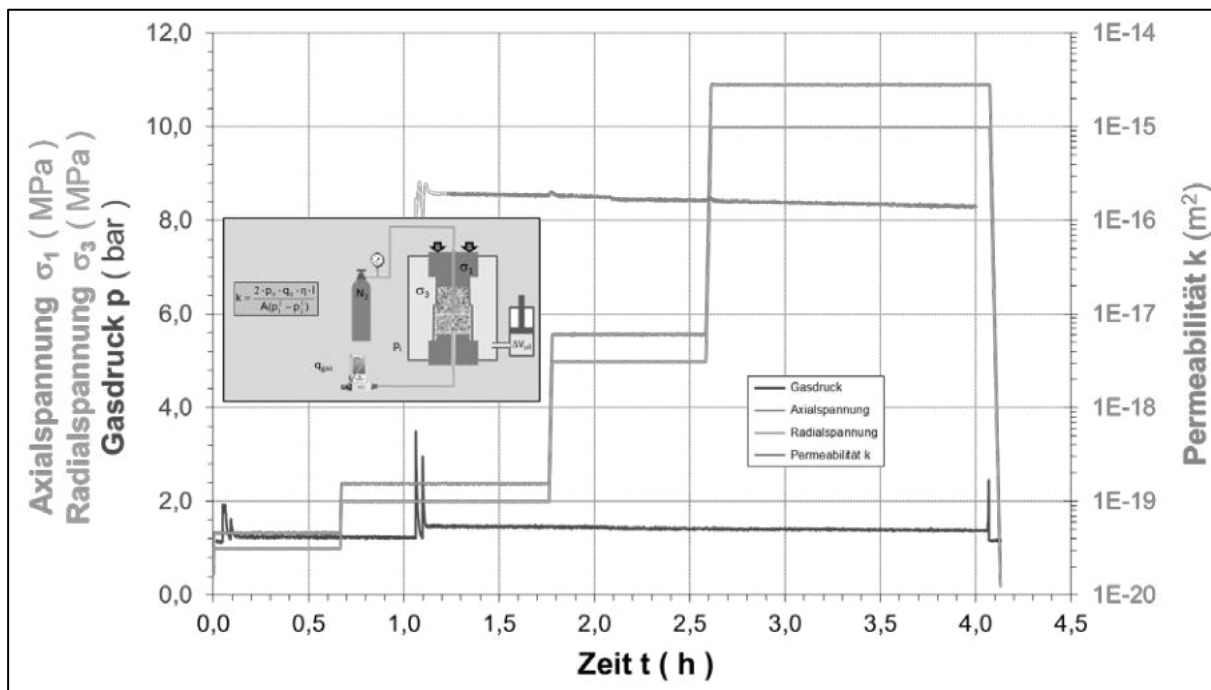


Abbildung 124: GSBV3 - Permeabilitätstest Kernprobe BK19-1 (Injektion von N₂ mit schrittweiser Erhöhung der Einspannung); das Inset zeigt schematisch die Permeabilitätsmessanordnung mit radialer Injektionsgeometrie über eine Zentralbohrung.

6.5.4.6 Permeabilitätsuntersuchungen in situ

Die in situ-Permeabilität wurde in der Bohrung B36 bestimmt (siehe Abbildung 108). Die Bohrung wurde im Trockenkernbohrverfahren unter Verwendung von Druckluft als Spülmedium erstellt. Das Kernmaterial aus der Bohrung bildete die Probe (siehe Kapitel 6.8). Das Programm der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Gas ist in Anlage 3.2.3 dargestellt.

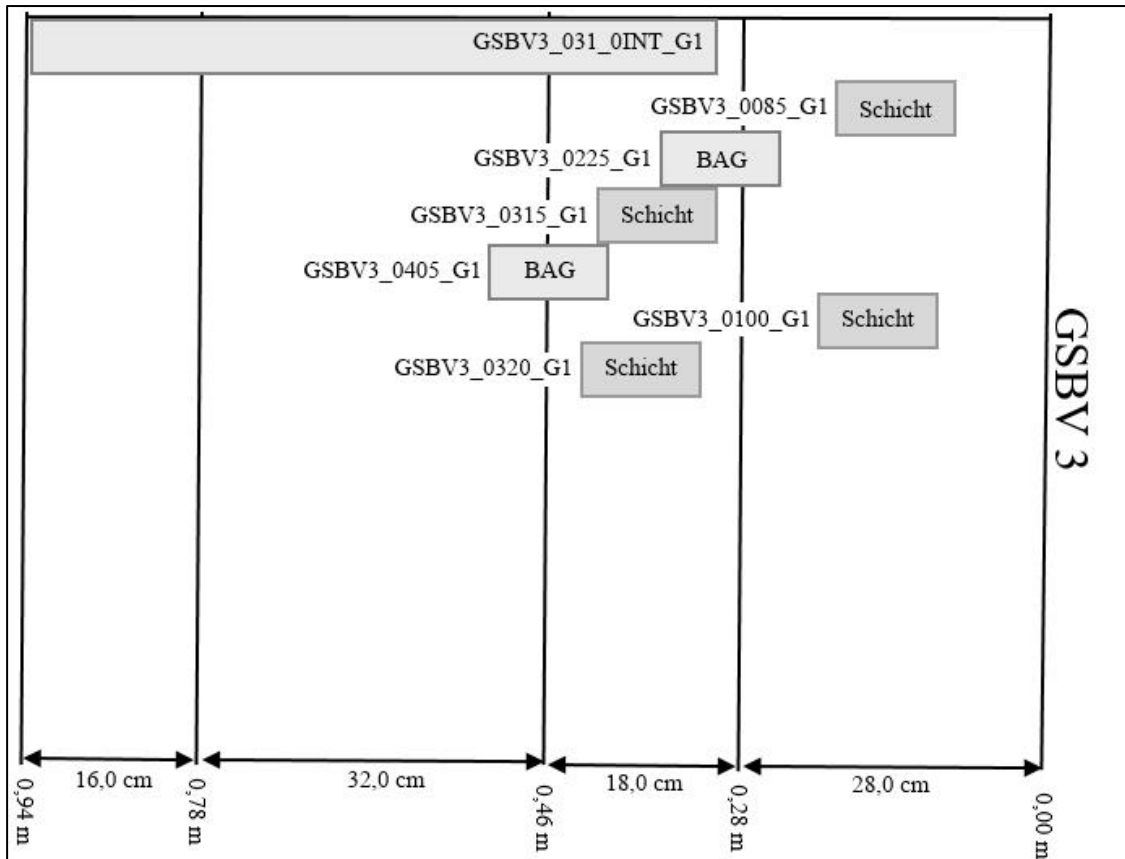


Abbildung 125: Schematische Positionierung der Messpunkte für die Permeabilitätsmessungen im GSBV3

Die Permeabilität an dem Spritzbetonkörper GSBV3 wurden im Zeitraum vom 03.02.2021 bis 10.02.2021 in der Grube Teutschenthal untersucht.

Trotz mehrfacher Versuche und der Kontrolle der Dichtheit und des Dichtsitzes der Packerausrüstung in der Bohrung war ein Druckimpuls an den vorgesehenen Messpunkten nicht möglich (s. Tabelle 65). Ein wesentlicher Abstrom des Gases wurde durch die BAG hervorgerufen.

Tabelle 65: Ergebnisübersicht GSBV3 (Bohrung B31: L=0,94 m; a=0,0°; d=100 mm)

Messpunkt- bezeichnung	Prüfdruck	Prüfmedium	Teufe OK	Teufe UK	Teufe MP	Permeabilität	Bemerkung
[-]	[MPa]	[-]	[m v. AP]			[m ²]	[-]
GSBV3_0310_ INT_G1	0,5	Gas	0,310	0,625	0,940	kein Druckaufbau möglich	integral Bohrung
GSBV3_0085_G1	0,5		0,085	0,140	0,195	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 40 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton
GSBV3_0100_G1	0,5		0,100	0,155	0,210	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 62 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton
GSBV3_0225_G1	0,5		0,225	0,280	0,335	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 109 s auf Luftdruck gefallen	BAG
GSBV3_0315_G1	0,5		0,315	0,370	0,425	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 74 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton
GSBV3_0320_G1	0,5		0,320	0,375	0,430	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 94 s auf Luftdruck gefallen	Spritzbeton
GSBV3_0405_G1	0,5		0,405	0,460	0,515	Prüfdruck (ca. 5,0 bar _{rel}) innerhalb von ca. 36 s auf Luftdruck gefallen	BAG

6.5.4.7 Auswertung Temperaturentwicklung

Mit den insgesamt 48 in den Spritzbetonkörper eingebauten Thermoelementen wurde die Temperatur beim Spritzen und Abbinden des Spritzbetons aufgezeichnet. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 126 dargestellt.

In der Tabelle 66 ist je Schicht für ausgewählte Zeitpunkte (zu Spritzbeginn, zum Spritzende und das Maximum) die Temperatur in der Schichtmitte im Zentrum des Spritzbetonkörpers angegeben.

Die erste Schicht wurde am 10.11.2020 mit einer mittleren Schichtmächtigkeit von 16,3 cm gespritzt. Die Untergrundtemperatur lag zu Spritzbeginn bei 24,4 °C entsprechend der Umgebungstemperatur. Bis zum Spritzende lag die Temperatur in der Schichtmitte ebenfalls bei 24,4 °C. Die Maximaltemperatur betrug 53,4 °C und wurde etwa 12 Stunden nach Spritzende gemessen. Am Folgetag wurde die zweite Schicht mit einer Mächtigkeit von 28,9 cm gespritzt. Zu Spritzbeginn lag die Untergrundtemperatur bei 34,0 °C. Die erste Schicht war zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgekühlt. Zum Spritzende herrschte in der Schichtmitte eine Temperatur von 38,6 °C. Nur sechs Stunden nach dem Spritzende wurde die Maximaltemperatur von 98,5 °C in der Schichtmitte gemessen. Am nächsten Tag wurde an dem bisher hergestellten Spritzbetonkörper ein waagerechter Riss über die gesamte Breite in der Mitte des Körpers festgestellt, der durch Temperaturspannungen hervorgerufen wurde. Bis zum Spritzen der dritten Schicht gab es eine viertägige Pause, in der der Beton auskühlen konnte. Die dritte Schicht wurde am 16.11.2020 mit einer Mächtigkeit von 18,9 cm gespritzt. Zum Spritzende herrschte in der Schichtmitte eine Temperatur von 29,4 °C. Nach 11,5 Stunden wurde die Maximaltemperatur von 56,0 °C gemessen. Bis zum Spritzbeginn der vierten Schicht war der Beton noch nicht ausgekühlt und so betrug die Untergrundtemperatur 36,9 °C. Zum Spritzende betrug die Temperatur in der Schichtmitte 37,5 °C. Ähnlich zu Schicht

2 wurde nach nur sechs Stunden die Maximaltemperatur von 94,8 °C erreicht. Auch bei dieser Schicht gab es wieder einen waagerechten Riss in der Mitte des Spritzbetonkörpers. Erst nach etwa 5 Tagen war der Beton auf etwa 27 °C abgekühlt.

Die hohe Temperatur von über 80 °C sollte vermieden werden, da es einerseits zu Temperaturspannungen und Rissen im Beton kommen kann und andererseits kann sich die Hochtemperaturphase 9-1-4 ($9 \text{ Mg(OH)}_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$) bilden.

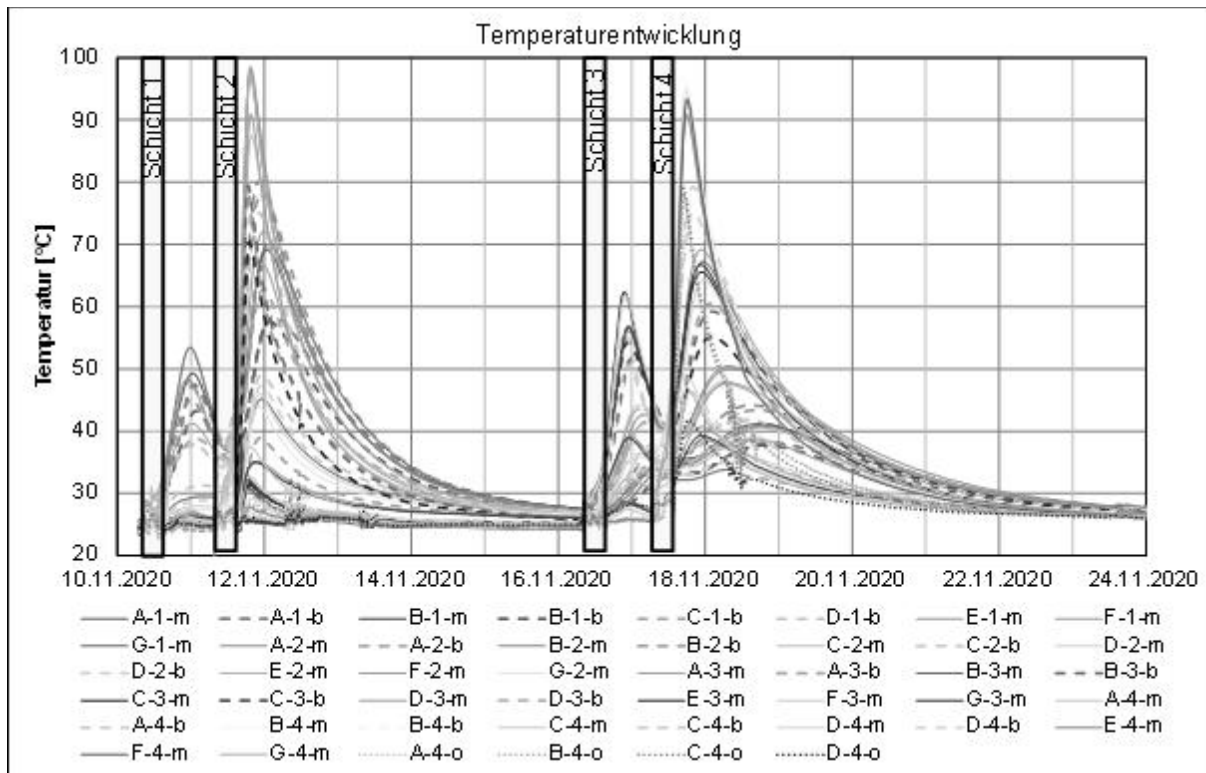


Abbildung 126: Temperaturentwicklung beim GSBV3

Tabelle 66: Auswertung Temperatur in der Mitte des Spritzbetonkörpers beim GSBV3

Schicht	1	2	3	4
Untergrundtemp. zu Spritzbeginn [°C]	24,4	34,0	24,9	36,9
Temp. zu Spritzende [°C]	24,4	38,6	29,4	37,5
max. Temp. [°C]	53,4	98,5	56,0	94,8
Δt (Spritzende – max. der Temperatur) [h]	12,2	6,0	11,5	6,4

In Abbildung 127 ist die Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Mächtigkeit der Spritzschichten dargestellt. Hier lässt sich eindeutig erkennen, dass mit zunehmender Schichtmächtigkeit auch die maximale Abbinde-temperatur im Spritzbetonkörper ansteigt. Bei Schicht 1 und Schicht 3 mit einer Mächtigkeit von 16 cm bzw. 19 cm wurde eine maximale Abbinde-temperatur von ca. 60 °C erreicht, bei Schicht 2 und 4 mit einer Mächtigkeit von knapp 30 cm von knapp 100 °C.

In Abbildung 128 ist die Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Zeit zwischen Spritzende bis zum Erreichen der Maximaltemperatur dargestellt. Hier zeigt sich, dass je höher die Maximaltemperatur in der Schichtmitte beim Abbinden ist, desto kürzer ist die Zeit, die zwischen Spritzende und Erreichen der Maximaltemperatur liegt. Bei mächtigen Schichten und damit hoher maximaler Abbindetemperatur wird das Temperaturmaximum (erwartungsgemäß) schneller erreicht als bei dünneren Schichten. Bei den knapp 30 cm mächtigen Schichten wurde das Temperaturmaximum bereits nach etwa 6 Stunden erreicht, bei den deutlich dünneren Schichten 2 und 4 erst nach etwa 12 Stunden.

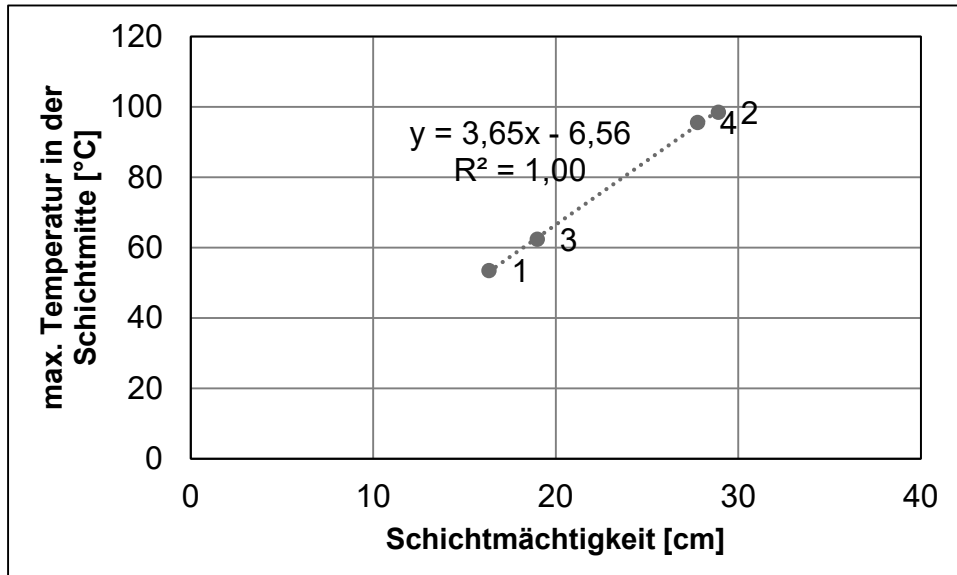


Abbildung 127: Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Schichtmächtigkeit beim GSBV3

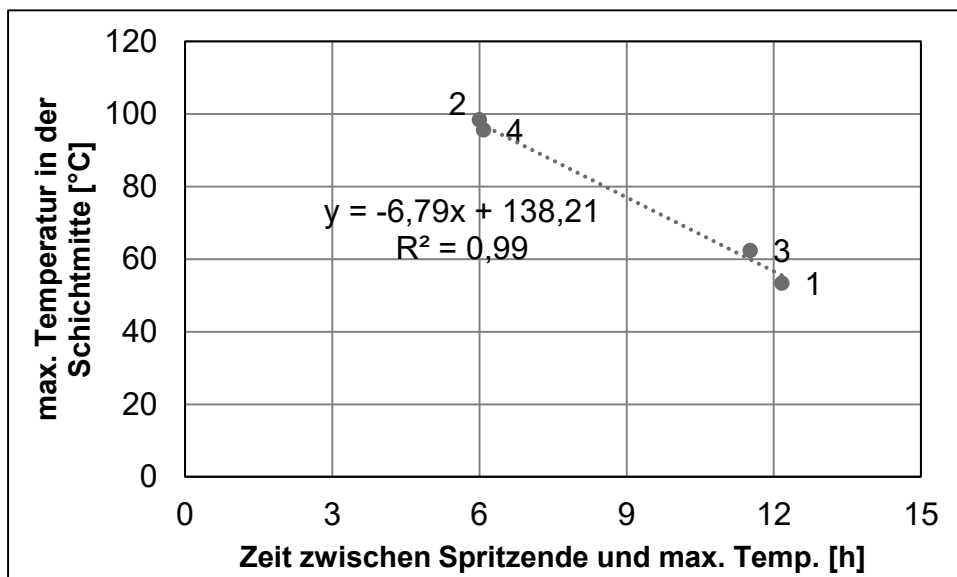


Abbildung 128: Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Zeit zwischen Spritzende und Erreichen der Maximaltemperatur beim GSBV3

6.5.4.8 Zusammenfassung GSBV3

Für den GSBV3 wurde erstmals Salzzuschlag für einen in situ Spritzbetonversuch eingesetzt. Der Versuchsaufbau war der gleiche wie beim GSBV1.

Aufgrund der besseren Klebrigkeit des Spritzbetons mit Salzzuschlag wurden nur vier Schichten mit Mächtigkeiten zwischen 16 cm und 29 cm geplant und gespritzt.

Das Lösung-MgO-Verhältnis der einzelnen Schichten lag zwischen 0,85 und 1,0. Der Lösungsbedarf für den Spritzbeton mit Salzzuschlag war etwas höher als bei Quarzzuschlag. Das Spritzen von knapp 30 cm dicken Schichten war problemlos möglich, jedoch war mit der hohen Schichtmächtigkeit auch eine hohe Abbinde­temperatur verbunden. So wurde eine maximale Temperatur von 98,5 °C gemessen, was zu Rissen im Spritzbetonkörper aufgrund der Temperaturspannungen geführt hat.

Bereits beim Spritzen war eine inhomogene Förderung des Spritzgutes zu beobachten. Die Bohrkerne wiesen dementsprechend eine auffällige Hell-Dunkel-Maserung auf. Im Vergleich zu den Bohrkerne­n des GSBV1 hatten die Bohrkerne nur wenige Fehlstellen und Lunker.

Die Frühfestigkeit beim GSBV3 war höher als beim GSBV1. Ebenfalls positiv war die sehr hohe einaxiale Druckfestigkeit nach drei Tagen von im Mittel 28,4 MPa, danach stieg diese nur noch wenig auf 33,1 MPa an. Die mittlere Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen betrug 4,1 MPa. Die Festigkeit war somit hoch, aber aufgrund des Salzzuschlages erwartungsgemäß etwas geringer. Bei den Permeabilitätstest konnte kein Druck aufgebaut werden.

6.5.5 Großspritzbetonversuch 4 (GSBV4)

6.5.5.1 Einleitung

Für den vierten Großspritzbetonversuch GSBV4 wurde, wie beim GSBV3, ausschließlich Salzzuschlag verwendet. Im Gegensatz zum GSBV3 sollte eine einheitliche Schichtmächtigkeit von ca. 16 cm gespritzt werden, um eine geringere maximale Abbinde­temperatur zu erreichen. Da beim GSBV3 die Bohrkerne eine auffällige Hell-Dunkel-Maserung aufgrund des inhomogenen Spritzens aufwiesen, wurde **für den GSBV4 die Spritzbetonmaschine aus den Technikumsversuchen der TUBAF verwendet**. Durch das Förderprinzip mit einem Taschenrad wird das Trockengemisch wesentlich gleichmäßiger portioniert und gleichmäßig an der Düse gefördert.

Der Spritzbetonkörper sollte eine Gesamtmächtigkeit von ca. 1 m aufweisen, sodass 6 Spritzschichten vorgesehen wurden. Für den GSBV4 wurde dieselbe Rezeptur wie beim GSBV3 geplant:

MgO	M.-%	17,1
S30-Lösung	M.-%	14,5
Salzzuschlag (0 - 8 mm)	M.-%	68,4
Verhältnis Zuschlag/MgO	-	4,0
Verhältnis Lösung/MgO	-	0,85...1,0

Das Salz stammte aus der Grube Teutschenthal und wurde dort aufbereitet und in Big Bags á 300 kg geliefert. Ein Big Bag Salz und 3 Säcke MgO ergaben jeweils einen Mischeransatz.

Der Versuchsort wurde von TS-Baus vorbereitet. Der Spritzort für den GSBV4 war etwa 5 m bis 10 m neben dem GBSV1 und GSBV3. Der Spritzbeton wurde auf den Salzstoß

aufgespritzt. Als seitliche Begrenzungen wurden Wände aus Schalungsholz in einem Abstand von 1,5 m aufgestellt. Die Firsthöhe betrug an der Versuchsfläche 3,0...3,2 m, was auch der Höhe des späteren Spritzbetonkörpers entspricht. Für einen ebenen Untergrund wurde die Sohle mit Beton ausgegossen und mit einer Metallplatte ausgelegt. Der Salzstoß an der Rückseite wurde nicht nachbehandelt und wies die Rauigkeit nach der Bearbeitung mit der Teilschnittmaschine auf.

Um die Abbindezeit jeder Schicht messen zu können, wurden an neun Positionen Thermoelemente (TE) vorgesehen. Eine Geberreihe befand sich in der Mitte der Spritzfläche 0,75 m vom Rand und in fünf verschiedenen Höhen: bei 0,1 m Höhe (Position H), bei 1,5 m Höhe (Position A), bei 2,0 m Höhe (Position B), bei 2,5 m Höhe (Position C) und an der Firste bei 3,0 m bis 3,2 m Höhe (Position D). In dieser Reihe wurden je Position an der Schichtunterseite und in der Schichtmitte je ein Thermoelement eingebaut.

Eine zweite Geberreihe befand sich auf der rechten Hälfte bei 0,38 m Abstand zum rechten Rand auf vier verschiedenen Höhen: bei 0,1 m Höhe (Position I), bei 1,5 m Höhe (Position E), bei 2,25 m Höhe (Position F) und an der Firste bei 3,0 m bis 3,2 m Höhe (Position G). In dieser Reihe wurden die Thermoelemente jeweils nur in der Schichtmitte eingebaut. Zusätzlich wurden auf der letzten Schicht 5 Thermoelemente an den Positionen A, B, C, D und H auf der Oberfläche angebracht. In Abbildung 129 ist der Aufbau und die Position der Thermoelemente schematisch dargestellt.

Die Thermoelemente wurden jeweils vor dem Spritzen der nächsten Schicht angebracht. Dazu wurden jeweils Stäbe horizontal in vorgebohrte Löcher in das Salz gesetzt, an denen die Thermoelemente in der Schichtmitte der nächsten Schicht angebracht wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Messspitze des Thermoelementes wenige Zentimeter Abstand zum Stab hat und vollständig mit Spritzbeton eingespritzt wurde. Die insgesamt 89 verbauten Thermoelemente wurden an eine Messanlage angeschlossen, die während der Spritzarbeiten im 5-Minuten-Intervall und während längerer Pausen (über das Wochenende) im 10-Minuten-Intervall gemessen hat.

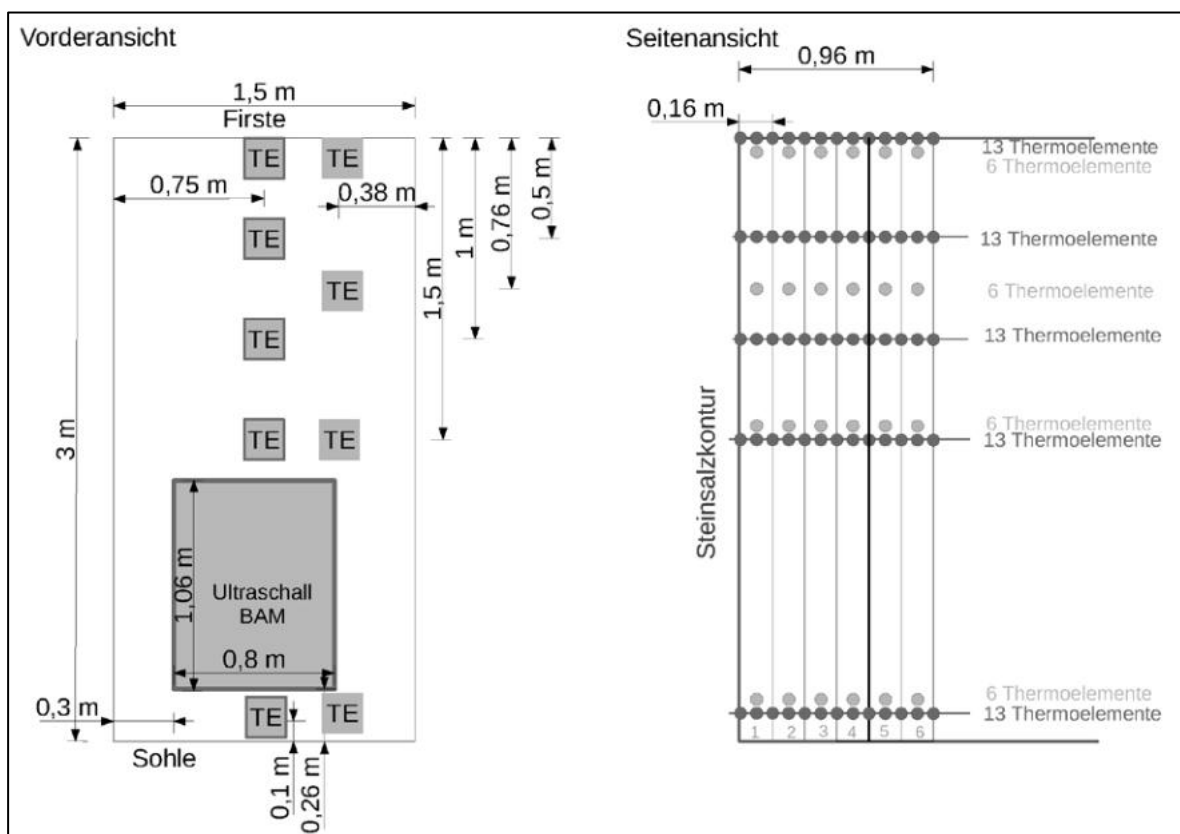


Abbildung 129: Aufbau des GSBV4 mit Position der Thermoelemente

6.5.5.2 Der Spritzprozess

Mit dem Spritzen der *Schicht 1* wurde am 27.09.2021 begonnen. Die geplante Schichtmächtigkeit betrug 16 cm, sodass die Thermolemente dementsprechend bei 8 cm Abstand zum Untergrund angebracht wurden. Die tatsächlich gespritzte mittlere Mächtigkeit betrug 15,9 cm. Das Lösung-/MgO-Verhältnis der ersten Schicht betrug 0,900. Insgesamt wurden 2217 kg Beton verbraucht, 33,8 % davon waren Rückprall.

Die *Schicht 2* wurde am 28.09.2021 gespritzt. Die geplante Schichtmächtigkeit betrug wieder 16 cm, sodass die Thermolemente dementsprechend bei 8 cm Abstand zum Untergrund angebracht wurden. Es wurde hierbei eine Schichtmächtigkeit von im Mittel 15,5 cm gespritzt. Das Lösung-/MgO-Verhältnis lag bei 0,865. Es wurden 2210 kg Beton gespritzt. Der Rückprallanteil betrug 26,9 %.

Die *Schicht 3* wurde am 29.09.2021 gespritzt. Es wurde, wie geplant, eine Schichtmächtigkeit von ca. 16 cm gespritzt. Für diese Schicht wurden 2220 kg Beton gespritzt, davon waren 28,5 % Rückprall. Das Lösung-/MgO-Verhältnis der dritten Schicht betrug 0,918.

Die *Schicht 4* wurde am 30.09.2021 gespritzt. Die Schichtmächtigkeit betrug 15,9 cm. Es wurden etwa 2230 kg Beton verbraucht, davon entfielen 32,2 % auf den Rückprall. Das Lösung-/MgO-Verhältnis lag bei 0,945.

Die *Schicht 5* wurde nach mehrtägiger Pause am 04.10.2021 gespritzt. Es wurde eine Schichtmächtigkeit von ca. 15,2 cm gespritzt. Für diese Schicht wurden 2216 kg Beton verspritzt, davon waren 30,5 % Rückprall. Das Lösung-/MgO-Verhältnis der fünften Schicht betrug 0,909.

Die *Schicht 6* wurde am 05.10.2021 gespritzt. Die Schichtmächtigkeit betrug 16,8 cm. Es wurden etwa 2270 kg Beton verspritzt, davon entfielen 27,4 % auf den Rückprall. Das Lösung-/MgO-Verhältnis lag bei 1,050.

Tabelle 67: Auswertung zum Spritzen des GSBV4

Schicht	1	2	3	4	5	6
Datum	27.09. 2021	28.09. 2021	29.09. 2021	30.09. 2021	04.10. 2021	05.10. 2021
Mittlere Schichtmächtigkeit [cm]	15,9	15,5	16,0	15,9	15,2	16,8
Spritzbeton [kg]	2217,2	2210,3	2220,2	2230,8	2216,9	2270,0
Zuschlag [kg]	1505,0	1511,0	1501,0	1501,0	1501,0	1501,0
MgO [kg]	375,0	375,0	375,0	375,0	375,0	375,0
Lösung [kg]	337,2	324,3	344,2	354,8	340,9	394,0
Verhältnis Lösung/ MgO [-]	0,900	0,865	0,918	0,946	0,909	1,050
Rückprall [kg]	751,0	594,0	632,0	719,0	676,0	622,0
Rückprall [%]	33,8	26,9	28,5	32,2	30,5	27,4

6.5.5.3 Auswertung Bohrkerne

Am Spritzbetonkörper des GSBV4 wurden insgesamt 35 Bohrkerne entnommen. Die Lage der einzelnen Bohrungen ist in Abbildung 130 zu sehen. Mit dem Bohren wurde bereits einen Tag nach Spritzende der letzten Schicht begonnen, um die Kerne für die Festigkeitsprüfung 3 Tage nach dem Spritzen vorbereiten und prüfen zu können.

In den Bohrungen B31 und B32 wurde in situ die Permeabilität bestimmt. Diese Bohrungen sind um 12° bis 15° geneigt. Um eine Interaktion mit benachbarten Bohrungen zu vermeiden, befinden sich die B31 und B32 abseits der anderen Bohrungen.

In der Abbildung ist außerdem das Messfeld der BAM für die Ultraschalluntersuchungen enthalten. Die Bohrungen innerhalb dieser Fläche (B33, B34, B35) wurden erst nach der Ultraschallprüfung ausgeführt.

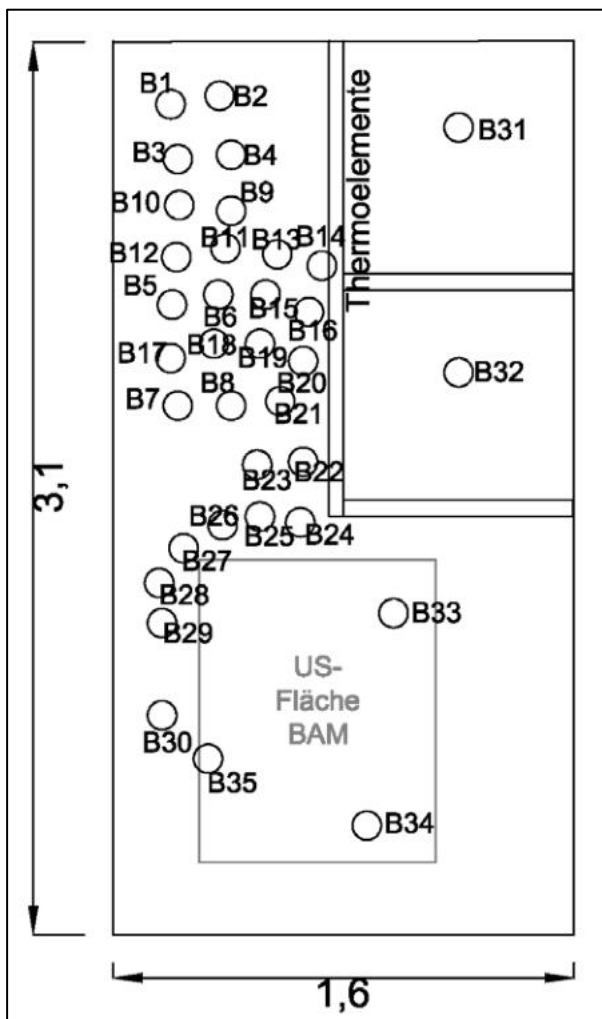


Abbildung 130: Spritzbetonfläche des GSBV4 mit den Kernbohrungen

In Abbildung 131 sind einige der Bohrkerne in einer Übersicht dargestellt, sodass sich jeweils am linken Rand die jüngste Schicht 6 befindet und die Schichtgrenzen auf einer Linie liegen. Die Betonierabschnittsgrenzen sind meist an einer Farbänderung zu erkennen. Besonders deutlich ist diese Grenze beim Übergang von Schicht 3 und Schicht 4. Die BAG scheinen jedoch keine Schwächezonen zu sein, da beim Bohren und Herausbrechen die Kerne nicht an den Schichtgrenzen gebrochen sind.

Die Kerne haben eine sehr gute Qualität mit nur sehr wenigen Fehlstellen, Rissen und Lunkern. Es ist nur eine leichte Maserung erkennbar. Dies ist eine deutliche Verbesserung gegenüber den Kernen des GSBV3. Die Kerne des GSBV4 sind homogener als anderen

Kerne in den bisherigen Spritzbetonversuchen aufgrund der gleichmäßigen Förderung mit der Spritzbetonmaschine der TUBAF mit einem Taschenrad.



Abbildung 131: Überblick Kerne des GSBV4 (Auswahl: B9 bis B16)

6.5.5.4 Auswertung Festigkeit

Frühfestigkeit

Um die Festigkeitsentwicklung von jungem Spritzbeton zu bewerten, wurde ein Penetrometer nach DIN EN 14488-2 [17] verwendet. Mit dem Penetrometer wurde der Eindringwiderstand des Frischbetons gemessen, aus dem sich über eine gerätespezifische Umrechnung die Druckfestigkeit berechnen lässt. Nach 10 Minuten bis knapp 6 Stunden nach Spritzende wurden je Zeitpunkt 10 Einzelwerte (Eindringwiderstand) über die gesamte Spritzfläche genommen, gemittelt und in die Druckfestigkeit umgerechnet. In Abbildung 132 ist die Entwicklung der Frühfestigkeit je Schicht dargestellt.

Bei allen Schichten lag der Anfangswert nach 10 bzw. 20 Minuten zwischen 0,08 MPa und 0,16 MPa. Bei den Schichten 1 bis 4 stieg der Anfangswert mit jeder Schicht an. Die Festigkeitszunahme stieg von Schicht 1 bis 4 an. So betrug die Festigkeit nach 2 Stunden bei Schicht 1 0,15 MPa, bei Schicht 2 0,2 MPa, bei Schicht 3 0,3 MPa und bei Schicht 4 0,4 MPa. Schicht 1 und Schicht 5 wurden jeweils auf abgekühlten Untergrund gespritzt und zeigten über die ersten 3 Stunden einen gleichen Verlauf der Festigkeitszunahme, danach stieg die Festigkeit der Schicht 5 deutlich schneller an. Ähnlich verhält es sich bei Schicht 2 und 6.

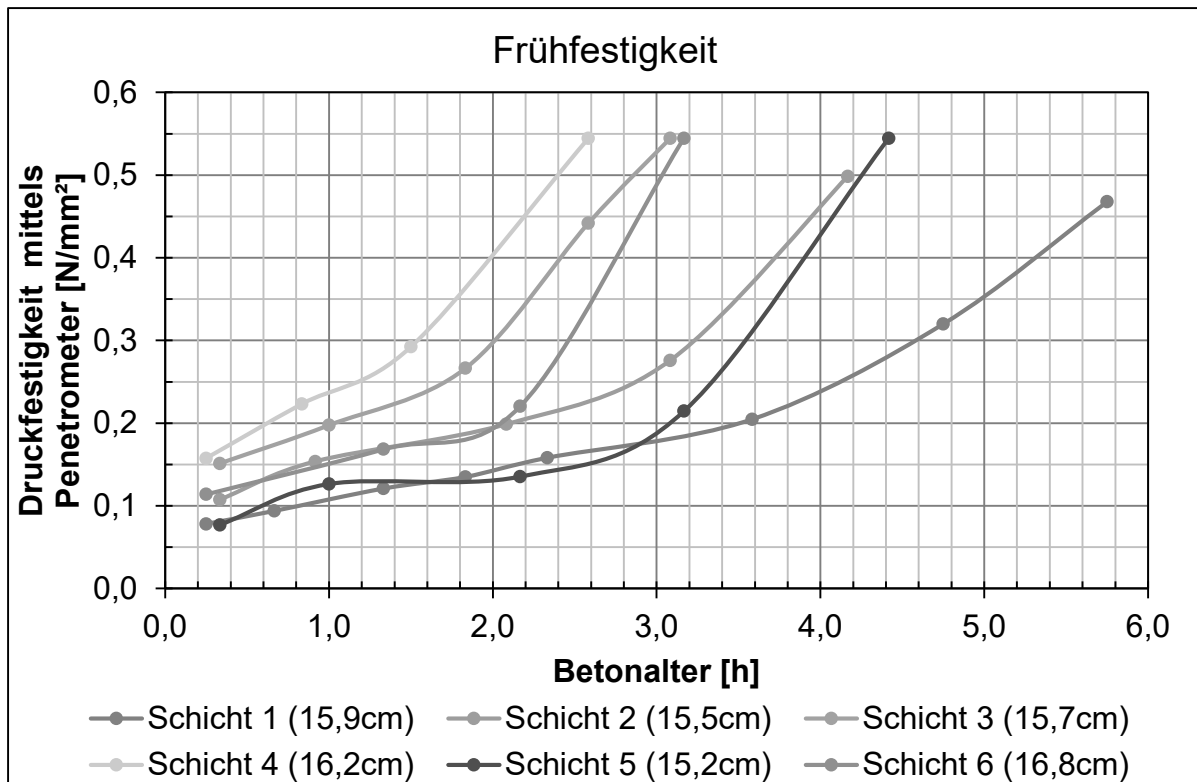


Abbildung 132: Frühfestigkeit der einzelnen Schichten beim GSBV4

Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 20 cm nach 3 Tagen, 10 Tagen, 14 Tagen und 28 Tagen bestimmt. Die abgedrückten Proben stammen aus verschiedenen Schichten. In Tabelle 68 sind die Einzelwerte zur einaxialen Druckfestigkeit enthalten. In Tabelle 69 sind jeweils Mittelwert, Minimum, Maximum, Standardabweichung und Variationskoeffizient der einaxialen Druckfestigkeit je Prüfalter zusammengefasst.

Nach 3 Tagen betrug die mittlere einaxiale Druckfestigkeit bereits 41,4 MPa, nach 10 Tagen lag sie bei 47,5 MPa, nach 14 Tagen sank sie auf 42,4 MPa. Nach 28 Tagen stieg die einaxiale Druckfestigkeit auf 52,3 MPa. Bei den fünf Proben, die nach 14 Tagen abgedrückt wurden, hatten zwei Proben eine einaxiale Druckfestigkeit von nur 27,4 MPa und 33,9 MPa. Diese beiden Proben hatten mit 1,913 g/cm³ und 1,917 g/cm³ auch die geringste Dichte aller Proben / Kerne. Die Ursache für die geringe Dichte konnte nicht weiter festgestellt werden. Der Minimalwert streute stark zwischen 27 MPa und 43,6 MPa. Der Maximalwert streute ähnlich stark zwischen 51,1 MPa nach 10 Tagen und 61,7 MPa nach 28 Tagen. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 5,8 % und 24,3 % und damit in einem für Spritzbeton üblichen Bereich.

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper liegt zwischen 1,913 g/cm³ und 1,937 g/cm³ und beträgt im Mittel bei 1,928 g/cm³. Die nur geringe Spannweite der Dichte lässt auf einen homogenen Spritzbetonkörper schließen.

In Abbildung 133 ist die einaxiale Druckfestigkeit über die Tiefe für alle Proben bzw. alle Prüfalter dargestellt.

In Abbildung 134 ist die einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Prüfalters dargestellt.

Tabelle 68: Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV4

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B1-1	5/6	18,0	3	34,7	1,923
B8-1	5/6	14,5	3	52,6	1,931
B5-1	5/6	13,5	3	50,9	1,932
B3-2	5/6	24,0	3	31,2	1,925
B7-2	5/6	23,5	3	44,0	1,932
B4-1	5/6	16,0	3	34,9	1,920
B16-1	5/6	12,0	10	49,2	1,936
B15-1	5/6	16,0	10	48,4	1,933
B13-1	5/6	14,5	10	45,1	1,935
B9-1	5/6	19,5	10	43,6	1,923
B12-1	5/6	13,5	10	51,1	1,930
B16-2	1-4	46,5	14	45,7	1,920
B16-3	1-4	82,5	14	55,6	1,929
B14-3	1-4	65,5	14	33,9	1,917
B10-3	1-4	53,5	14	27,4	1,913
B9-2	1-4	61,0	14	49,5	1,930
B24-1	1-4	52,0	28	58,3	1,935
B18-1	1-4	84,0	28	53,0	1,922
B24-2	1-4	90,0	28	42,0	1,935
B30-2	1-4	50,5	28	55,4	1,927
B30-3	1-4	86,5	28	43,4	1,920
B29-1	5/6	16,0	28	60,4	1,936
B18-3	5/6	12,0	28	56,3	1,937
B20-1	5/6	14,0	28	61,7	1,935
B23-1	5/6	20,5	28	40,4	1,936

Tabelle 69: Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV4

Nach ... Tagen	3	10	14	28
Minimalwert [MPa]	31,2	43,6	27,4	40,4
Maximalwert [MPa]	52,6	51,1	55,6	61,7
Gemittelte Festigkeit [MPa]	41,37	47,47	42,42	52,32
Standardabweichung [MPa]	8,31	2,73	10,32	7,79
Anzahl Einzelwerte [-]	6	5	5	9
Variationskoeffizient [%]	20	5,8	24,3	14,9

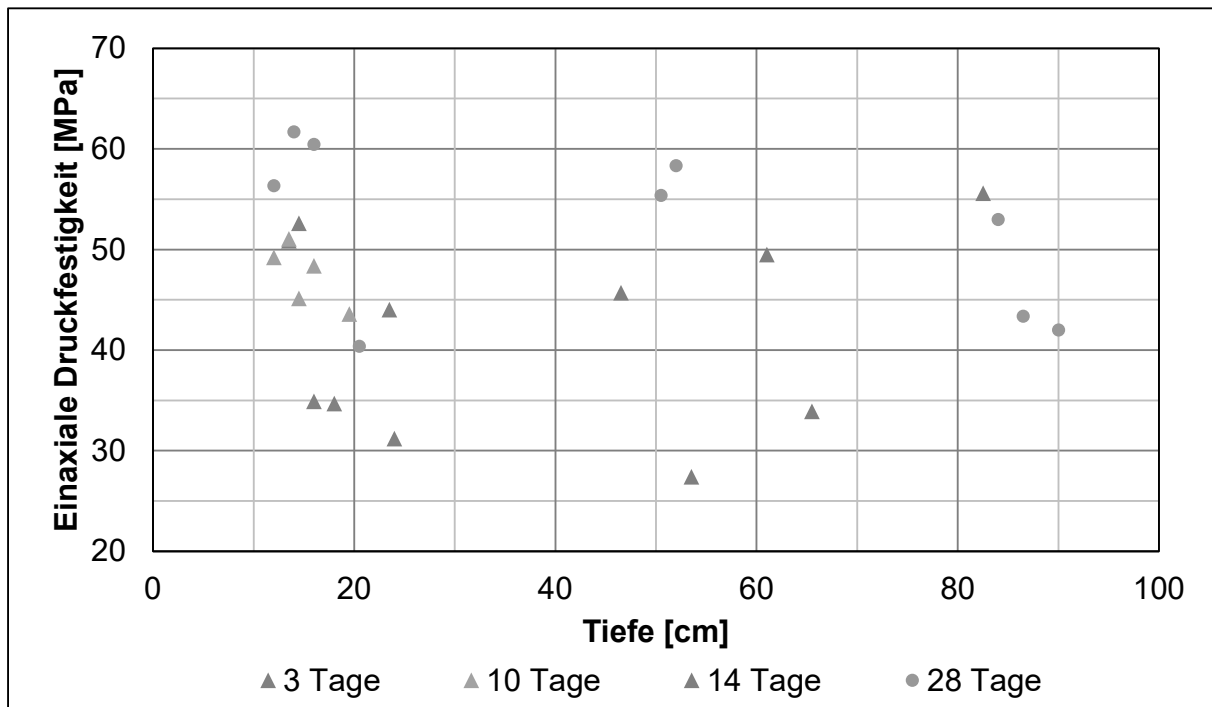


Abbildung 133: Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV4 über die Tiefe

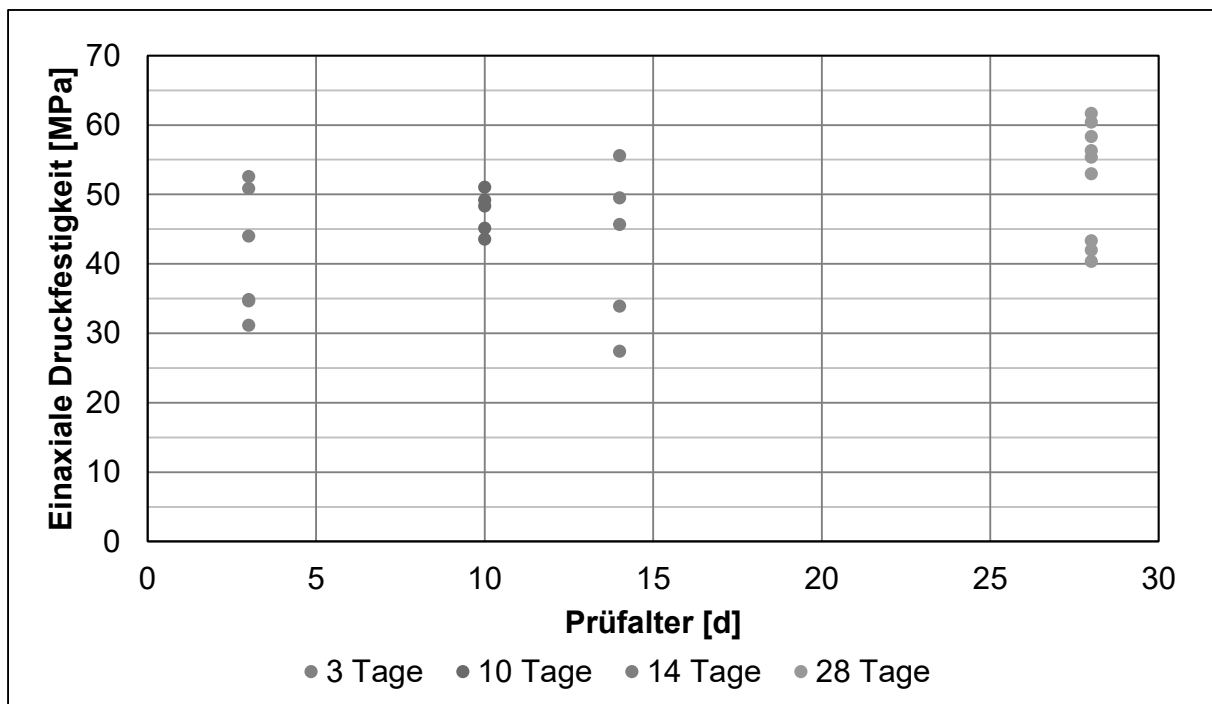


Abbildung 134: Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV4 in Abhängigkeit des Prüfalters

Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde an Kernen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 10 cm nach 3 Tagen, 10 Tagen, 14 Tagen und 28 Tagen bestimmt. Die abgedrückten Proben stammen aus verschiedenen Schichten. In Tabelle 70 sind die Einzelwerte zur Spaltzugfestigkeit enthalten. In Tabelle 71 sind jeweils Mittelwert, Minimum, Maximum,

Standardabweichung und Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit je Prüfalter zusammengefasst.

Nach 3 Tagen betrug die Spaltzugfestigkeit im Mittel 4,4 MPa, nach 10 Tagen 4,8 MPa, nach 14 Tagen stieg sie nochmal auf 5,3 MPa. Nach 28 Tagen lag die mittlere Spaltzugfestigkeit bei 6,0 MPa.

Ähnlich zur einaxialen Druckfestigkeit ist auch bei der Spaltzugfestigkeit die Spannweite zwischen Minimum und Maximum relativ hoch. Der Variationskoeffizient schwankte zwischen 9,5 % und 20,2 %.

Die Dichte der einzelnen Prüfkörper lag zwischen 1,899 g/cm³ und 1,943 g/cm³ und im Mittel bei 1,926 g/cm³.

In Abbildung 135 ist die Spaltzugfestigkeit über die Tiefe für alle Proben bzw. alle Prüfalter dargestellt.

In Abbildung 136 ist die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit des Prüfalters dargestellt.

Tabelle 70: Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV4

Kernstück	Schicht	Mittl. Tiefe im Spritzbetonkörper [cm]	Prüfalter [d]	Spaltzugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]
B3-1	5/6	6,0	3	4,4	1,910
B7-1	5/6	8,0	3	5,2	1,929
B2-1	5/6	6,5	3	3,3	1,915
B2-2	5/6	18,5	3	3,9	1,923
B6-1	5/6	6,5	3	4,2	1,937
B6-2	5/6	17,0	3	5,5	1,928
B10-1	5/6	16,5	10	3,6	1,930
B10-2	5/6	27,0	10	4,5	1,899
B14-1	5/6	7,5	10	6,5	1,935
B14-2	5/6	21,5	10	5,0	1,925
B11-1	5/6	11,0	10	4,7	1,923
B15-2	1-4	54,0	14	6,2	1,927
B13-2	1-4	61,5	14	3,6	1,943
B13-3	1-4	73,0	14	4,0	1,917
B11-2	1-4	58,0	14	6,1	1,926
B10-4	1-4	69,0	14	6,2	1,932
B11-3	1-4	36,0	14	5,8	1,929
B21-1	1-4	52,0	28	6,9	1,922
B21-2	1-4	62,0	28	6,4	1,931
B18-2	1-4	68,5	28	6,1	1,928
B21-3	1-4	94,0	28	6,4	1,923
B24-3	1-4	71,5	28	6,3	1,910
B30-1	1-4	71,5	28	5,0	1,906
B19-1	5/6	7,0	28	5,9	1,939
B24-4	5/6	6,0	28	5,7	1,937
B21-4	5/6	6,5	28	6,3	1,939
B26-1	5/6	10,0	28	5,4	1,941
B19-2	5/6	17,5	28	5,6	1,930
B20-2	5/6	29,5	28	5,9	1,936
B19-3	5/6	27,5	28	5,9	1,910

Tabelle 71: Spaltzugfestigkeit an Kernen des GSBV4

Nach ... Tagen	3	10	14	28
Minimalwert [MPa]	3,3	3,6	3,6	5,0
Maximalwert [MPa]	5,5	6,5	6,2	6,9
Gemittelte Festigkeit [MPa]	4,40	4,86	5,33	5,99
Standardabweichung [MPa]	0,74	0,95	1,08	0,57
Anzahl Einzelwerte [-]	6	5	6	13
Variationskoeffizient [%]	16,8	19,5	20,2	9,5

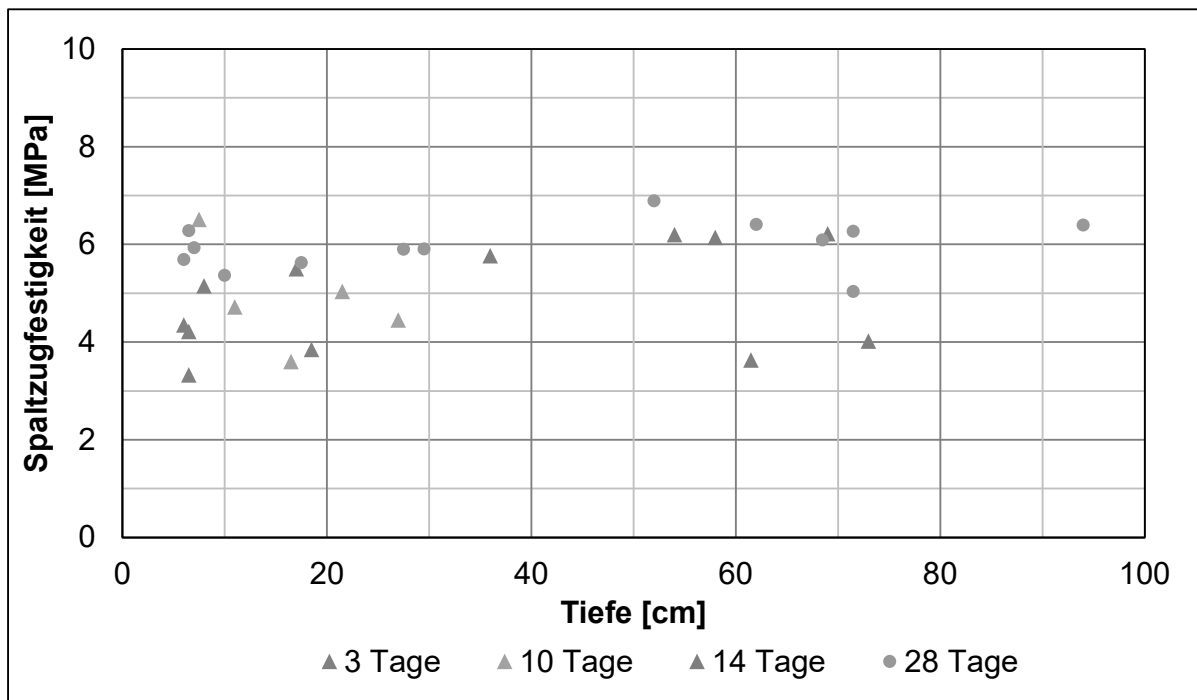


Abbildung 135: Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV4 über die Tiefe

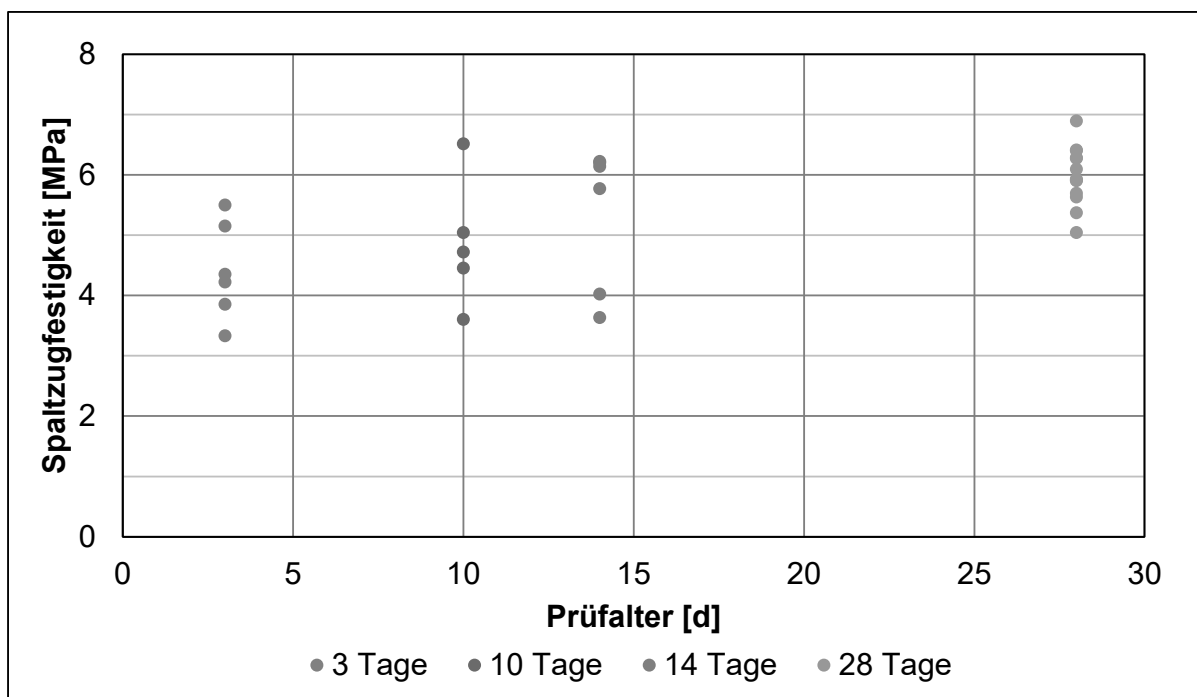


Abbildung 136: Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV4 in Abhängigkeit des Prüfalters

6.5.5.5 Hydro-mechanische Eigenschaften

In Analogie zum GSBV3 wurden auch beim GSBV4 die Matriceigenschaften (u.a. triaxiale Druckfestigkeit / Permeabilität) und Kontaktflächeneigenschaften (u.a. Haftzugversuche und Schertests) untersucht (siehe Arbeitsprogramm in Abbildung 137 links).

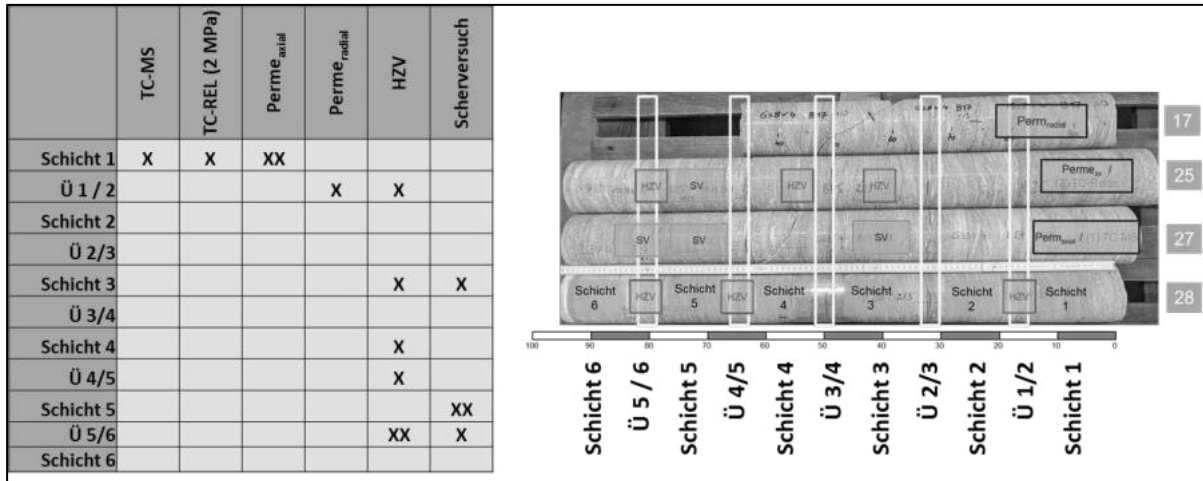


Abbildung 137: IfG-Untersuchungsprogramm an Proben des GSBV4

Haftzugeigenschaft (direkte Zugfestigkeit)

Zur repräsentativen Bestimmung der Haftzugeigenschaften (direkte Zugfestigkeit) von erbohrten Spritzbetonproben aus dem Spritzbetonkörper des GSBV4 standen 6 Prüfkörper zur Verfügung. Weil keine expliziten Trennfugen erkennbar waren, wurden (analog zum GSBV3) hauptsächlich Matriceigenschaften bestimmt. Die Ergebnisse der Einzelversuche (6 Proben) sind grafisch als Säulendiagramm sowie für die Auswertung der Stichprobe als Box-plot-Diagramm in Abbildung 118 dargestellt.

Die direkte Zugfestigkeit variiert zwischen dem Minimum (0,2 MPa) und dem Maximum (3,26 MPa) mit einem Median von 2,40 MPa. Bei dem Kern mit einer Haftzugfestigkeit von 3,26 MPa riss die Probe am Stempel ab. Die tatsächliche Haftzugfestigkeit des MgO-Betons war also noch höher als 3,26 MPa.

Trotz der Ausreißer (758_HZF: nur 0,2 MPa bzw. 758_HZF4: 3,26 MPa, hoher Wert trotz Abreißen am Stempel) liegen die Festigkeiten in der gleichen Größenordnung wie beim GSBV3 (vgl. Kap. 6.5.4.5).

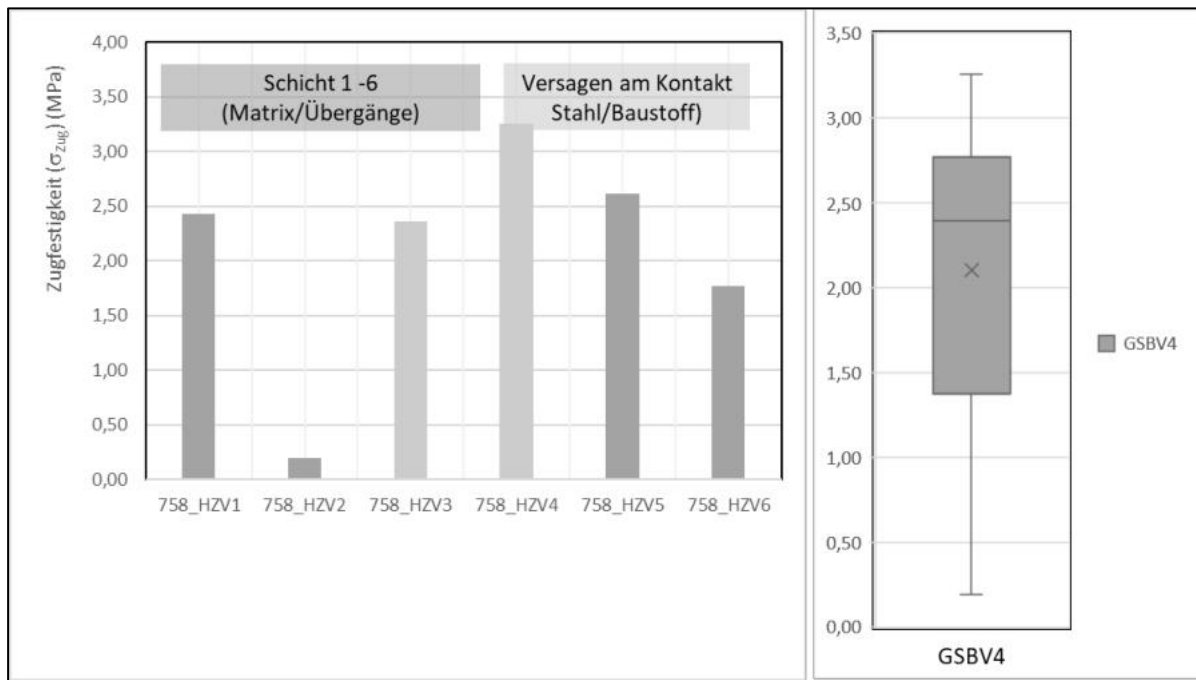


Abbildung 138: Direkte Zugfestigkeit an Proben des GSBV4 aus den Schicht 1 - 6 (Schicht-übergänge/Matrix; nach 28 Tagen Prüfalter: (li.) Einzelergebnisse – gelb markierte Säulen kennzeichnen Versagen an der Kontaktfläche Baustoff / Stahlstempel, (re.) Boxplot zur Darstellung der Streuung der verschiedenen Einzelversuche (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75, sowie als Strich der Median (0,5), und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x).

Triaxiale Druckfestigkeit

In Analogie zu den Untersuchungen am GSBV3 wurde an einer Kernprobe aus dem GSBV4 ein triaxialer Mehrstufenfestigkeitsversuch durchgeführt, dessen Ergebnisse Mohr-Coulomb-Diagramm (σ_{1Peak} vs. σ_3) mit den Festigkeitsparameter Kohäsion c und Reibungswinkel ϕ in Tabelle 63 enthalten sind.

Die entsprechende Mohr-Coulomb -Gerade ist ebenfalls in Abbildung 120 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Mohr-Coulomb -Gerade höher liegt als das Variationsfeld der Festigkeitsdaten aus dem GSBV3. Dabei ergibt sich eine aus der Mohr-Coulomb-Geraden abgeschätzte einaxiale Druckfestigkeit von ca. 42 MPa. Dieser Wert liegt am unteren Band des Variationsfeldes, das die TUBAF über einaxiale Festigkeitsversuche (Probenalter 28 d) ermittelt hat.

Das bedeutet, dass hier mit der Mohr-Coulomb-Geraden eher die untere Einhüllende des Festigkeitsspektrums gemessen wurde.

Scherfestigkeit GSBV4 (Probenserie 732)

Die Bestimmung der Scherfestigkeit zur Ableitung des Mohr-Coulombschen Bruchkriteriums erfolgte analog zum GSBV3. Es liegen Ergebnisse aus 4 Einzelschertests vor, die bei Normalspannungen zwischen $\sigma_n = 0,5$ MPa und 5 MPa durchgeführt wurden.

Allerdings erwies sich das Material als deutlich kompakter. Die Restscherfestigkeit konnte nicht zuverlässig bestimmt werden.

Die für die entsprechenden Normalspannungen bestimmten Peakfestigkeitskennwerte sind in Tabelle 72 zusammengefasst bzw. in Abbildung 122 als Mohr-Coulomb-Diagramm dargestellt.

Über eine Regressionsanalyse wurden aus den Einzelwerten der Scherversuche die Mohr-Coulomb-Festigkeitsparameter im MgO-Spritzbeton bestimmt:

$$\text{Peakfestigkeit: } \varphi_{\text{Trennfläche}} = 48^\circ \quad c_{\text{Trennfläche}} = 4,43 \text{ MPa}$$

Die Daten weisen zwar eine höhere Streuung auf, wobei die resultierende Kohäsion deutlich höher ist als beim GSBV3, während der Reibungswinkel etwas niedriger liegt.

Tabelle 72: Festigkeitskennwerte aus direkten Scherversuchen an der Spritzbeton-Matrix Spritzbeton (GSBV4)⁶

Versuch	Stufe	Schерparameter	
		σ_n MPa	τ MPa
758/SV1	1 (Peak)	0,50	4,33
	(1 (Rest))	0,50	2,02
	(2 (Rest))	1,00	2,57
758/SV2	1 (Peak)	5,00	9,29
	(1 (Rest))	5,00	8,68
	(2 (Rest))	2,00	4,56
758/SV3	1 (Peak)	1,00	5,53
	(1 (Rest))	1,00	3,76
	(2 (Rest))	0,50	2,05
758/SV4	1 (Peak)	3,00	8,89
	(1 (Rest))	3,00	7,11
	(2 (Rest))	5,00	2,90

Isostatische Kompaktionstests

Zielstellung isostatischer Kompaktionsversuche ist die Untersuchung des Belastungs- und zeitabhängigen Verformungsverhaltens der Baustoffproben. Dafür werden die Proben mit zyklischen Belastungsschleifen unter isotropen Spannungsbedingungen ($\sigma_1 = \sigma_3$) bis 15 MPa belastet, wobei die axiale Längenänderung als Maß der Konsolidierung gemessen wird. Für die Bewertung der Eigenschaften wird die Volumendehnung herangezogen, wobei vereinfachend davon ausgegangen wird, dass $\Delta V/V = 3 \cdot \varepsilon_1$. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens wird in Anlage 1.6 gegeben.

Die Ergebnisse der Setzungslinien für zwei Proben aus dem GSBV4 im Vergleich mit früheren Ergebnissen an Kernproben aus dem GV2 sind in Abbildung 139 jeweils für zwei Belastungsregimes (schnell bzw. langsam) dargestellt.

Die Ergebnisse dokumentieren, dass beide Materialien sich zunächst qualitativ ähnlich verhalten. Prinzipiell kompaktieren zunächst alle Proben mit zunehmender hydrostatischer Einspannung, jedoch unterschiedlich stark, und die Volumenverformungen wachsen bei zyklischer Wiederholung der Belastungsschleifen an.

Dabei verhält sich der jeweilige Baustoff bei isostatischer schneller Belastung ($\dot{p} = 0,1 \text{ MPa/s}$) etwas steifer als bei langsamer Belastung ($\dot{p} = 0,005 \text{ MPa/s}$).

⁶ Wegen der höheren Festigkeit des Spritzbetons kam es bei nahezu allen Proben bereits beim initialen Versagen (Peakfestigkeit) nicht zur Ausbildung einer diskreten horizontalen Trennfläche, sondern eher zu Staffelbrüchen bzw. zum Aushebeln der Probe aus der Schalung. Deshalb sind die nachfolgend bestimmten Restscherfestigkeiten nicht aussagefähig.

Durch die Kompaktion wird der Porenraum reduziert und der wirkende Kompaktions- bzw. Ausbauwiderstand erhöht sich, was sich in einer Zunahme des Anstiegs der Spannungs-Verformungskurven mit steigender Spannung äußert⁷.

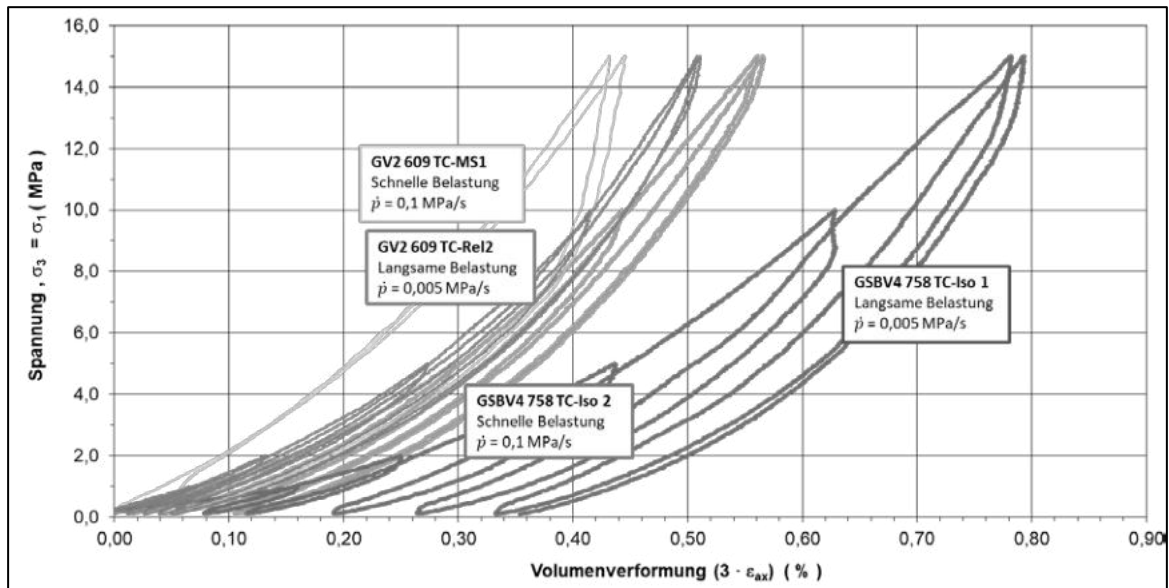


Abbildung 139: Isotrope Kompaktion von GV2-Proben (Laborserie 609) und GSBV4 (Laborserie 758): Spannungs-Verformungskurven bei „schneller“ ($\dot{\rho} = 0,1 \text{ MPa/s}$) bzw. bei „langsamer“ Belastung ($\dot{\rho} = 0,005 \text{ MPa/s}$).

Die Unterschiede zwischen den beiden Baustoffchargen sind allerdings signifikant:

- Das Kernmaterial aus dem GV2 ist nur gering kompressibel und zeigt nur eine geringe Abhängigkeit von der Belastungsrate, was auf ein steifes Baustoffgefüge (Silikatzuschlag) mit geringem Porenraum hinweist. Die bei zyklischer Belastung erreichte Kompaktion ist insgesamt klein ($\Delta V/V \approx 0,5 \%$ bei $\sigma_{\text{iso}} = 15 \text{ MPa}$) und annähernd reversibel.
- Beim GSBV4 handelt es sich um einen Baustoff, der speziell bei „langsamer“ Belastungsrate höhere Verformungsbeträge aufweist ($\Delta V/V \approx 0,8 \%$ bei $\sigma_{\text{iso}} = 15 \text{ MPa}$). Die Kompaktion ist zu etwa 60 % reversibel. Das deutet darauf hin, dass die Steifigkeit der Matrix wegen des Steinsalzzuschlags geringer ist.

Relaxationstests GSBV4

Zur Vervollständigung der Datenbasis wurde in Analogie zum GSBV3, entsprechend der in Anlage 1.6 beschriebenen Versuchsmethodik, auch an Material aus dem GSBV4 ein Relaxationsversuch durchgeführt.

Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 123 dargestellt. Die beiden Diagramme zeigen links jeweils den auf den Ausgangsspannungszustand ($\dot{\sigma}_{t=0} = 1$) normierten Druckabfall sowie rechts, die über die Systemsteifigkeit über den Spannungsabfall in Verformungsraten

⁷ Es ist anzumerken, dass aus den so bestimmten Belastungskurven, keine unmittelbar in situ relevanten Verformungsmoduln, wie sie als Eingangsgrößen für numerische Modellierungen benötigt werden, bestimmt werden können, da bei den vergleichsweise schnellen Versuchen häufig zu hohe Steifigkeiten ermittelt werden. Deshalb führt das IfG in anderen Vorhaben (z.B. Charakterisierung der Eigenschaften von A1 für Strömungsbarrieren auf der Schachanlage Asse II) zusätzlich noch isostatische Kriechversuche durch, auf deren Basis ein sogenannter Ersatzkompaktionsmodul abgeleitet wird.

transformierte Messkurve, d.h. den Tragwiderstand vs. Verformungsrate. Auch hier ergibt sich ein exponentieller Spannungsabfall, der innerhalb des Versuchszeitraums von > 2 d (Zeit im TZF) bei ca. 48 % der normierten Spannung endet.

Die auf eine sehr kleine Verformungsrate extrapolierte Spannung (Abbildung 123-re.) beträgt ca. 14 MPa und liegt damit im Mittel zwischen den beiden Versuchsergebnissen des GSBV3 (vgl. Kap. 6.5.4.5). Eine abschließende Bewertung unter Einbeziehung verschiedener Baustoffe erfolgt in Kap. 6.7.

Permeabilitätstests

An zwei Kernstücken aus dem GSBV4 wurde exemplarisch die Permeabilität als Gasinjektionstests gemessen. Die Ergebnisse sind nahezu identisch zu den Ergebnissen des GSBV3.

Während das in axialer Richtung angeströmte Kernstück impermeabel (trotz einem einseitigen Injektionsdruck von 8 MPa) war (\rightarrow Permeabilität $k < 10^{-20} \text{ m}^2$), zeigte das Kernstück bei radialer Durchströmung eine sehr hohe Permeabilität (Abbildung 140):

- k_{init} ($\sigma_3 \approx \sigma_1 = 2 \text{ MPa}$): $4,9 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
- k_{end} ($\sigma_3 \approx \sigma_1 = 10 \text{ MPa}$, ca. 4h Versuchszeit): $3,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$

Diese Werte sind etwa eine Größenordnung niedriger als die Ergebnisse aus dem GSBV3. Mit zunehmendem Manteldruck und zunehmender Zeit nimmt die Permeabilität infolge Matrixkompaktion ab.

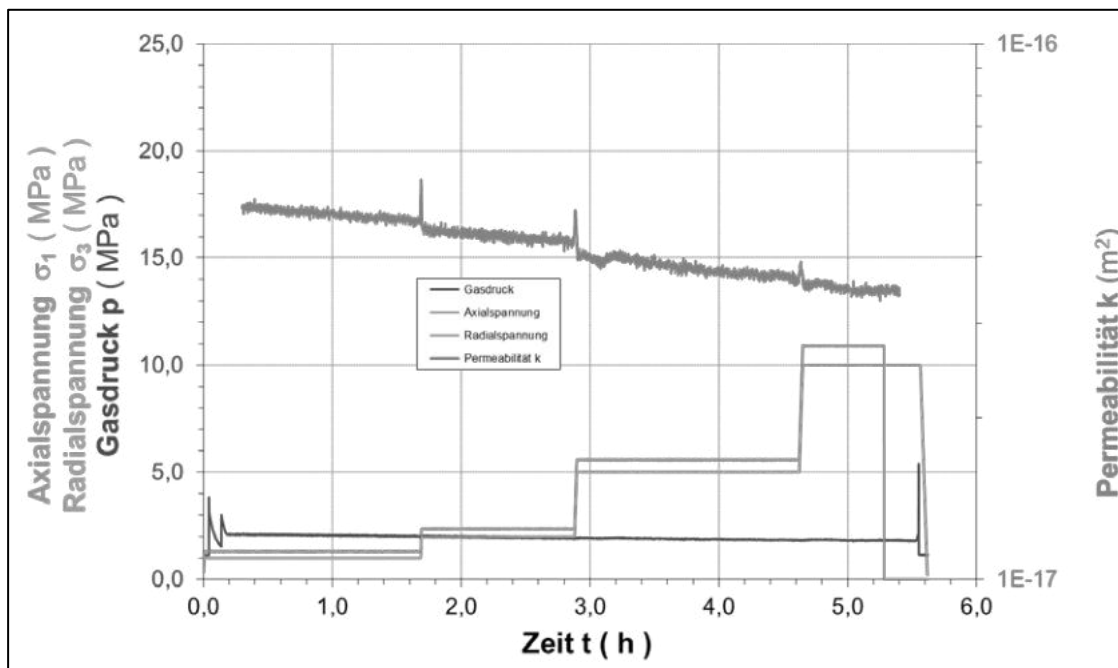


Abbildung 140: GSBV4 - Permeabilitätstest 758_Perm-Radial: Injektion von N₂ mit schrittweiser Erhöhung der Einspannung bei konstant gehaltenem Gasdruck

6.5.5.6 Permeabilitätsuntersuchungen in situ

In dem Spritzbetonkörper wurden in den Bohrungen B31 und B32 **in situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Gas und mit Salzlösung** durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Permeabilität des Spritzkörpers parallel zu den einzelnen Betonageschichten. Durch die Positionierung der Testintervalle wurde die Durchlässigkeit von einzelnen BAG und der massive Baustoffkörper untersucht.

Die in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen wurden entsprechend dem Messprogramm laut Anlage 3.2.4 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 141 in Abhängigkeit vom Konturabstand zur Oberfläche des Spritzkörpers dargestellt. Die horizontalen Balken stellen die Länge des getesteten Intervalls dar. Die farbigen Linien im Diagramm kennzeichnen schematisch die Lage der BAG in dem untersuchten Spritzbetonkörper. Unter Berücksichtigung des ermittelten Wassergehaltes des Kernmaterials aus den Bohrungen B31 und B32 muss die ermittelte Gaspermeabilität als effektive Gaspermeabilität angesehen werden.

Die Ergebnisdarstellung in Abbildung 141 und Abbildung 142 zeigt für beide Bohrungen eine vergleichbare Permeabilität. Im Bereich der BAG 3 (B32) bei ca. 30,43 cm wird eine höhere Permeabilität in der Größenordnung von $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ gemessen. Im Konturabstand von 46,2 cm bis 60,0 cm konnte die Permeabilität in beiden Bohrungen nicht gemessen werden. Durch den schnellen Abstrom des Gases konnte kein Druckimpuls auf das Testintervall aufgebracht werden.

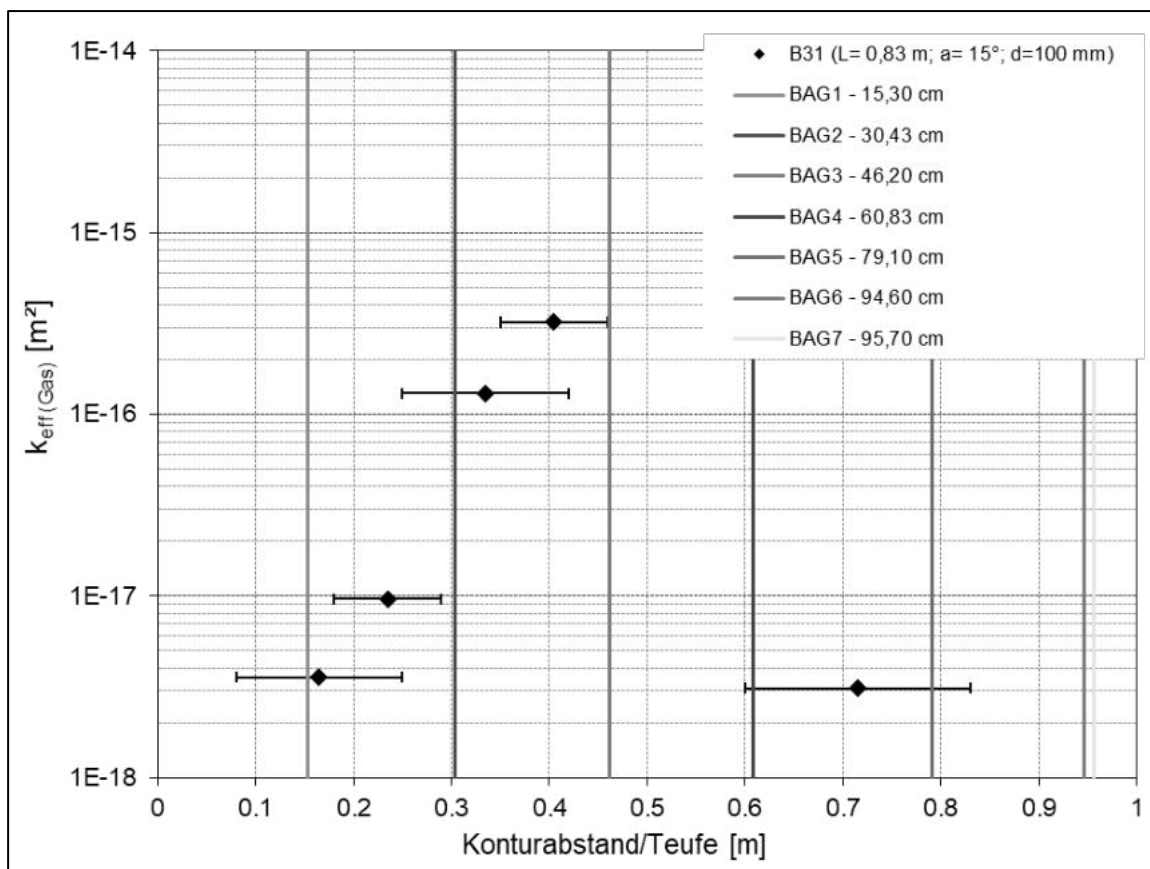


Abbildung 141: Übersicht zur in situ ermittelten Gaspermeabilität in der Bohrung B31

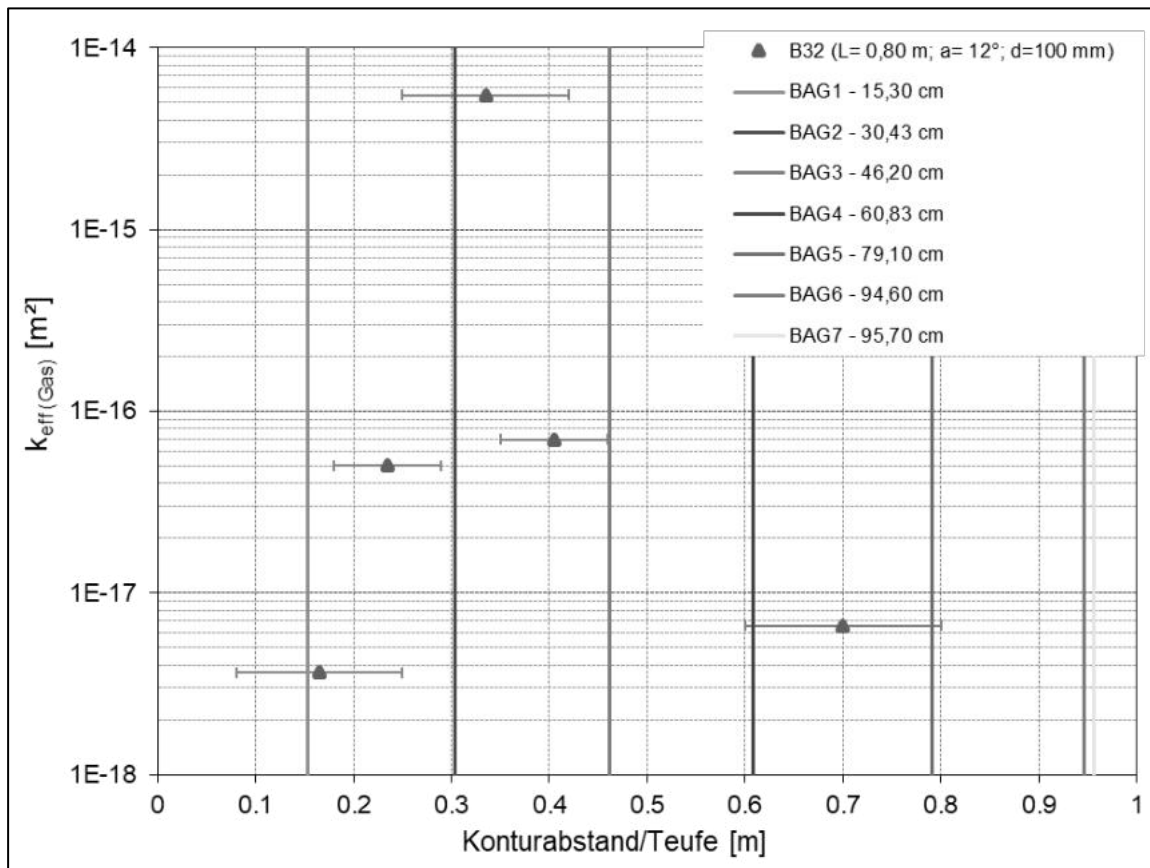


Abbildung 142: Übersicht zur in situ ermittelten Gaspermeabilität in der Bohrung B32

Die Ergebnisse für die Messpunkte im Teufenbereich von 0,18 m bis 0,29 m charakterisieren die in situ-Permeabilität des Spritzbaustoffes ohne BAG. In den Tests wurde eine Permeabilität von $9,6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ (Bohrung B31) bis $5,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (Bohrung B32) gemessen. Das Ergebnis für die im Labor ermittelte effektive Gaspermeabilität für den massiven Baustoff im Teufenbereich von 0,24 m bis 0,29 m zeigt mit $8,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (Bohrung B31, P302-16/8) möglicherweise den Einfluss der BAG an.

Die Messpunkte BL_31_025_G1 und BL_31_035_G1 in der Bohrung B31 und der Messpunkt BL_32_025_G1 in der Bohrung B32 zeigen einen Wertebereich der Permeabilität für die BAG von $1,3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ bis $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$.

Nach Abschluss und Auswertung der in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen in den Bohrungen B31 und B32 im GSBV4 wurden die Bohrungen mit NaCl-gesättigter, MgCl₂-haltiger Lösung befüllt. Nach dem Abschluss der Gaspermeabilitätsuntersuchungen wurden beide Bohrungen am 16.12.2021 mit NaCl-gesättigter, MgCl₂-haltiger Lösung befüllt. In der Bohrung B31 stellte sich ein langsam fallender Salzlösungsspiegel ein. In der Bohrung B32 kam es durch lokale Wegsamkeiten zu einem schnelleren Abfluss der Salzlösung über den Spritzkörper.

Die Bohrungen wurden in unterschiedlichen Zeitabständen befüllt (Abbildung 143).

In der Bohrung 31 wurde 89 Tage nach der Befüllung mit Salzlösung ein Permeabilitätstest mit Salzlösung im Testintervall von 0,35 m bis zum Bohrlochtiefsten bei 0,83 m durchgeführt mit dem Ziel, die integrale Permeabilität des gespritzten Betonkörpers zu ermitteln.

Für die Untersuchungen wurde im Bohrloch ein 1-fach-Packer installiert. Dieser wurde mit einem Packersetzdruck von 18-20 MPa gesetzt.

Die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Salzlösung wurden als Tests mit konstantem Flüssigkeitsdruck durchgeführt (vgl. Anlage 2.1). Dies ermöglicht die kontinuierliche Auf-

sättigung des Testintervalls unter Berücksichtigung der Sekundärreaktionen des Baustoffes bei möglicherweise lokal erhöhter Permeabilität (siehe gemessene in situ Gaspermeabilitäten in Abbildung 141 und Abbildung 142).

Zusätzlich wurden an dem Kernmaterial aus den beiden Bohrungen Laboruntersuchungen zur Charakterisierung des Baustoffes durchgeführt.

Im Ergebnis der Bohrlochbefüllung mit Salzlösung sank der Lösungsspiegel in der Bohrung B32 im Vergleich zur Bohrung B31 schneller ab.

Abbildung 143 zeigt eine Zusammenstellung der nachgefüllten Lösungsmenge in den einzelnen Bohrungen.

Für die Bohrung B31 kam es innerhalb von 28 Tagen zu einer Spiegelabsenkung in der Größenordnung von 1160 ml. In der gleichen Zeit ist der Salzlösungsspiegel in der Bohrung B32 gesunken und 4840 ml sind abgeflossen.

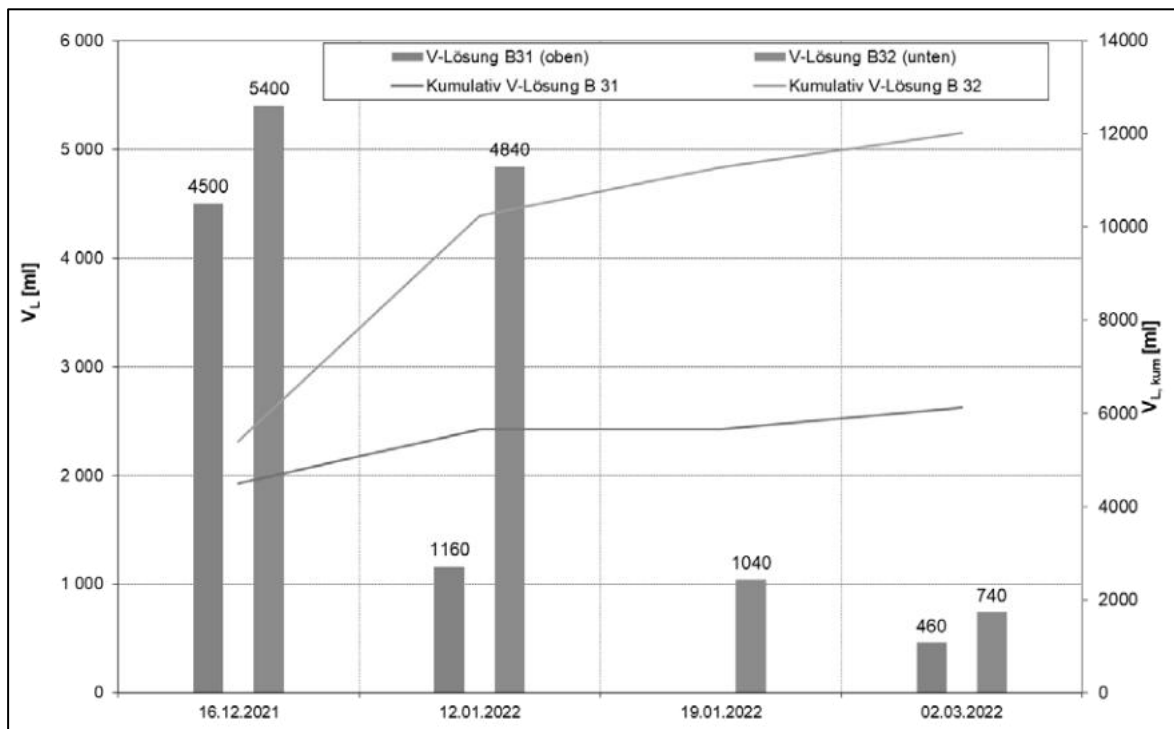


Abbildung 143: Übersicht der eingefüllten Lösungsmengen in den Bohrungen B31 und B32

Der Lösungspereabilitätstest in der Bohrung B31 wurde am 15.03.2022 begonnen und endete nach einer Versuchsdauer von ca. 1200 Stunden am 05.05.2022. In Abbildung 145 sind die Ganglinien für den Flüssigkeitsdruck, den Volumenstrom und das kumulative Volumen der Salzlösung über die Versuchsdauer dargestellt. Abbildung 144 zeigt den Luftdruck, die Temperatur und die relative Luftfeuchte über den Versuchszeitraum.

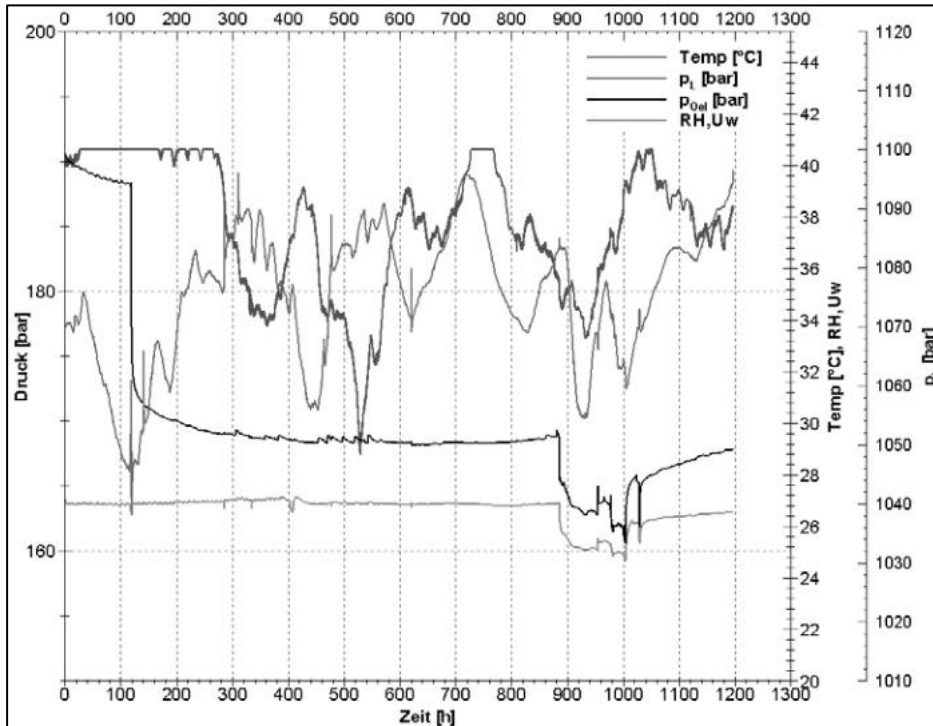


Abbildung 144: Ganglinien der Parameter Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte am Teststandort für den Salzlösungstest in der Bohrung B31

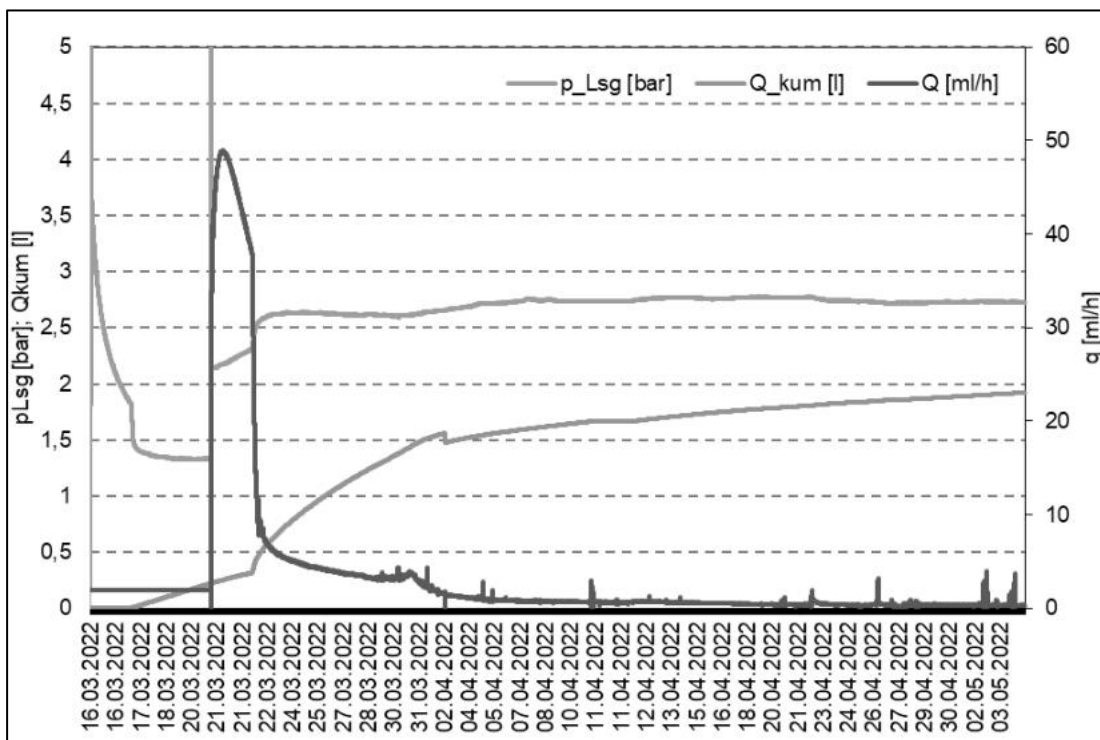


Abbildung 145: Ganglinien der Parameter Druck, Volumenstrom und kumulatives Salzlösungsvolumen für den Salzlösungstest in der Bohrung B31

Zur Beurteilung des Anfangsverhaltens bei den Strömungsprozessen in der Bohrung B31 wurde ein Druckimpuls aufgebracht und der Druckabfall aufgezeichnet. Die Ergebnisse sind in der Druckganglinie in Abbildung 145 mit dargestellt. Die Druckganglinie zeigt einen schnellen Druckabfall. Dies lässt auf eine Flüssigkeitsaufnahme durch den Porenraum

schließen. In dieser Versuchsphase ist von einer hohen Restgassättigung im Porenraum sowie einem Einfluss von Sekundärreaktionen zwischen der Testlösung und der Bindemittelmatrix mit Einfluss auf die Porenstruktur auszugehen. Daher wurde der Kurvenverlauf nicht ausgewertet und es wurde keine Lösungspermeabilität für diesen anfänglichen Impulstest ermittelt.

In der Fortsetzung des Versuches wurde in der Anfangsphase (nach dem Druckimpuls) ein Flüssigkeitsdruck von 1,3 bar eingestellt. Dieser wurde nach ca. 120 Stunden (ca. 5 Tagen) auf 2,6 bar erhöht und über den weiteren Versuchsverlauf annähernd konstant gehalten. Die sich für diesen Druckverlauf ergebende Volumenstromganglinie und das kumulativ Salzlösungsvolumen sind in Abbildung 145 dargestellt. Über die gesamte Versuchsdauer reduziert sich der Volumenstrom. Es wurde ein Gesamtvolumen von 1,92 l in das Testintervall eingeströmt. Ein Austritt von Salzlösung aus dem Spritzbetonkörper konnte nicht beobachtet werden. Aus der Volumenstromganglinie kann, unter Berücksichtigung des angewendeten konstanten Druckes, auf eine kontinuierliche Abnahme der Salzlösungspermeabilität geschlossen werden (siehe Abbildung 146).

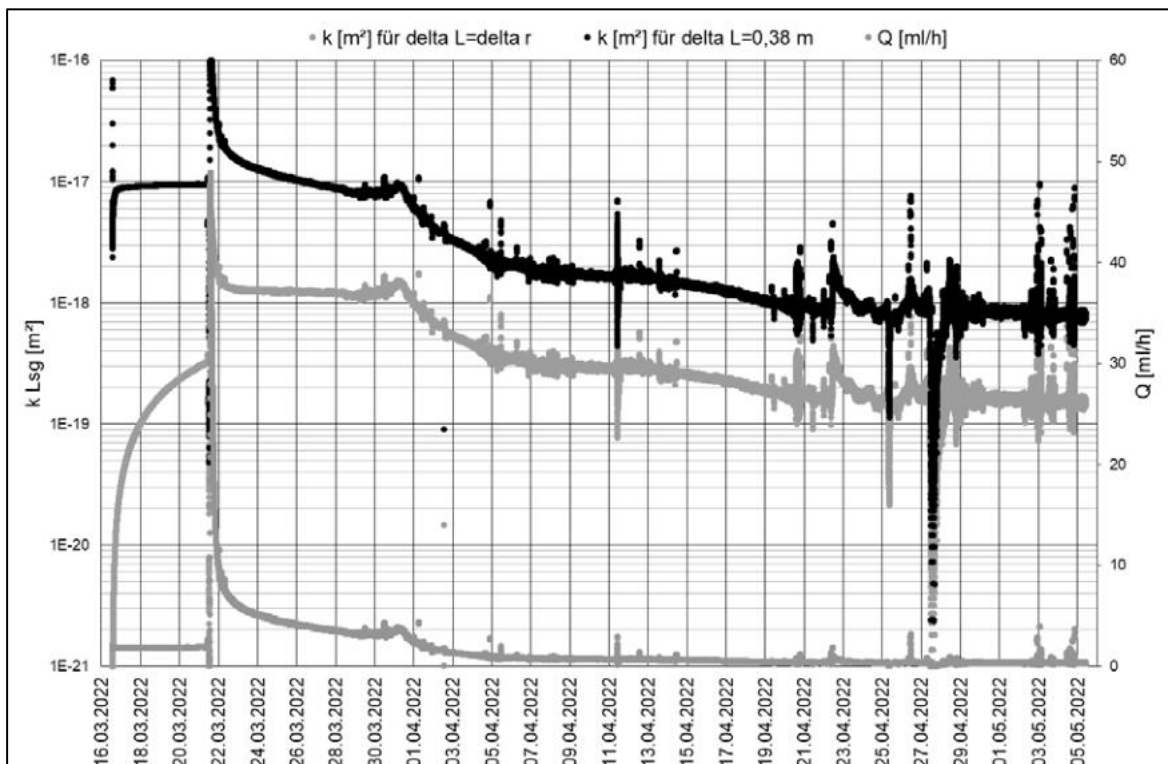


Abbildung 146: Zeitabhängige Entwicklung von Volumenstrom und Permeabilität über den Versuchszeitraum

Im Ergebnis der Wechselwirkungen zwischen der Salzlösung und der MgO-Bindemittelmatrix ist von einer Reduzierung des Porenraumes und in der Folge der Permeabilität auszugehen. Zum Ende des Versuches reduziert sich der Volumenstrom auf 7,9 ml/d (0,33 ml/h). Der Strömungsprozess wird für diese geringen Änderungen als quasi-stationär angesehen. Eine Auswertung des Versuches auf der Grundlage des Darcy-Gesetzes scheint daher als Annäherung geeignet. Kenntnisse zur Eindringtiefe bzw. dem Strömungsweg der Flüssigkeit um die Bohrung liegen nicht vor. Unter Berücksichtigung der BAG ist davon auszugehen, dass lokal, entlang der BAG, ein stärkerer Flüssigkeitstransport als im Bereich des massiven Baustoffes erfolgt ist. Eine Beurteilung des so entstandenen Strömungsweges ist nicht möglich, wobei auch zu berücksichtigen ist, dass auch für einen solchen Strömungsweg kontinuierlich eine zeitabhängige Veränderung der Permeabilität und eine Veränderung der Aufsättigungsbedingungen anzunehmen ist. Das lokale Fortschreiten einer Flüssigkeitsfront und die

Permeabilitätsreduzierung in diesem Bereich verändern den Aufsättigungsprozess des Betonkörpers.

Die theoretische Abschätzung des mit Flüssigkeit gesättigten Ringraumes um die Bohrung für die auffüllbare Porosität von 10,2 Vol.% und das kumulative Lösungsvolumen von 1,92 l ergibt eine Mächtigkeit der Saumzone von 0,074 m. Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die Permeabilität des getesteten Bereiches für folgende Annahmen abgeschätzt:

- minimaler Abstand der Bohrung (Bohrlochwandung) zur Außenkante des Spritzbetonkörpers von 0,38 m,
- theoretische Mächtigkeit des flüssigkeitsgesättigten Ringraumes um die Bohrung von 0,074 m.

Beide geometrischen Annahmen stellen eine Näherung für die Abschätzung der Permeabilität dar. Für diese Annahmen ergibt sich eine **Spanne der Lösungspermeabilität von $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.**

Vor dem Hintergrund der oben genannten Vorstellungen für die Wechselwirkungen zwischen der Testlösung und der Bindemittelmatrix und den Aufsättigungsprozess im Spritzbetonkörper erfolgte keine modellgestützte Auswertung des Versuches. Es fehlen repräsentative Informationen und beschreibende Ansätze zur Berücksichtigung der Überlagerung des Mehrphasenströmungsprozesses und der geochemischen Wechselwirkungen mit Einfluss auf die Porosität und Permeabilität des Baustoffes.

Tabelle 73: Ergebnisübersicht GSBV4

Bohrung	Messpunkt- bezeichnung	Prüfdruck	Prüfmedium	Teufe OK	Teufe MP	Teufe UK	Permeabilität	Bemerkung
[-]	[-]	[MPa]	[-]	[m v. AP]			[m ²]	[-]
GSBV-4 B31 (L= 0,83 m; a= -15,0°; d=100 mm)	BL_31_0080_G1	0,5	Gas	0,080	0,165	0,250	$3,6 \cdot 10^{-18}$	BAG
	BL_31_0250_G1	0,5		0,250	0,335	0,420	$1,3 \cdot 10^{-16}$	Spritzbeton
	BL_31_0420_G1	0,5		0,420	0,505	0,590	-	-
	BL_31_0590_G1	0,5		0,590	0,675	0,760	-	-
	BL_31_0350_G1	0,5		0,350	0,405	0,460	$3,2 \cdot 10^{-16}$	BAG
	BL_31_0180_G1	0,5		0,180	0,235	0,290	$9,6 \cdot 10^{-18}$	BAG
	BL_31_0500_G1	0,5		0,500	0,555	0,610	-	-
	BL_31_0600_INT_G1	0,5		0,600	0,715	0,830	$3,1 \cdot 10^{-18}$	BAG
	BL_31_0430_INT_G1	0,5	0,430	0,630	0,830	-	-	
BL_31_0350_INT_L1		Lösung	0,350	0,590	0,830	$2,9 \cdot 10^{-19}$ - $8,0 \cdot 10^{-19}$	-	
GSBV-4 B32 (L= 0,80 m; a= -12,0°; d=100 mm)	BL_32_0080_G1	0,5	Gas	0,080	0,165	0,250	$3,6 \cdot 10^{-18}$	BAG
	BL_32_0250_G1	0,5		0,250	0,335	0,420	$5,5 \cdot 10^{-15}$	Spritzbeton
	BL_32_0360_G1	0,5		0,360	0,445	0,530	-	-
	BL_32_0590_G1	0,5		0,590	0,675	0,760	-	-
	BL_32_0350_G1	0,5		0,350	0,405	0,460	$7,0 \cdot 10^{-17}$	BAG
	BL_32_0180_G1	0,5		0,180	0,235	0,290	$5,0 \cdot 10^{-17}$	BAG
	BL_32_0500_G1	0,5		0,500	0,555	0,610	-	-
	BL_32_0600_INT_G1	0,5		0,600	0,700	0,800	$6,6 \cdot 10^{-18}$	BAG
	BL_32_0430_INT_G1	0,5	0,430	0,615	0,800	-	-	

6.5.5.7 Auswertung Temperaturentwicklung

Mit den insgesamt 89 in den Spritzbetonkörper eingebauten Thermoelementen wurde die Temperatur beim Spritzen und Abbinden des Spritzbetons aufgezeichnet. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 147 dargestellt.

In der Tabelle 74 sind je Schicht für ausgewählte Zeitpunkte (zu Spritzbeginn, zum Spritzende und das Maximum) die Temperatur in der Schichtmitte im Zentrum des Spritzbetonkörpers angegeben.

Die erste Schicht wurde am 27.09.2021 mit einer mittleren Schichtmächtigkeit von 15,9 cm gespritzt. Die Untergrundtemperatur lag zu Spritzbeginn bei 26,5 °C entsprechend der Umgebungstemperatur. Zum Spritzende war die Temperatur in der Schichtmitte auf 30,8 °C angestiegen. Die Maximaltemperatur der ersten Schicht betrug 37,0 °C und wurde ca. 15,5 Stunden nach Spritzende gemessen. Am Folgetag wurde die zweite Schicht gespritzt. Die Untergrundtemperatur betrug zu Spritzbeginn 31,2 °C. Die erste Schicht war also noch nicht vollständig abgekühlt. Zum Spritzende herrschte in der Schichtmitte eine Temperatur von 33,7 °C. Nach knapp 19 Stunden nach Spritzende wurde die maximale Temperatur von 49,5 °C gemessen. Durch die hohe Temperatur beim Abbinden der Schicht 2 wurde auch die erste Schicht auf bis zu 47 °C in der Schichtmitte erwärmt. Die dritte Schicht wurde am 29.09.2021 mit einer Schichtmächtigkeit von 16,0 cm gespritzt. Zum Spritzbeginn betrug die Untergrundtemperatur 43,3 °C. Bei Spritzende lag die Temperatur in der Schichtmitte bei 39,9 °C. Knapp 11 Stunden nach Spritzende wurde die Maximaltemperatur von 76,2 °C gemessen. Auch die darunterliegende zweite Schicht wurde nochmals auf bis zu 71 °C erwärmt. Zu Spritzbeginn der vierten Schicht am 30.09.2021 herrschte eine Untergrundtemperatur von 39,5 °C. Zum Spritzende betrug die Temperatur in der Schichtmitte 40,3 °C. Die Maximaltemperatur von 67,6 °C wurde 10,3 Stunden nach Spritzende gemessen. Auch nach dem Spritzen der vierten Schicht hatten sich die darunterliegenden Schichten nochmals erwärmt.

Vor dem Spritzen der fünften Schicht gab es eine dreitägige Pause. Der bis dahin hergestellte Spritzbetonkörper konnte in dieser Zeit auf die Umgebungstemperatur auskühlen. So herrschte zu Spritzbeginn der Schicht 5 eine Untergrundtemperatur von 25,7 °C. Zum Spritzende der 15,2 cm dicken Schicht lag die Temperatur in der Schichtmitte bei 31,2 °C. Die Maximaltemperatur betrug 44,3 °C und wurde 15,2 Stunden nach Spritzende erreicht. Am Folgetag wurde die sechste Schicht mit einer Mächtigkeit von 16,8 cm gespritzt. Zu Spritzbeginn hatte der Untergrund eine Temperatur von 32,2 °C. Bei Spritzende betrug die Temperatur in der Schichtmitte 35,7 °C. Die Maximaltemperatur in der Schichtmitte von 64,4 °C wurde etwa 11 Stunden nach Spritzende gemessen.

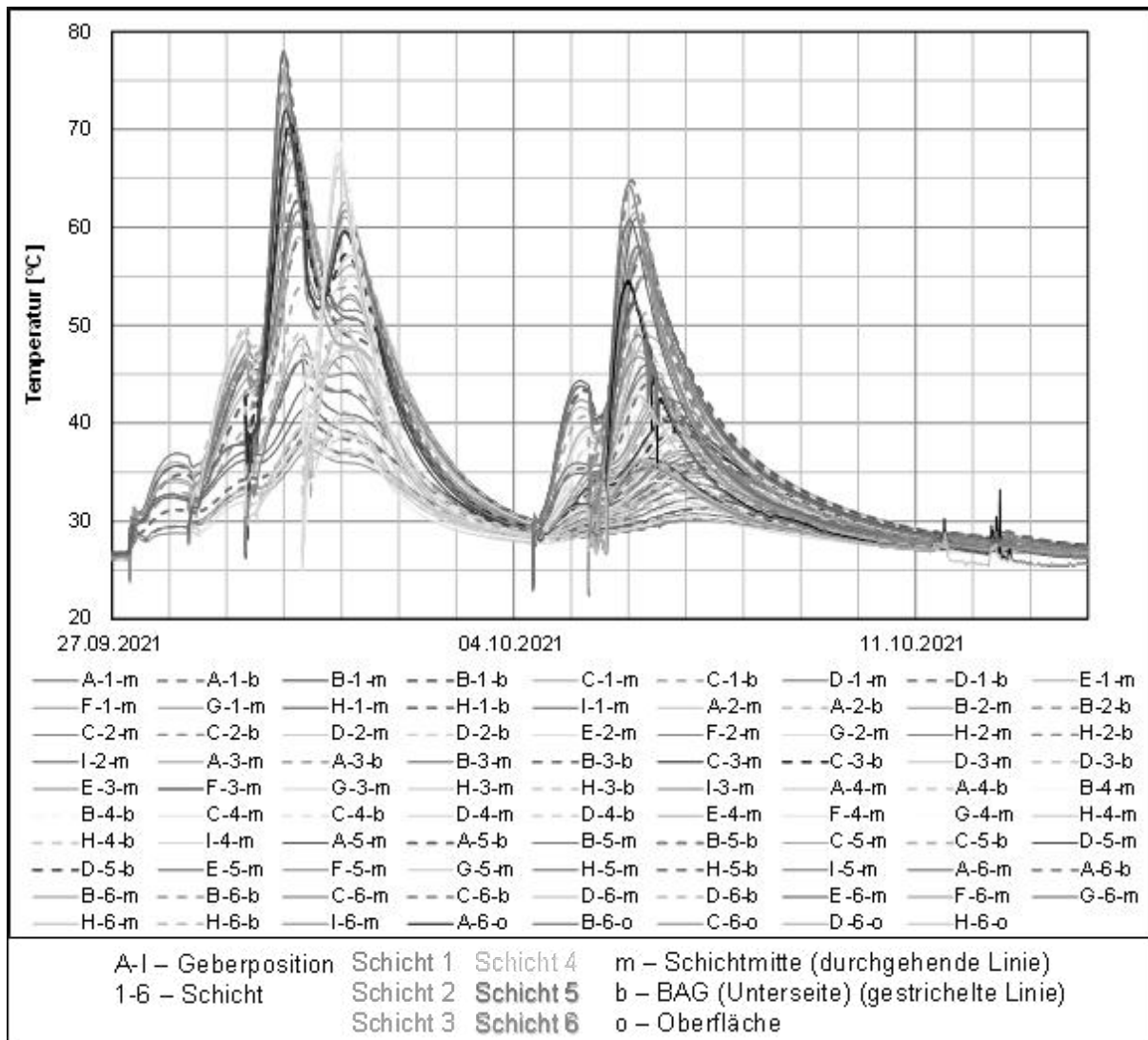


Abbildung 147: Temperaturentwicklung beim GSBV4

Tabelle 74: Auswertung Temperatur in der Mitte des Spritzbetonkörpers beim GSBV4

Schicht	1	2	3	4	5	6
Untergrundtemp. zu Spritzbeginn [°C]	26,5	31,2	43,3	39,5	25,7	32,2
Temp. zu Spritzende [°C]	30,8	33,7	39,9	40,3	31,2	35,7
max. Temp. [°C]	37,0	49,5	76,2	67,6	44,3	64,4
Δt (Spritzende – max. Temperatur) [h]	15,6	18,9	10,9	10,3	15,2	11,2

Alle sechs Schichten wurden mit der gleichen Mächtigkeit von etwa 16 cm gespritzt. Dennoch ist die Maximaltemperatur beim Abbinden in der jeweiligen Schicht sehr unterschiedlich je nach Untergrundtemperatur zu Spritzbeginn. Aus Abbildung 148 wird deutlich, dass je höher die Untergrundtemperatur zu Spritzbeginn ist, desto höher wird auch die maximale Temperatur. Der hier dargestellte Zusammenhang gilt jedoch nur für diesen Versuchsaufbau mit Salzzuschlag, einer Spritzschichtmächtigkeit von etwa 16 cm und bei dem zeitlichen Versuchsablauf aus Spritzen und entsprechenden Abkühlphasen.

Für zukünftige in situ Spritzbetonversuche bzw. reale Bauwerke sollte die Untergrundtemperatur bei der Planung des Spritzregimes berücksichtigt werden, um eine maximale Abbinde­temperatur im Inneren einer Spritzschicht nicht zu überschreiten.

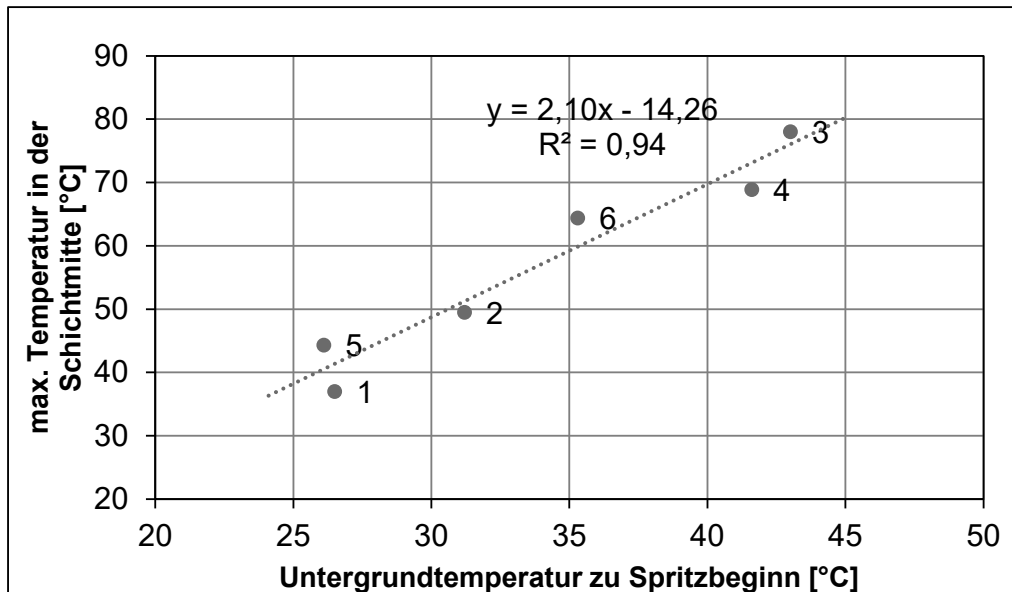


Abbildung 148: Maximale Abbinde­temperatur in Abhängigkeit der Untergrundtemperatur

6.5.5.8 Zusammenfassung GSBV4

Für den GSBV4 wurde dieselbe Rezeptur mit Salzzuschlag verwendet wie beim GSBV3. Es wurde eine einheitliche Schichtmächtigkeit von etwa 16 cm bei allen 6 Schichten gespritzt, um so eine hohe Abbinde­temperatur und Risse zu vermeiden. Für ein homogenes Spritzen und einen homogenen Spritzbetonkörper wurde die Spritzbetonmaschine der TUBAF aus den Technikumsversuchen mit dem Taschenrad verwendet.

Das Lösung-/MgO-Verhältnis der einzelnen Schichten lag zwischen 0,86 und 1,05. Das mittlere Lösung-/MgO-Verhältnis betrug 0,93. Mit diesem Wert wurde ein guter Spritzprozess (Homogenität des Spritzstrahls, Klebrigkeit des Spritzgutes) erreicht, sodass ein Lösung-/MgO-Verhältnis von 0,93 empfehlenswert ist. Trotz der einheitlichen Schichtmächtigkeit unterschied sich die maximale Abbinde­temperatur in den Schichten deutlich in Abhängigkeit der Untergrundtemperatur zu Spritzbeginn. So wurde eine maximale Abbinde­temperatur von 76 °C bei Schicht 3 gemessen, nachdem der Untergrund zu Spritzbeginn eine Temperatur von 43 °C hatte. Bei einer geringeren Untergrundtemperatur von ca. 26 °C, lag die maximale Abbinde­temperatur bei nur etwa 40 °C (Schicht 1 und 5).

Die Bohrkern­e hatten eine sehr gute Qualität mit nur sehr wenigen Fehlstellen. Die Dichte der Bohrkern­e war mit 1,93 g/cm³ etwas höher als beim GSBV3.

Die einaxiale Druckfestigkeit betrug nach 3 Tagen bereits 41 MPa und stieg nach 28 Tagen auf 52,3 MPa. Die Proben des GSBV4 hatten die höchste Festigkeit aller Proben aus allen 4 in situ Versuchen. Die Festigkeit war damit höher als bei den Proben mit Quarzzuschlag.

In zwei der Bohrlöcher (B31 und B32) wurde in situ die Permeabilität mit Gas gemessen. Für Prüfbereiche mit BAG wurde eine Permeabilität von $1,3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ bis $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bestimmt. Für Prüfbereiche im massiven Baustoff (ohne BAG) beträgt die Permeabilität $9,6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ (B31) bis $5,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (B32). In der Bohrung B31 wurde die Lösungspermeabilität mit NaCl-gesättigter, MgCl₂-haltiger Lösung bestimmt. Nach 10-wöchiger druckloser Befüllung und 7-wöchiger Versuchsdauer wurde eine Lösungspermeabilität von $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ ermittelt.

6.6 Dokumentation und Bewertung der Parameter für die Qualitätssicherung

Für das Betonspritzen gibt es zahlreiche Parameter, die für eine gute und gleichbleibende Qualität des Spritzbetons gewährleistet sein müssen.

Die zum Spritzen eingesetzte Technik muss funktionstüchtig und an den zu spritzenden Beton angepasst sein. So sollte idealerweise eine Spritzbetonmaschine mit Taschenrad verwendet werden. Das Trockengemisch wird unterhalb des Trichters portioniert und mit Druck über den Schlauch zur Düse geführt. In dem Taschenrad wird das Trockengemisch in sehr kleine Chargen unterteilt. Gibt es unterschiedliche Füllmengen der einzelnen Taschen, gleicht sich der Unterschied beim Transport im Schlauch gut aus. Bei Verwendung der Spritzmaschine mit den Rotorkammern (GSBV1, GSBV2, GSBV3) wird das Trockengemisch im Rotor in weniger und größere Chargen portioniert, die sich bei unterschiedlicher Füllmenge über den Schlauch schlechter ausgleichen. An der Düse führt dies zu ungleichmäßiger Förderung des Trockengemisches und so zu ungleichmäßigem Spritzbeton. Beim GSBV3 mit dem eckigen Salzzuschlag wurde beobachtet, dass das Trockengemisch schlechter rieselt, was zu einer ungleichmäßigen Beschickung der einzelnen Rotorkammern führte. Wie der GSBV4 gezeigt hat bzw. der Vergleich von GSBV3 und GSBV4, sollte eckiges Korn (Salz) nur über eine Spritzbetonmaschine mit Taschenrad verarbeitet werden, um einen homogenen Spritzbetonkörper zu erhalten.

Es muss darauf geachtet werden, dass beim Mischen des Trockengemisches im Zwangsmischer und beim Transport über Förderschnecke zum Trichter der Spritzmaschine kein Material verloren geht, einerseits durch starkes Stauben und andererseits über undichte Bereiche (Verbindungen/Anschlüsse). Insbesondere das Feinstmaterial fehlt sonst im Spritzbeton. Durch Abdichten und Abdecken des Mixers kann dies behoben werden. Außerdem wird so sichergestellt, dass das Feinstmaterial nicht eingeatmet wird oder die Sicht des Düsenführers einschränkt.

Es muss eine geeignete Spritzdüse mit kleinen Löchern für die Lösungszufuhr verwendet werden. Für die bei den Spritzbetonversuchen verwendete MgCl₂-Lösung ist eine Düse mit einem Sintermetallfilter ungeeignet, da die Lösung zu dicht und viskos ist, um einen konstanten Zufluss zu gewährleisten. Es ist außerdem darauf zu achten, dass die Löcher, über die die Lösung eingebracht wird, ausreichend groß und in ausreichender Menge vorhanden sind. Dies sollte idealerweise erprobt werden. Es gilt jedoch, je höher die Dichte und Viskosität der Flüssigkeit, desto größere Löcher und/oder mehr Löcher sind nötig.

Für eine homogene Förderung des Trockengemisches muss der Schlauch möglichst gerade bzw. in großen Schlaufen liegen.

Um am Versuchsort gute Sichtverhältnisse zu gewährleisten, müssen ausreichend Licht und Bewetterung bzw. Lüfter vorhanden sein. Insbesondere der Düsenführer muss das Spritzen und die Haftung an der Wand optisch bewerten und bei Bedarf die Lösungszufuhr nachregeln. Die Bewetterung ist von entscheidender Bedeutung für die Sicht des Düsenführers. Die Staubentwicklung zusammen mit dem Rückprall ist so, dass sich auf der Kleidung des Düsenführers bereits nach kurzer Zeit eine dünne Schicht ablagert. Der Düsenführer muss mit Maske düsen (siehe Abbildung 149).



Abbildung 149: Düsenführer beim Spritzen

Neben der Technik muss auch die Rezeptur stets eingehalten werden. Vor dem Einfüllen des Zuschlages und des MgO in den Mischer sind die Massen der Rezepturbestandteile exakt zu wiegen und zu prüfen bzw. sind diese entsprechend dem Zuschlag/MgO-Verhältnis einzufüllen. Für eine homogene Mischung des Trockengemisches sollte die Mischzeit ausreichend lang sein. Bei den in situ Versuchen wurde das Trockengemisch (375 kg - 425 kg) mindestens 5 Minuten gemischt.

Der Lösungsverbrauch muss exakt über eine Messanlage mit kurzer Messtaktung (z. B. 2 Sekunden) aufgezeichnet werden, um bei der Auswertung des Versuches das Lösung/MgO-Verhältnis genau berechnen zu können.

Der Umgang mit der Spritzbetonmaschine erfordert Erfahrung und Wissen. Das Spritzen sollte daher nur von geschultem und erfahrenem Personal durchgeführt werden. Insbesondere der Düsenführer beeinflusst den Spritzprozess und somit die Qualität des Spritzbetons.

Die durchgeführten in situ Spritzbetonversuche haben gezeigt, dass das Spritzergebnis sehr stark von der richtigen Technik, dem richtigen Umgang und den geeigneten Einstellungen von der Maschine und vor allem auch vom guten Zusammenspiel des Personals abhängig ist. Es ist daher zwingend notwendig, vor dem Bau des eigentlichen Bauwerkes mit MgO-Spritzbeton ein Probepuzzeln unter realen in situ Bedingungen am späteren Versuchsort bzw. Verschlussbauwerk in mehreren Schichten mit denselben Ausgangsstoffen auszuführen. Dabei müssen Probekerne ausgebohrt und auf Lunker begutachtet werden, die Dichte und die Permeabilität der Kerne bestimmt werden und die Festigkeit (Druck- und Haftfestigkeit) untersucht werden. Entscheidend ist, dass sich bei der ausführenden Mannschaft eine steile Lernkurve einstellt. Auch die Mannschaft der Forschungsnehmer unterlag dieser Lernkurve. Düsenführer aus dem Tunnelbau, die konventionellen Spritzbeton mit Zement als Bindemittel bereits verspritzt haben, gibt es viele. Der MgO-Beton ist jedoch ein komplett anderes Material hinsichtlich des Spritzens. Hier muss sich auch ein im konventionellen Tunnelbau erfahrener Spritzdüsenführer zwingend einarbeiten.

Bei den Großspritzbetonversuchen untertage waren stets mindestens 4 Personen beteiligt: Düsenführer, Protokollant, Bediener der Spritzbetonmaschine, Laderfahrer zum Einfüllen der BigBags in den Mischer. Für weitere Tätigkeiten (Probenahme, Licht/Lüfter ausrichten, Foto-/Videodokumentation) ist es vorteilhaft, noch mindestens eine weitere Person zur Verfügung zu haben.

Die Qualität der Ausgangsstoffe muss die vorgegebenen Anforderungen erfüllen. Der Zuschlag muss der geforderten Körnungslinie entsprechen. Durch Siebungen vor Beginn der Betonage jeder Schicht muss der Zuschlag geprüft werden. Es dürfen keineswegs größere Körner als das für die Spritzbetonmaschine vorgegebene Größtkorn in die Maschine gelangen, da dies sonst zu Verstopfungen und Ausfallzeiten führt. Um dies sicherzustellen, sollte die Zugabe des Zuschlages über ein Gitter(-rost) mit einer Maschenweite entsprechend des Größtkorns erfolgen.

Die Salzlösung muss so hergestellt werden, dass sie bei den Untertagebedingungen bzw. bei einer Umgebungstemperatur von etwa 25 °C bis 28 °C stabil ist. Die MgO-Lieferware muss einen MgO-Anteil von etwa 80 % aufweisen. Der Talkanteil der MgO-LW sollte bei etwa 5 % liegen, um eine angemessene Klebrigkeit zu gewährleisten. Der CaO-Anteil (Freikalk) sollte unter 0,5 % liegen. Der Zitronensäuretestwert sollte zwischen 150 s und 200 s betragen, damit der MgO-Beton schnell abbindet und bei Spritzbeginn am Folgetag bereits wieder abgekühlt ist. Ein MgO-LW mit geringerer Reaktivität und einem höheren ZTW, wie beim GSBV4 (ZTW ~ 350 s), bindet zu langsam ab, sodass zum Spritzbeginn der nächsten Schicht am Folgetag der Beton noch nicht abschließend abgekühlt ist und so die Temperatur der Folgeschicht höher wird aufgrund der noch warmen unterliegenden Schicht.

Alternativ muss die Wartezeit vor dem Aufbringen der neuen Schicht so vergrößert werden, dass die zuletzt aufgebrachte Spritzbetonschicht weitgehend abgekühlt ist. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die sich einstellende Temperatur in der frisch gespritzten Schicht aus MgO-Beton wesentlich höher ist als in einem konventionellem Spritzbeton mit Zement im Tunnelbau.

Die sich einstellende Maximaltemperatur im MgO-Spritzbeton ist von folgenden Parametern abhängig:

- 1) Verwendete MgO-Menge (und damit der Rezeptur),
- 2) Reaktivität des MgO (ZTW),
- 3) Schichtdicke,
- 4) Untergrundtemperatur zu Spritzbeginn und gespeicherte Wärmemenge in der Untergrundschicht ,
- 5) Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen des Spritzbetonkörpers.

Der Rückprall wurde bei allen 4 in situ Versuchen je Schicht gesammelt und gewogen. Der Rückprallanteil betrug zwischen 26,9 % und 42,3 %. Im Mittel entfielen 29,9 % (GSBV4) bis 33,9 % (GSBV3) der Gesamtspritzbetonmenge auf den Rückprall.

Ein Vergleich des Zuschlages als Lieferware und mit dem Zuschlag, der aus dem Rückprall des GSBV1 herausgewaschen wurde, hat gezeigt, dass der Zuschlag im Rückprall nur sehr geringfügig gröber ist.

Die einzelnen Spritzschichten sollten möglichst eben und gleichmäßig dick aufgetragen werden. Jede Spritzschicht, die innerhalb eines Tages bzw. innerhalb einer Arbeitsschicht gespritzt wurde, bestand aus mehreren Einzellagen mit je ca. 6 cm bis 10 cm Mächtigkeit. Das Spritzen dickerer Schichten kann zum Abrutschen des frischen Spritzbetons führen.

Von einer festen Ebene parallel zur Spritzoberfläche sollte in einem festen Raster die Distanz zur Oberfläche vor und nach dem Spritzen, z. B. mittels Laserentfernungsmesser, gemessen werden.

6.7 Fazit der Festigkeitsuntersuchungen GSBV1, 3 und 4 im Vergleich zum GV2

Für das Vorhaben MgO-S³ wurden in Ergänzung der baubegleitenden Standarduntersuchungen der TUBAF durch das IfG untersucht:

- Die Haftzugfestigkeit von Materialübergängen (BAG) bzw. der Baustoffmatrix im Dammbauwerk GV2 nach einer Reifezeit von ca. 15 Jahren,
- Die Druckfestigkeit, das Relaxationsverhalten und die Haftzugfestigkeit des Spritzbetons an Bohrkernen aus den Großversuchen GSBV1, 3 und 4.

6.7.1 Spaltzug- und Haftzugfestigkeit von Materialübergängen (BAGs) im GV2

Es wurden weitere Kerne in Ergänzung der Ergebnisse des Vorhabens MgO-SEAL [4] aus dem Spritzbetondamm GV2 untersucht. Im Gegensatz zu den früheren Probenahmen mittels Kernbohrungen ist es mit der Bohrung B49 gelungen, Kernproben zu erbohren, die weitgehend ungestört waren. Die Ergebnisse sind als Gesamtheit über die Quartilswerte in Tabelle 75 zusammengefasst, unterteilt nach Ergebnissen an Proben aus der Bohrung B42 und der neuen Bohrung B49.

Tabelle 75: Durchgeführte Haftzugversuche: Anzahl und Quartilswerte der verschiedenen Chargen

Herkunft	GV2		GSBV1				GSBV3	GSBV4
	Matrix /BAG		Matrix	Matrix	Schicht	gesamt	Schichten	Schichten
Quartile	MgO-SEAL (B42)	MgO-S ³ (B49)	(17d)	(23d)	5		2/3/4	1 - 6
n	13	6	5	3	5	13	6	6
min	0,05	3,19	0,69	0,81	0,27	0,27	1,30	0,19
0,25	1,49	3,55	0,79	1,2	0,38	0,69	1,58	1,92
0,5	2,71	4,18	0,82	1,59	0,45	0,81	2,58	2,40
0,75	4,07	4,47	1,01	1,705	0,74	1,01	2,87	2,57
max	6,67	5,29	1,06	1,82	0,89	1,82	2,95	3,26

Damit können die gemessenen Festigkeiten von Proben aus dem GV2 qualitativ in unterschiedliche Festigkeitsklassen eingeordnet werden, wobei insbesondere die Proben aus der Bohrung B42 das gesamte Variationsspektrum abdecken:

- offenbar vorgeschädigte Proben: $0,05 \text{ MPa} < \sigma_T < 1 \text{ MPa}$ (der kleinste gemessene Wert für σ_T betrug $0,05 \text{ MPa}$)
- intakte BAG (mutmaßlich nur geringe lokale Fehlstellen) oder Matrix: $\text{ca. } 2 \text{ MPa} < \sigma_T < 4,2 \text{ MPa}$
- kompakte Spritzbetonmatrix: $\sigma_T: > 4,2 \text{ MPa}$ (kleinster Messwert), Maximalwerte bis ca. $6,7 \text{ MPa}$

Anzumerken ist noch, dass die in den begleitenden Baustoffuntersuchungen durchgeführten Spaltzugversuche noch eine deutlich höhere Festigkeit (zwischen $7,4 \text{ MPa}$ und $10,8 \text{ MPa}$) ergaben. Allerdings entspricht die beim Spaltzugversuch erzeugte Bruchfläche nicht der schwächsten Zone oder Fläche im Probekörper, sondern es entwickelt sich, entsprechend der eingeleiteten Spannungsgeometrie, üblicherweise ein steilstehender Riss. Beim einachsigen Zugversuch (in Richtung der vorliegenden BAG) deckt sich die Bruchfläche mit der schwächsten Zone im Prüfkörper.

Das bedeutet, nur der direkte Zugversuch liefert realistische Ergebnisse zur Charakterisierung der Zugfestigkeit von Schwächeflächen im Dammbauwerk. Bei BAG kann die Haftzugfestigkeit gegenüber der Baustoffmatrix abgemindert sein.

6.7.2 Haftzugfestigkeit aus den GroÙspritzbetonversuchen GSBV1, 3 und 4

In Analogie zu den Kernuntersuchungen von Proben aus dem Spritzbetondamm GV2 wurden jeweils auch Proben aus den GroÙspritzversuchen GSBV1, 3 und 4 erbohrt und an intakten Proben die Haftzugfestigkeit bestimmt. Beim GSBV3 und GSBV4 kam erstmals die modifizierte Spritzbetonrezeptur mit Salzzuschlag zum Einsatz, womit größere Schichtmächtigkeiten als beim GV2 gespritzt werden konnten. Deshalb fand hier keine Differenzierung nach Betonageübergängen statt. Die Messwerte spiegeln deshalb im wesentlichen Matrixeigenschaften wider. Die Quartilswerte der verschiedenen Baustoffproben sind gruppenweise in Abbildung 150 zusammengefasst.

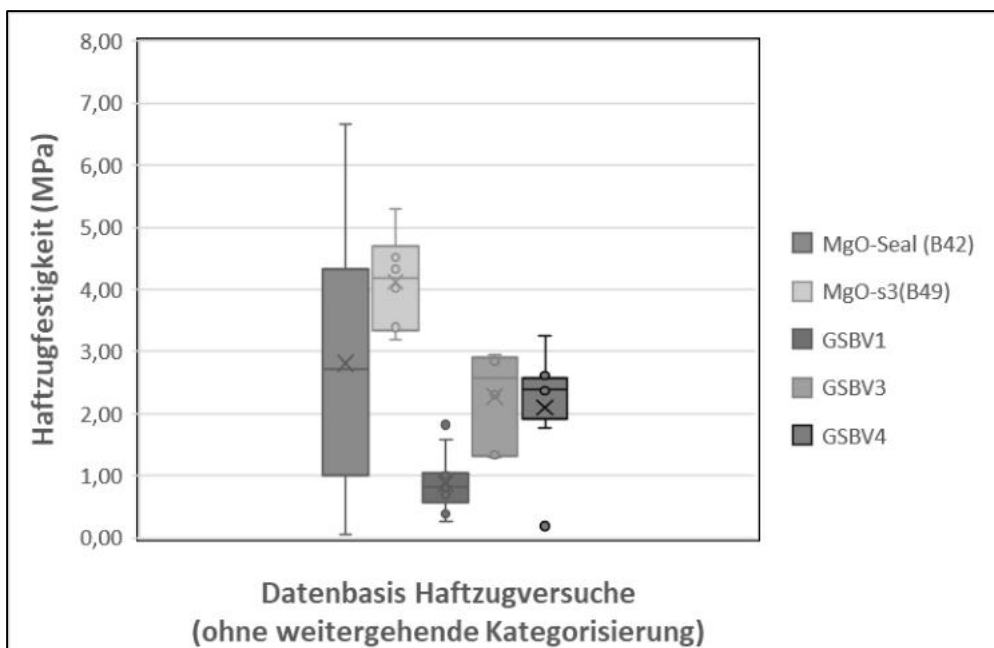


Abbildung 150: Quartilswerte aller Haftfestigkeitsversuche (unterschieden nach Baustoffgruppen) im Rahmen von MgO-S³

Es zeigt sich, dass die Festigkeit der verschiedenen Versuchsgruppen variiert.

- Beim GSBV1 wurde mit einem Median von 0,45 MPa die relativ niedrigste Haftzugfestigkeit gemessen. Dies ist überraschend, weil damit die GV2-Rezeptur reproduziert werden sollte. Allerdings war beim GSBV1 die ausführende Mannschaft noch am Beginn der „Lernkurve“.
- Bei den GSBV3 und GSBV4 wurde Salzzuschlag verwendet. Im Wiederholungsversuch GSBV4 mit der Optimierung der Spritzbeton-Technologie nahm die mittlere Festigkeit gegenüber den Proben aus dem GSBV3 zu. Die Haftzugfestigkeit lag meist zwischen 1,9 MPa und 2,6 MPa.

In der neuen Spritzbetonrezeptur führt der Wechsel vom Silikat- zum Salzzuschlag zwangsläufig zu einer geringen Festigkeitsabnahme innerhalb der Baustoffmatrix, da die Druckfestigkeit und auch die Haftfestigkeit des Salzzuschlages geringer ist als die Festigkeit des silikatischen Zuschlages.

6.7.3 Triaxiale Druckfestigkeit unterschiedlicher Spritzbetonrezepturen

Die mechanische Festigkeit ist ein Schlüsselparame-ter zur Charakterisierung von Baustoffeigenschaften. Der Reibungswinkel und die Kohäsion sind wichtige Kennwerte von Sorel- beton in numerischen Berechnungen.

Im Vorhaben wurden die Festigkeit von Kernproben aus dem GV2 (nachfolgend als D4-Rezeptur beschrieben) sowie den modifizierten Ansätzen der GV2-Rezeptur mit Salzgruszuschlag mit Indexversuchen bestimmt.

Als Darstellung der unterschiedlichen Festigkeiten sind die aus Mehrstufenversuchen resultierenden Mohr-Coulomb-Geraden als Einzelkurven im Vergleich zu bereits bekannten Laborergebnissen anderer Sorel-Baustoffe in Abbildung 151 zusammengefasst.

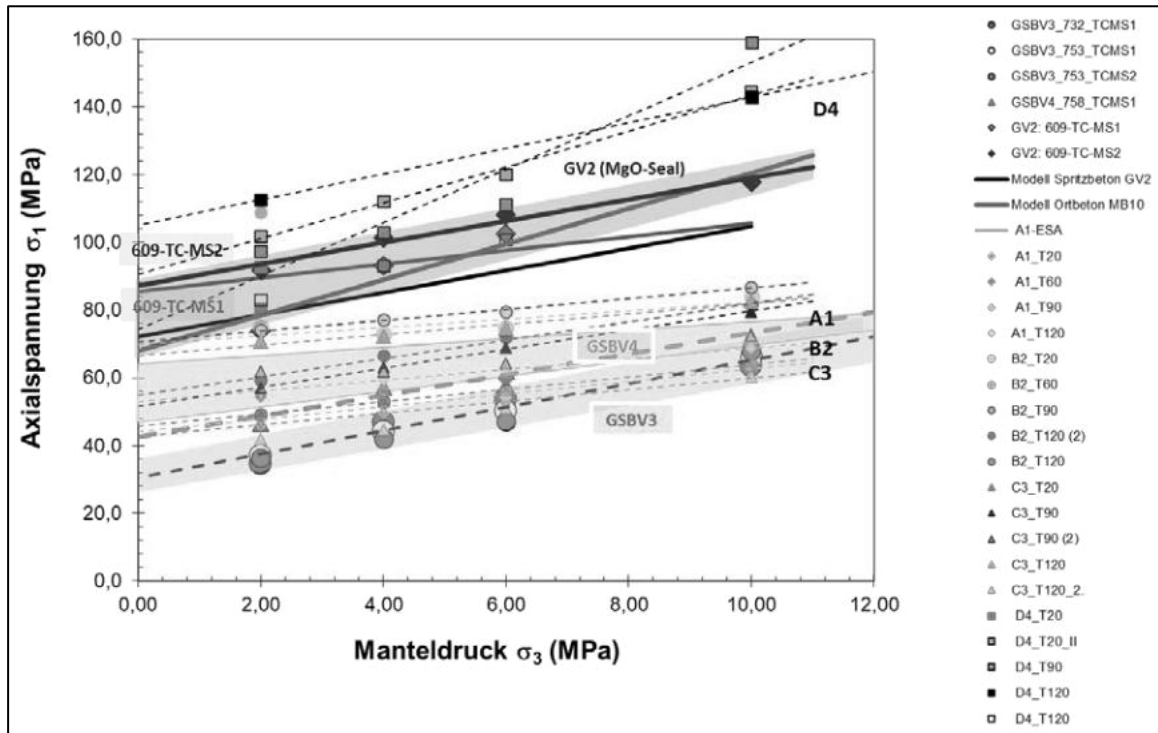


Abbildung 151: MOHR-COULOMB-Diagramm der hier untersuchten Sorelbetonchargen (größte Hauptspannung σ_1 vs. kleinste Hauptspannung σ_{\min} bzw. Manteldruck σ_3). Als Referenz sind Festigkeitskurven anderer Sorelbaustoffe⁸ sowie das gut belegte Variationsfeld der Festigkeitsuntersuchungen an A1-Beton aus dem ESA-Vorhaben [22] dargestellt. Hinweis: für den Vergleich sind vor allem die Streufelder der unterschiedlichen Baustoffe relevant: GV2 (D4: 5:1:8-Rezeptur mit Silikatzuschlag) im Vergleich zu den „neuen“ Chargen GSBV3 bzw. 4 (5:1:8-Rezeptur mit Salzzuschlag)

Die Festigkeitskennwerte der verschiedenen MgO-Rezepturen allgemein, aber hier bezogen vor allem auf die Ergebnisse des GV2 und der Großspritzbetonversuche, zeigen deutliche

⁸ In der Literatur finden sich unterschiedliche Sorelbetonvarianten, die im Rahmen einer vergleichenden Testreihe mit Laboransätzen im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) in Salzgitter beim IfG in 2012 bzgl. ihres Kompaktions- und Festigkeitsverhaltens untersucht wurden (IfG, unveröff. Bericht). In Abstimmung mit dem IfAC wurden dabei die verschiedenen Sorelbaustoff-Rezepturen alphabetisch/zahlenmäßig durchnummeriert: A1 – Asse-Baustoff zum Bau von Strömungsbarrieren (3:1:8-Rezeptur); B2 – DBM2, ein von der Fa. K-UTEC entwickelter Baustoff, der für den Bau einer Abdichtung im Anhydrit im ERAM vorgesehen war (3-1-8-Rezeptur); C3 – R3a-Mörtelvariante aus dem MgO-Projekt der TU-BAF (3:1:8-Rezeptur); D4 – MB10 Ortbeton-Variante aus dem CARLA-Vorhaben (5:1:8-Rezeptur).

Unterschiede, wobei nachfolgend nur qualitativ die Variationsfelder der verschiedenen MgO-Baustoffe und nicht Einzeldaten verglichen werden. Ausgehend von Abbildung 151 können die folgenden Aussagen getroffen werden:

- Die Festigkeitswerte aus dem GV2-Damm mit der 5-1-8-Variante sind entsprechend den früheren Ergebnissen erwartungsgemäß hoch, d.h. $\sigma_{1\text{-uniaxial}} > 70$ MPa. Gleichzeitig verhält sich das Material sehr spröde und auch die Reibungswinkel sind als Folge des Kieszuschlages gegenüber den anderen Sorelbetonrezepturen größer.
- Die Festigkeitswerte mit der neuen Spritzbetonrezeptur mit Salzzuschlag sind niedriger als die der D4-Rezeptur (GV2 - Variationsfeld), obwohl es sich ebenfalls um eine 5-1-8-Baustoffrezeptur handelt. Die für das entsprechende Variationsfeld der neuen Spritzbeton-Rezeptur mit Salzzuschlag abgeschätzte einaxiale Festigkeit σ_1 liegt nur zwischen 30 MPa und 65 MPa. Sie liegt damit in der gleichen Größenordnung wie die Festigkeit der eher „gering fester“ eingestuft 3-1-8-Baustoffvarianten.
- Im Detail unterscheiden sich die Daten aus den Einzelversuchen der beiden neuen Spritzbetonversuche mit Salzgrus als Zuschlag, z.B. sind die Festigkeitswerte aus dem GSBV3-Variationsfeld etwas niedriger als aus dem GSBV4-Variationsfeld, obwohl es sich um die gleiche 5-1-8-Bindemittelrezeptur handelt. Allerdings wurde beim GSBV4 die Spritztechnologie noch optimiert.
- Insgesamt ist überraschend, dass die Festigkeit der neuen 5-1-8-Rezeptur mit Salzzuschlag so deutlich niedriger ist als die Festigkeit aus dem GV2, wo Silikatzuschlag verwendet wurde. Dies widerlegt die frühere Annahme, dass ausschließlich die Bindemittelzusammensetzung (hier dominierend die 5-1-8-Phase) für die Festigkeit entscheidend ist. Bei den neuen MgO-Spritzbetonversuchen GSBV3 und GSBV4 dominiert offenbar das plastische Verformungsverhalten des mittelkörnigen Salzzuschlages, wobei dies zunächst eine Arbeitshypothese ist.

Gleichzeitig ist festzuhalten, dass die hier vorliegenden Beobachtungen und Einschätzungen vorläufig sind und noch durch weitere Untersuchungen abgesichert werden müssen.

6.8 Permeabilitätsmessungen an Kernproben

6.8.1 Gaspermeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial

Aus Kernmaterial aus den Bauwerken GV2, GSBV1, GSBV3 und GSBV4 sowie aus dem Kernmaterial des Technikumsversuches SBV-7A wurden Proben für die Gaspermeabilitätsuntersuchungen präpariert und getestet. Die Methodik ist in Anlage 1.9 ausgeführt. Die Entnahmetiefe der untersuchten Proben ist in den Untersuchungsprogrammen in Anlage 3.2 aufgeführt.

Es wurden Kernproben senkrecht und parallel zur BAG untersucht. Die Ergebnisse sind in Anlage 4 zusammenfassend für getesteten Spritzbetonbauwerke dargestellt. Die Entnahmetiefe der Proben für die Laboruntersuchungen orientierte sich an den Teufen der Prüflintervalle der in situ-Untersuchungen zur Gaspermeabilität in den unterschiedlichen Bauwerken.

Im Verlauf der Untersuchungen wurden gezielt Proben aus Bereichen der BAG getestet. In Abbildung 152 sind vergleichend die Bereiche der in situ Testung und die Probeentnahmebereiche der Laborproben für die Bohrung B31 im GSBV4 dargestellt.

Aus der Bohrung B32 (GSBV4) wurde eine Kernprobe aus dem Bereich einer BAG untersucht siehe Abbildung 153.

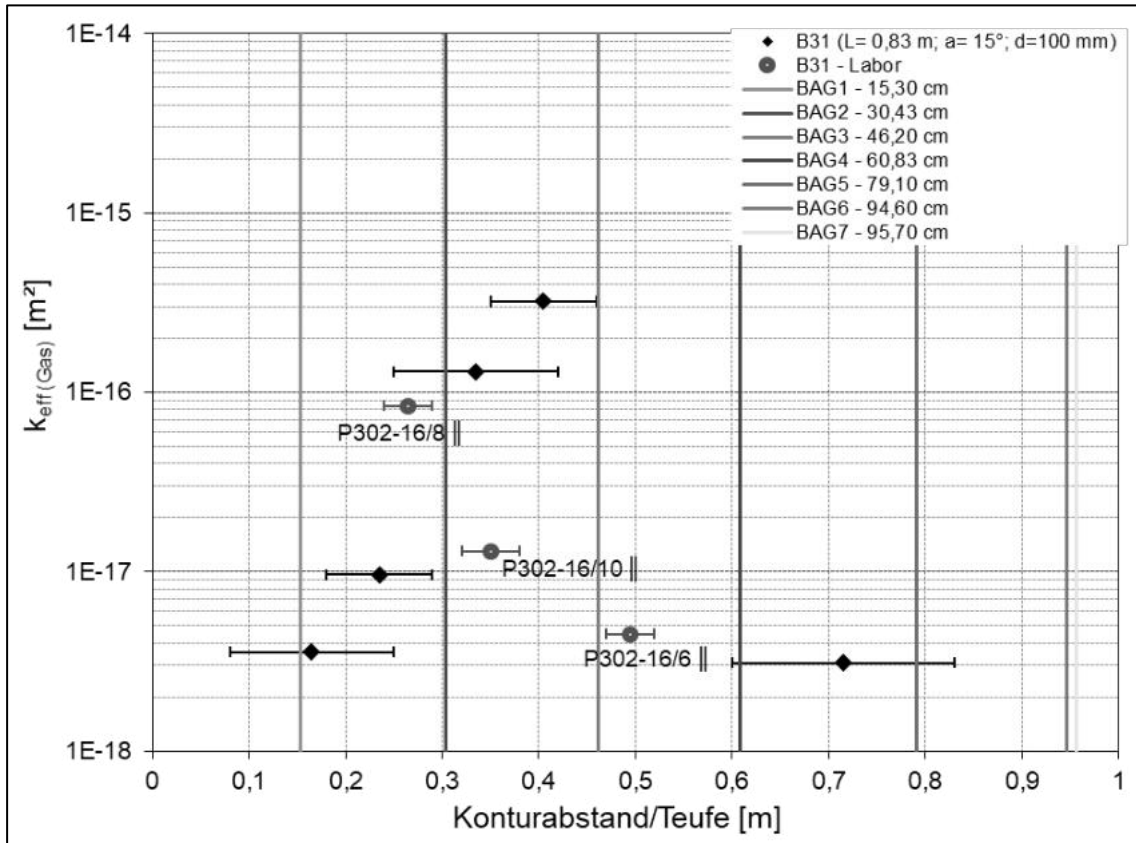


Abbildung 152: Darstellung der Gaspermeabilität, gemessen in situ und an Kernproben aus der Bohrung B31

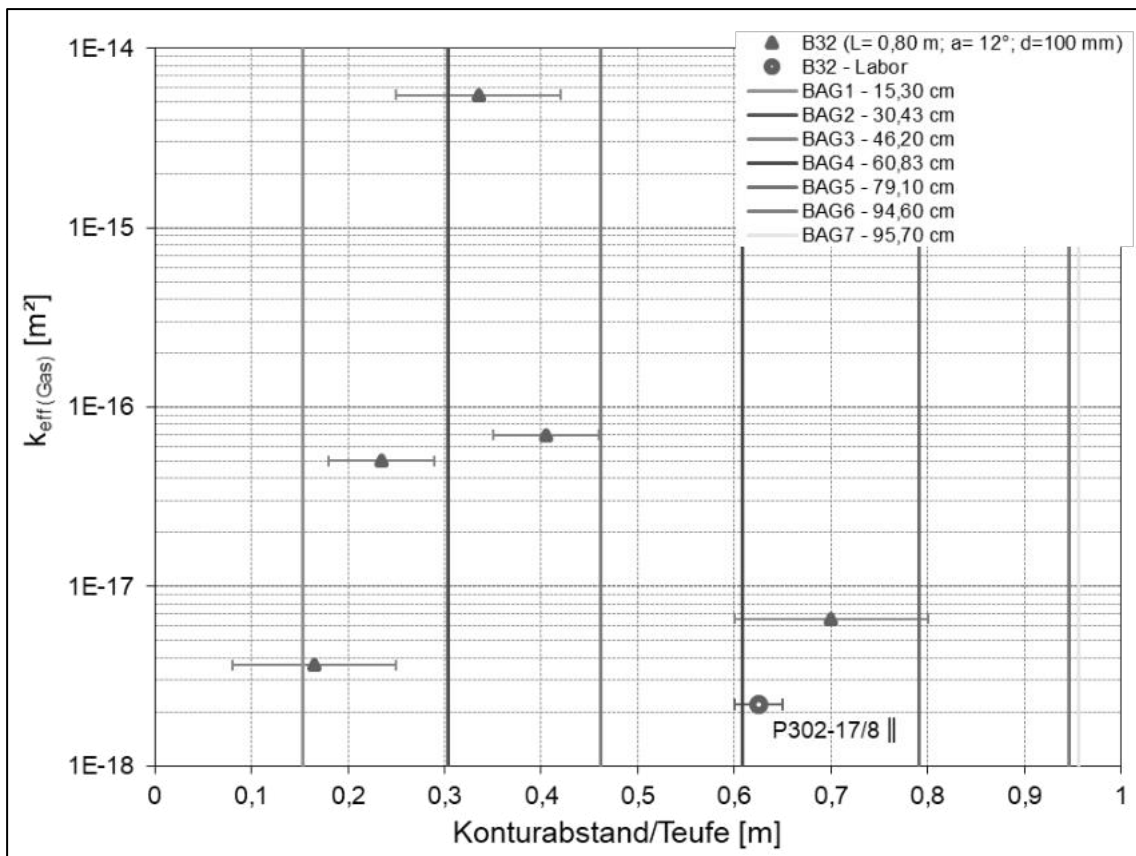


Abbildung 153: Darstellung der Gaspermeabilität, gemessen in situ und an Kernproben aus der Bohrung B32

Aus zwei weiteren Bohrungen GSBV4-B17 und GSBV4-B19 wurden zusätzlich Kernproben für die Untersuchungen zur Gaspermeabilität präpariert. Dafür wurden mehrere mögliche Entnahmebereiche durch das HZDR im Vorfeld der Probenpräparation durch μ CT-Aufnahmen lokalisiert (Abbildung 154a, Abbildung 155a). Ziel war es, Bereiche mit höherer Porosität und möglichen Wegsamkeiten zu lokalisieren und zu testen [1].

Diese Bereiche wurden durch das HZDR gekennzeichnet (siehe Abbildung 154a [1]), vermessen und durch IBeWa für die Messungen zur Gaspermeabilität präpariert (siehe Abbildung 154 und Abbildung 155).

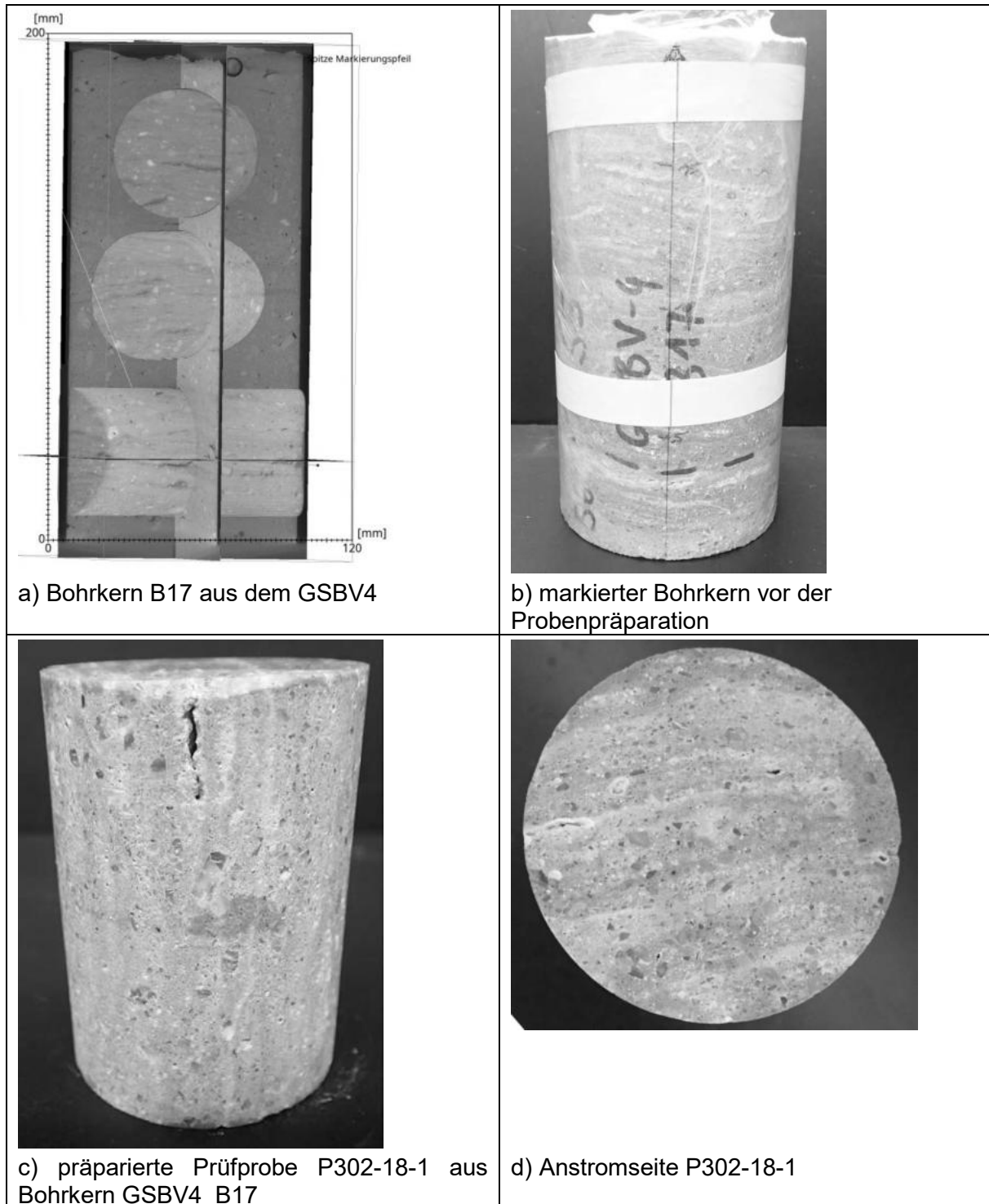


Abbildung 154: Probenpräparation aus Bohrkern B17 aus dem GSBV4

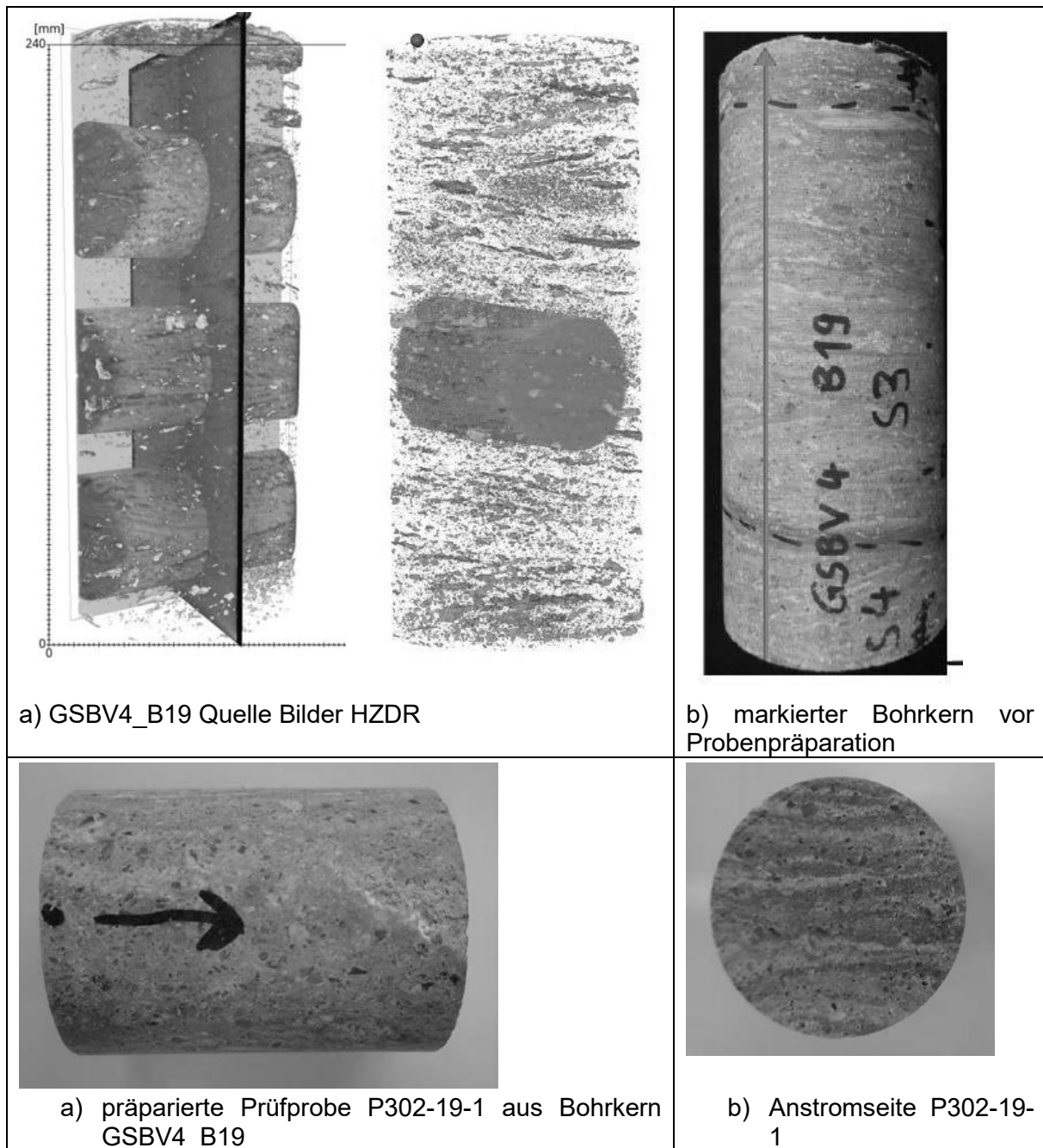


Abbildung 155: Probenpräparation aus dem Bohrkern B19 aus dem GSBV4

Die an den präparierten Proben ermittelte Permeabilität für Gas liegt im Mittel aus 2 Proben bei $4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Weitere Untersuchungen zur Permeabilität mit Lösung an diesen Proben wurden aufgrund der geringen Permeabilität für Gas zurückgestellt.

Im Ergebnis aller Untersuchungen wurden zehn Kernproben aus unterschiedlichen Bauwerken parallel zur BAG mit Gas durchströmt. Im Mittel liegt die Permeabilität bei $2,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ($2,2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 - 4,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$; $N = 10$).

Senkrecht zu den Spritzbetonschichten wurde an 15 Kernproben die Permeabilität für Gas ermittelt. Im Mittel liegt diese bei $1,1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ($1,4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2 - 2,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$; $N = 15$).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 76 zusammengefasst.

Tabelle 76: Ergebnisse der Gaspermeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial

Bohrung	Bauwerk	Probenbezeichnung	Teufe MP	Orientierung zu BAG	Gaspermeabilität
-	-	-	[m v. AP]	-	[m ²]
B48	GV2	P302-2/4	1,84	parallel	$1,2 \cdot 10^{-17}$
		P302-2/5	2,01	parallel	$2,8 \cdot 10^{-18}$
		P302-2/13	2,03	senkrecht	$2,5 \cdot 10^{-17}$
		P302-2/14	2,05	senkrecht	$4,2 \cdot 10^{-19}$
		P302-2/18	2,13	senkrecht	$4,0 \cdot 10^{-18}$
		P302-2/19	2,15	senkrecht	$6,8 \cdot 10^{-19}$
B35	GSBV1	P302-7/2	0,36	senkrecht	$5,0 \cdot 10^{-18}$
P302-7/4		0,59	senkrecht	$8,7 \cdot 10^{-19}$	
B36		P302-8/2	0,10	senkrecht	$6,1 \cdot 10^{-19}$
P302-8/4		0,90	senkrecht	$1,4 \cdot 10^{-18}$	
B36	GSBV3	P302-9/2	0,16	senkrecht	$1,4 \cdot 10^{-19}$
		P302-9/4	0,66	senkrecht	$1,5 \cdot 10^{-19}$
		P302-9/5	0,49	parallel	$4,2 \cdot 10^{-15}$
		P302-9/6	0,78	parallel	$4,4 \cdot 10^{-15}$
B5	SBV5A	P302-11/1	k.A.	senkrecht	$1,6 \cdot 10^{-18}$
		P302-11/2	k.A.	senkrecht	$9,1 \cdot 10^{-19}$
		P302-11/3	k.A.	senkrecht	$3,4 \cdot 10^{-19}$
B7	SBV7A	P302-12/2	k.A.	senkrecht	$1,2 \cdot 10^{-18}$
B8		P302-13/2	k.A.	senkrecht	$2,5 \cdot 10^{-18}$
B31	GSBV4	P302-16/6	0,50	parallel	$4,5 \cdot 10^{-18}$
		P302-16/8	0,27	parallel	$8,4 \cdot 10^{-17}$
		P302-16/10	0,35	parallel	$1,3 \cdot 10^{-17}$
B32		P302-17/8	0,63	parallel	$2,2 \cdot 10^{-18}$
B17		P302-18/1	k.A.	parallel	$5,5 \cdot 10^{-18}$
B19		P302-19/1	k.A.	parallel	$3,0 \cdot 10^{-18}$

k.A. keine Angabe

In Bezug auf Permeabilitätsunterschiede zwischen Bereichen mit Betonierabschnittsgrenzen und Bereichen kompakten Spritzbetons wird geschlussfolgert, dass sowohl Betonierabschnittsgrenzen mit höherer Gaspermeabilität in der Größenordnung $> 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ (gemessen in situ) als auch mit einer Permeabilität im Bereich des kompakten Spritzbetons existieren.

6.8.2 Permeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial mit Lösung

Die Lösungspemeabilität des MgO-Betons wurde im instationären Zweikammerversuch ermittelt. Eine Übersicht der Versuchsmethodik wird in Anlage 1.9 gegeben.

Die Permeabilitätsuntersuchungen wurde mit NaCl-gesättigter 2 molaler MgCl₂-Lösung (repräsentative Standortlösung HAW-Endlager im Steinsalz) durchgeführt.

Aus den vorliegenden Erfahrungen für die Durchströmung von hydraulisch abbindenden Materialien mit mineralisierter Lösung ist davon auszugehen, dass Wechselwirkungen zwischen

der Lösung und MgO-Beton (u.a. Lösungs- und Kristallisationsprozesse mit Volumenzunahme → Kristallisationsdruck, Reaktionen mit Volumenabnahme) auftreten können. Diese führen zu einer Veränderung des Porengefüges durch Volumenvergrößerung und/oder -reduzierung sowie daraus resultierend zu einer Beeinflussung des Porenraumes und der Permeabilität.

Darüber hinaus ist für die Lösungsströmung ebenfalls der Einfluss der Zweiphasenströmung zu berücksichtigen. Dieser resultiert aus der anfänglichen Untersättigung des Porenraumes mit Lösung bzw. der Gasphase im Porenraum. Trotz der Lösungsaufnahme der Prüfkörper während der Aufsättigung ist ein Restgasgehalt im Porengefüge nicht auszuschließen. Die Zweiphasenströmung wird bestimmt von der Porengrößenverteilung des Materials, den Benetzungseigenschaften der Fluide und dem daraus resultierenden Kapillardruck sowie den sich in Abhängigkeit von der Phasenverteilung im Porenraum ergebenden Permeabilität (relative Permeabilität) für Gas und Lösung.

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

An zwei Prüfkörpern aus dem GSBV3 und an einem Prüfkörper aus dem GSBV4 wurde die Lösungspermeabilität untersucht. Die Prüfkörper sind in Abbildung 156 bis Abbildung 160 dargestellt.

An allen 3 Proben wurde vor der Messung der Lösungspermeabilität die Permeabilität für Gas ermittelt (s. Tabelle 76).

Für die Probe P302-16/8 wurden zusätzlich umfangreiche Untersuchungen am HZDR [1] in den Untersuchungsablauf bei IBeWa (siehe Anlage 3.3.4) eingereiht.

Nach der Messung zur Gaspermeabilität wurde die Probe P302-16/8 am HZDR untersucht, zusätzlich wurde nach der Untersuchung beim HZDR die Permeabilität mit Lösung bestimmt. Dafür wurde die Probe nach dem Gastest an das HZDR im eingespannten Zustand übergeben und in möglichst kurzer Zeit in die Probezelle des HZDR eingebaut. Dafür waren im Vorfeld technische Abstimmungen erforderlich. Der Umbau erfolgte reibungslos und die Zelle wurde nach kurzzeitiger Entspannung mit ca. 10 bar wieder eingespannt. Die Ergebnisse der Untersuchungen am HZDR sind in [1] ausgeführt.

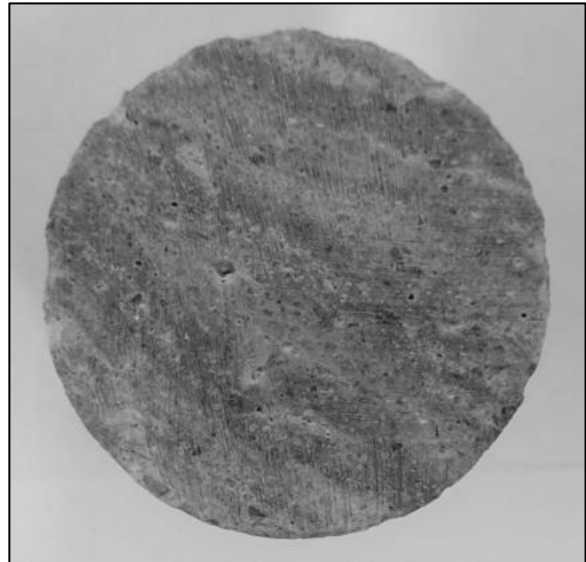


Abbildung 156: Probe P302-9/5 vor Messung k_L

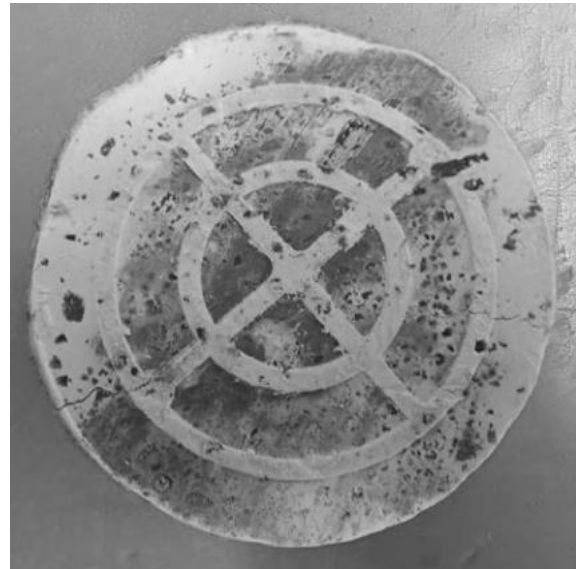
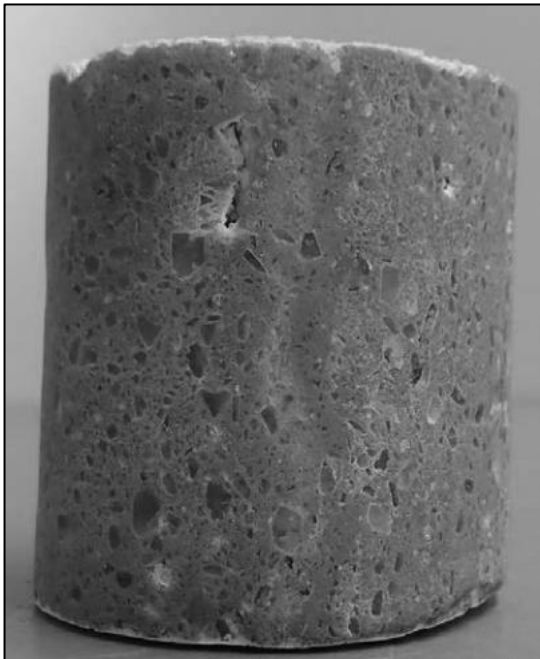


Abbildung 157: Probe P302-9/5 nach Messung k_L

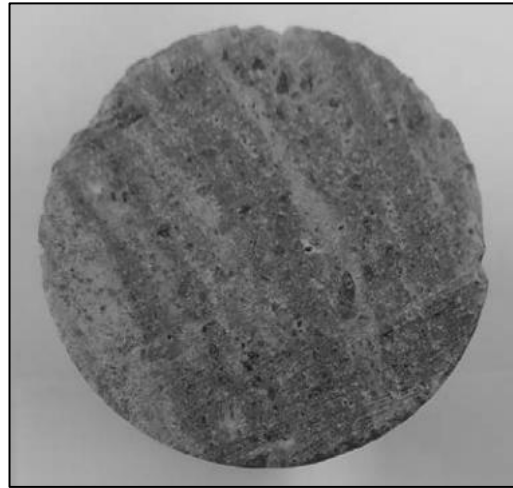


Abbildung 158: Probe P302-9/6 vor Messung k_L

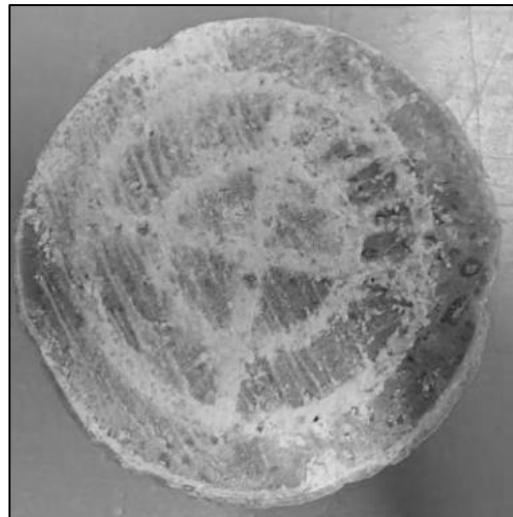


Abbildung 159: Probe P302-9/6 nach Messung k_L

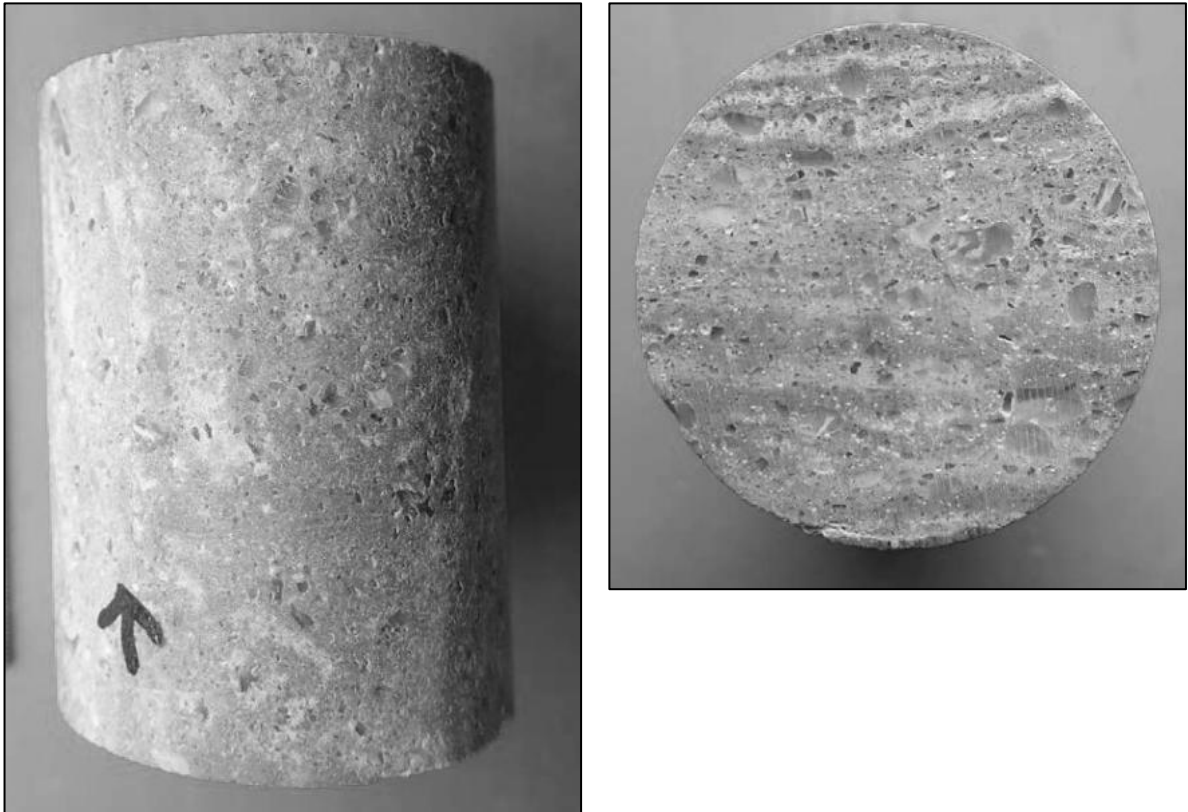
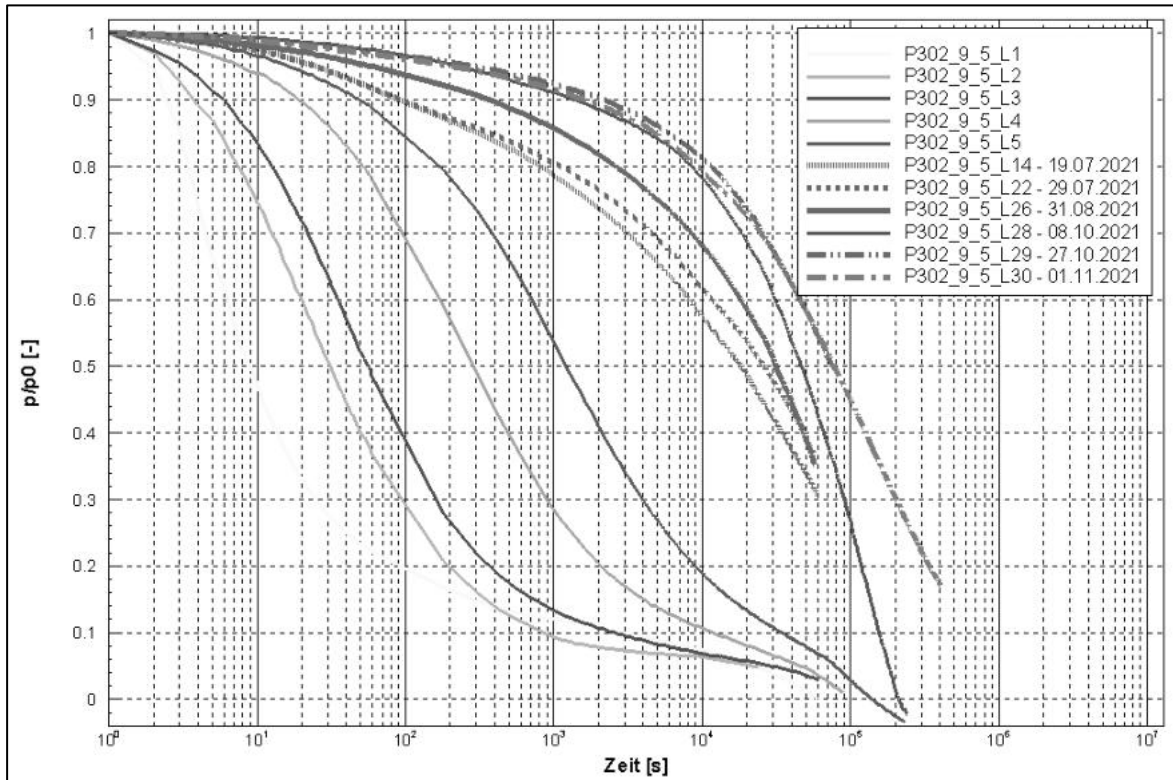
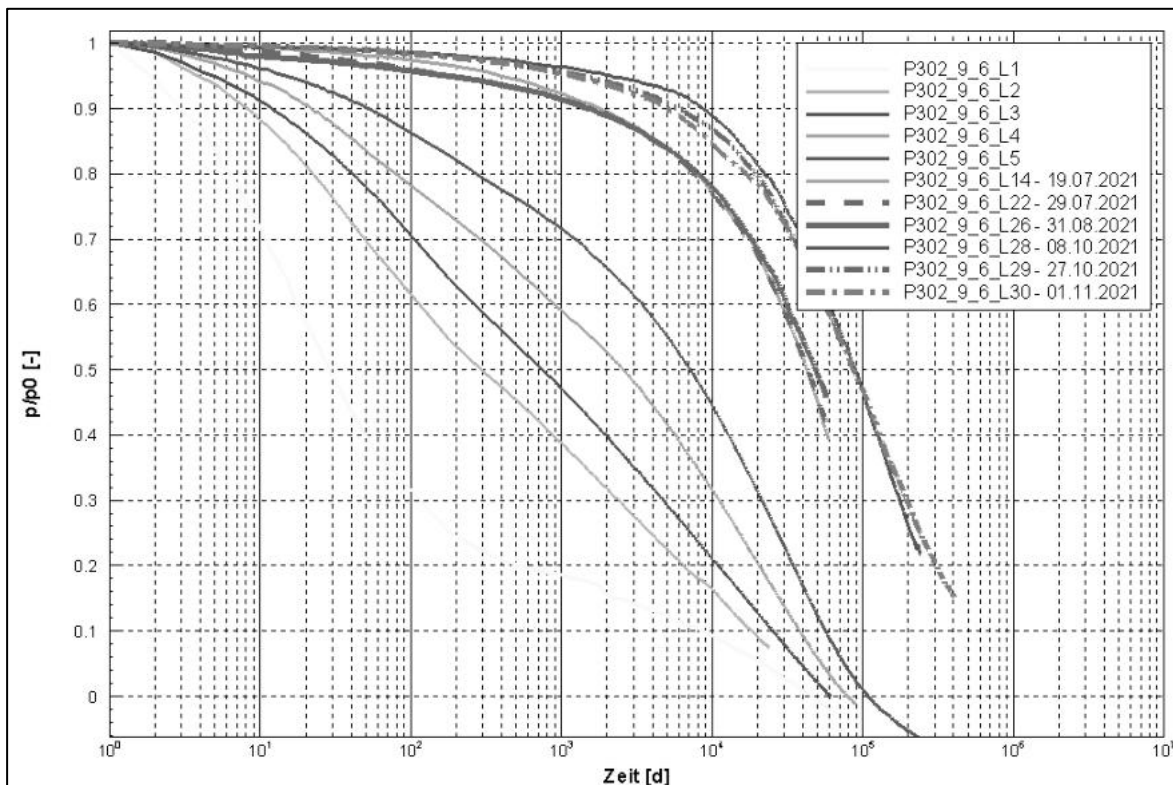


Abbildung 160: Probe P302-16/8 vor Messung k_L Anstromseite

Die Abbildung 161, Abbildung 162 und Abbildung 163 zeigen die Druckganglinien der untersuchten Proben. Die Proben wurden im Rahmen der ersten Messungen aufgesättigt. Bei keiner der durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung der Permeabilität für Lösung konnten reproduzierbare Druckganglinien erzielt werden. In unregelmäßigen Abständen wurde die Permeabilität gemessen und ausgewertet. Mit zunehmender Einspanndauer und zunehmender Aufsättigung der Probe nimmt die Permeabilität der Probe für Lösung ab. Das ist positiv zu bewerten.

Abbildung 161: Druckganglinien p/p_0 für die Probe P302-9/5Abbildung 162: Druckganglinien p/p_0 für die Probe P302-9/6

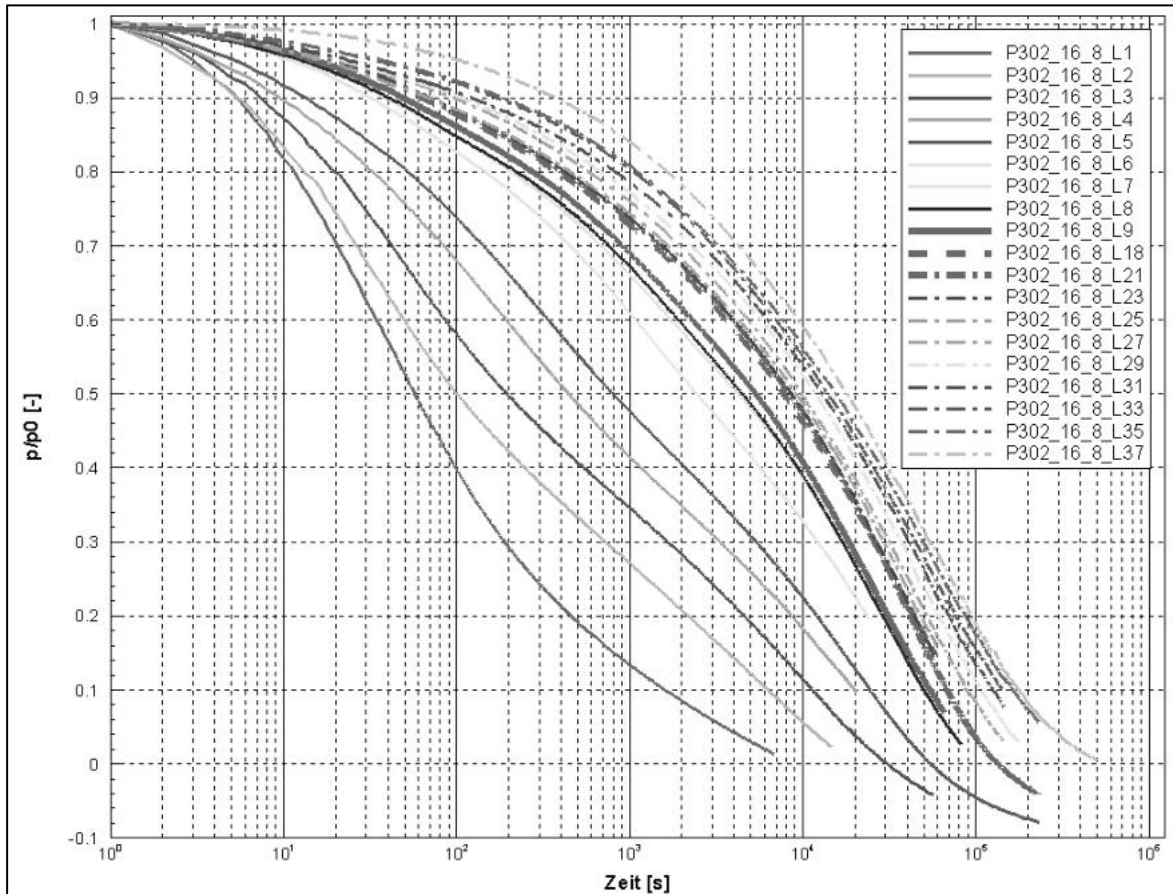


Abbildung 163: Druckganglinien p/p_0 für die Probe P302-16/8

Die Sekundärreaktionen in dem untersuchten Baustoff beim Kontakt mit der Versuchslösung führten zu einem Anstieg des Manteldruckes.

Insgesamt waren die Proben P302-9/5 und P302-9/6 aus der Bohrung B36 im GSBV3 mehr als 2700 Stunden eingespannt. Anfangs wurde der steigende Manteldruck in Abständen auf den zu Versuchsbeginn eingestellten Druck von 1,1 MPa zurückreguliert (siehe Abbildung 164). Im weiteren Versuchsverlauf wurde die Entwicklung des Manteldruckes aufgezeichnet. Die Probe P302-16/8 (GSBV4) war insgesamt ca. 1300 h eingespannt, der Manteldruck wurde über die gesamte Versuchsdauer erfasst (Abbildung 164).

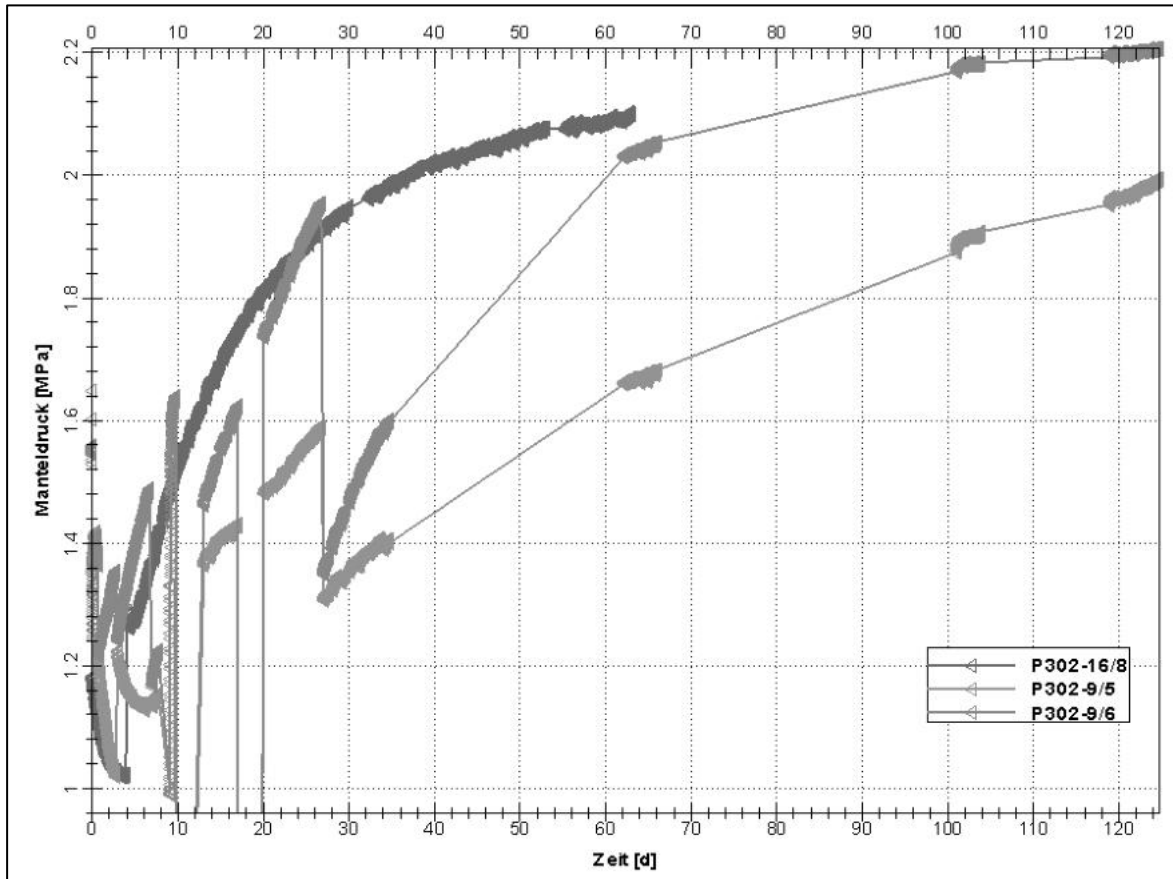


Abbildung 164: Manteldruck über die Versuchsdauer der Messungen zur Lösungspermeabilität von Kernmaterial aus dem GSBV3 und GSBV4

In Abbildung 165 ist die ermittelte Lösungspermeabilität für die drei untersuchten Proben in Abhängigkeit von der Einspanndauer/Versuchsdauer dargestellt.

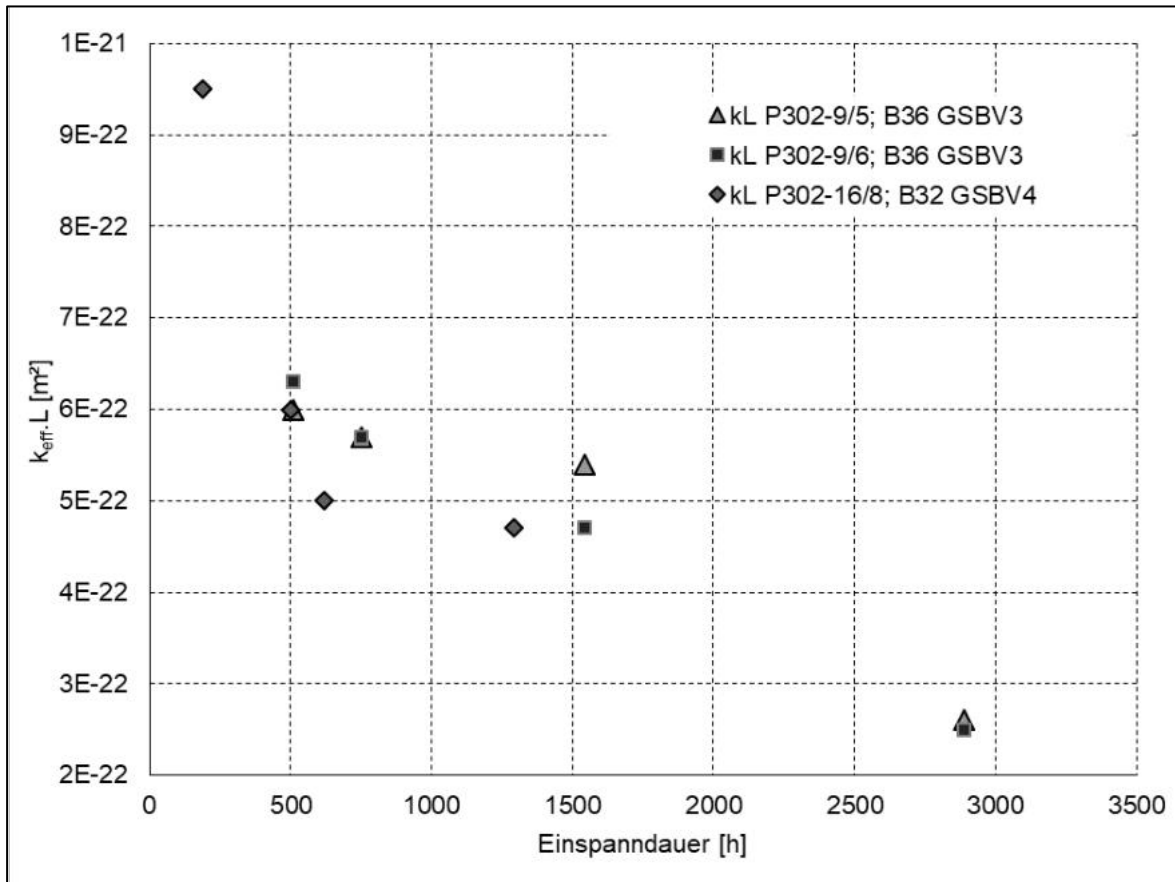


Abbildung 165: Lösungspermeabilität von Kernmaterial aus den Bohrungen B36 (GSBV3) und B32 (GSBV4)

Die effektive Permeabilität nimmt bei allen drei Proben im Lauf der Zeit ab. Von 500 Stunden bis 1800 Stunden Einspanndauer hat die Permeabilität um den Faktor 2 abgenommen. Für den Zeitraum kleiner 500 h Einspanndauer liegt nur eine einzige Probe vor, sodass hier keine generelle Aussage getroffen wird. Die Ergebnisse der Versuche deuten darauf hin, dass die angreifende Lösung im Porenraum/Baustoff zu Sekundärreaktionen führt und diese Rekristallisationsprozesse mit einem Kristallisationsdruck einhergehen. Dieser entstehende Druck führt zu einer Veränderung des für den Strömungsprozess wirksamen Porenraumes. Die gemessene Permeabilität deutet daraufhin, dass sich der Porenraum durch die Sekundärmineralisation verkleinert.

7 Laboruntersuchungen zur Vervollständigung der Datenbasis für MgO-Spritzbeton (AP3)

7.1 Untersuchungen zur Frühfestigkeit des MgO-Betons

Für die Ermittlung der Frühfestigkeit verschiedener Rezepturen wurden im Labor Prüfkörper hergestellt und die Frühfestigkeit mittels Penetrometer gemessen. Da der Spritzprozess im Labor nicht nachgestellt werden kann, wurden die Bestandteile händisch vermengt und statisch mittels einer Presse verdichtet (s. Abbildung 166).



Abbildung 166: Presse zum Verdichten der Prüfkörper im Labor

Die Zusammensetzung der einzelnen Versuche ist in Tabelle 77 aufgelistet. Je Versuch und Rezeptur wurden 3 Probekörper gleichzeitig hergestellt. Es wurden zunächst die trockenen Komponenten abgewogen und vermengt, wie auch bei der Verarbeitung mit der Spritzmaschine, anschließend die Lösung zugegeben, vermengt und zügig in die Prüfformen eingearbeitet. Dabei wurde das Material lagenweise eingebaut und je Lage mit der Presse verdichtet. Die Prüfkörper hatten einen Durchmesser von etwa 50 mm und eine Höhe von ca. 100 mm.

Tabelle 77: Rezepturen der Labor-Betonproben

Versuch	Verhältnis Lösung/MgO	Verhältnis Zuschlag/MgO	Zuschlagart	Massenanteil [%]		
				Zuschlag	MgO	Lösung
1	0,73	4,68	Sand/Kies (0-8mm)	73,0	15,6	11,4
2	0,73	4,68		73,0	15,6	11,4
3	0,73	4,68		73,0	15,6	11,4
4	0,70	4,59		73,0	15,9	11,1
5	0,80	4,87		73,0	15,0	12,0

Versuch	Verhältnis Lösung/MgO	Verhältnis Zuschlag/MgO	Zuschlagart	Massenanteil [%]		
				Zuschlag	MgO	Lösung
6	0,73	4,67	Salz	73,0	15,6	11,4
7	0,73	1,73	(0-8mm)	50,0	28,9	21,1
8	0,82	4,92	Sand/Kies	73,0	14,8	12,2
9	0,95	5,27	(0-8mm)	73,0	13,8	13,2
10	0,73	4,68	Sand/Kies	73,0	15,6	11,4
11	0,82	4,93	(0-8mm) + Talk	73,0	14,8	12,2
12	0,73	4,68	Salz	73,0	15,6	11,4
13	0,85	3,90	(0-8mm) + Talk	67,8	17,4	14,8
14	0,73	4,68	Sand/Kies	73,0	15,6	11,4
15	0,73	4,68	(0-8mm)	73,0	15,6	11,4
16	0,90	4,00	Salz (0-8mm)	67,8	17,0	15,2
17	0,82	4,32	Salz (0- 2mm) + Kies (2-8mm)	70,4	16,3	13,3

Nach der Herstellung der Prüfkörper wurde die Frühfestigkeit mit dem Penetrometer über einen Zeitraum von 6 Minuten bis etwa 3 Stunden bestimmt. Je Prüfkörper wurde 2- bis 3-mal gemessen.

In Abbildung 167 ist die Festigkeitsentwicklung an den Laborproben dargestellt. Dabei sind mit Kreisen die Rezepturen mit Quarzzuschlag, mit Dreiecken mit Salzzuschlag und mit einem Kreuz mit dem kombinierten Salz-Kies-Zuschlag gekennzeichnet. Außerdem sind die Rezepturen, die zusätzlichen Talk enthalten, gestrichelt markiert. Hier wurde ein MgO verwendet, das statt 5 % Talkanteil 10 % Talk enthält.

Bei allen Proben ist die Festigkeitszunahme nur sehr gering. Die Anfangsfestigkeit der Proben mit Quarzzuschlag beträgt zwischen 0,08 MPa und 0,14 MPa. Die Anfangsfestigkeit der Proben mit Salzzuschlag ist mit 0,19 MPa bis 0,30 MPa deutlich höher. Die höchste Anfangsfestigkeit wurde bei den Proben mit 10 % Talkanteil erreicht. Auch ist hier die Festigkeitszunahme stärker.

In [20] wurde die Frühfestigkeit an weiteren Proben mit verschiedenen Rezepturen nach identischem Vorgehen bestimmt.

Die Konsistenz und die Struktur der im Labor hergestellten Proben unterscheidet sich deutlich von den gespritzten Betonproben. Die Labor-Proben sind weniger kompakt. Die Unterschiede sind durch die Art der Betonherstellung bedingt. Der Spritzbeton wird dynamisch und mit hoher Geschwindigkeit aufgetragen, während im Labor die Presse das Material statisch verdichtet. Dadurch ergibt sich ein anderes Korngefüge. Eine Korrelation bezüglich der Festigkeit zwischen den im Labor hergestellten Proben und den gespritzten Proben ist bislang praktisch nicht möglich.

Bei den Spritzbetonversuchen wurde immer eine deutliche Temperaturzunahme festgestellt, die die Festigkeitszunahme begünstigt. Im Labor wurde kein Temperaturanstieg beim Abbinden festgestellt, da das Volumen der kleinen Laborproben wesentlich geringer ist als das Volumen eines großen Spritzbetonkörpers.

Diese Unterschiede zeigen, dass es unerlässlich ist, verschiedene Rezepturen beim Spritzen mit der Betonspritzmaschine zu erproben, zu bewerten und zu vergleichen.

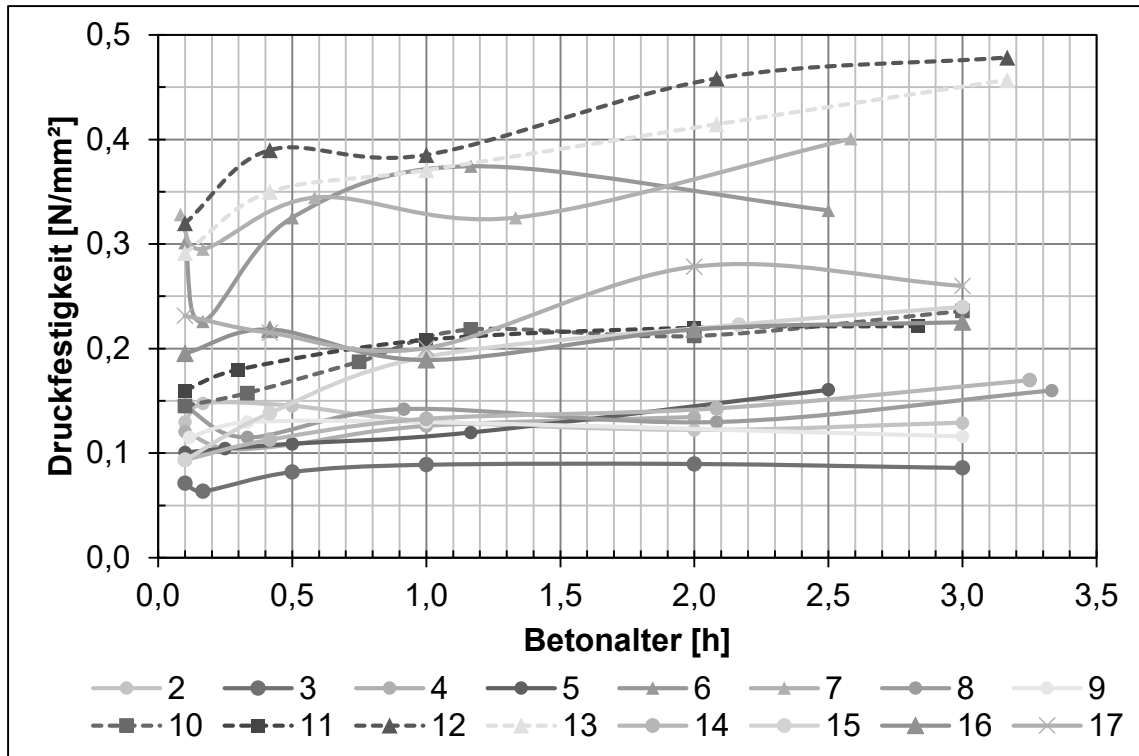


Abbildung 167: Frühfestigkeit in Abhängigkeit der Zeit an Laborproben, ermittelt mit dem Penetrometer (für die Zahlen in der Legende siehe Tabelle 77)

7.2 Zustand der Betonierabschnittsgrenzen (BAG)

An Bohrkernen aus in situ Versuchen

Die BAG sind an den Bohrkernen grundsätzlich an Farbunterschieden erkennbar. Bei den Kernen des GSBV1 waren die BAG nur vereinzelt zu erkennen. In Abbildung 168 bis Abbildung 170 sind Kernstücke des GSBV1 dargestellt. Es sind jeweils die Bereiche der BAG markiert. Die Färbung ist an BAG etwas dunkler als im umgebenden Beton.

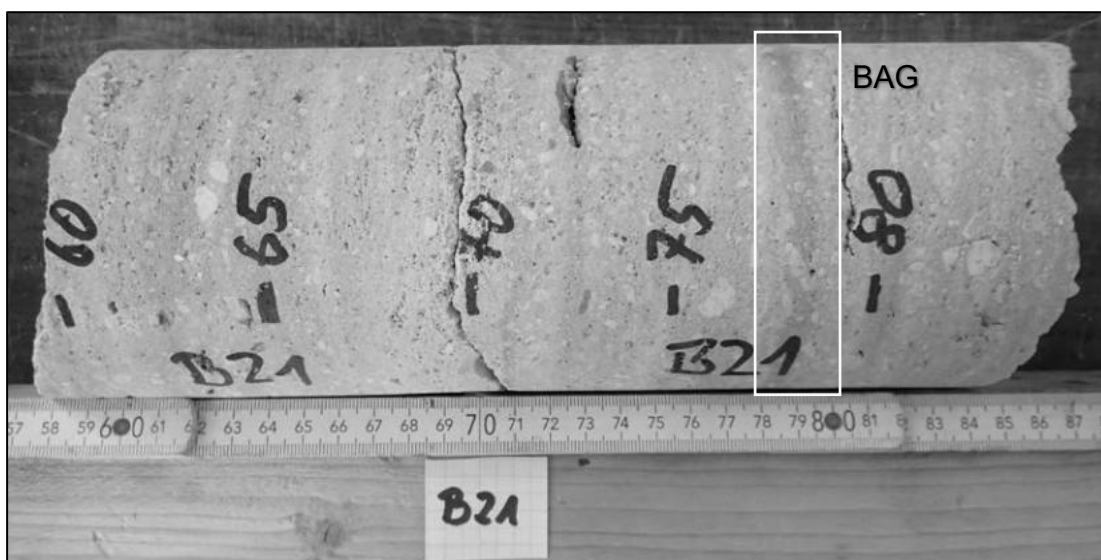


Abbildung 168: BAG an Bohrkern B21 des GSBV1

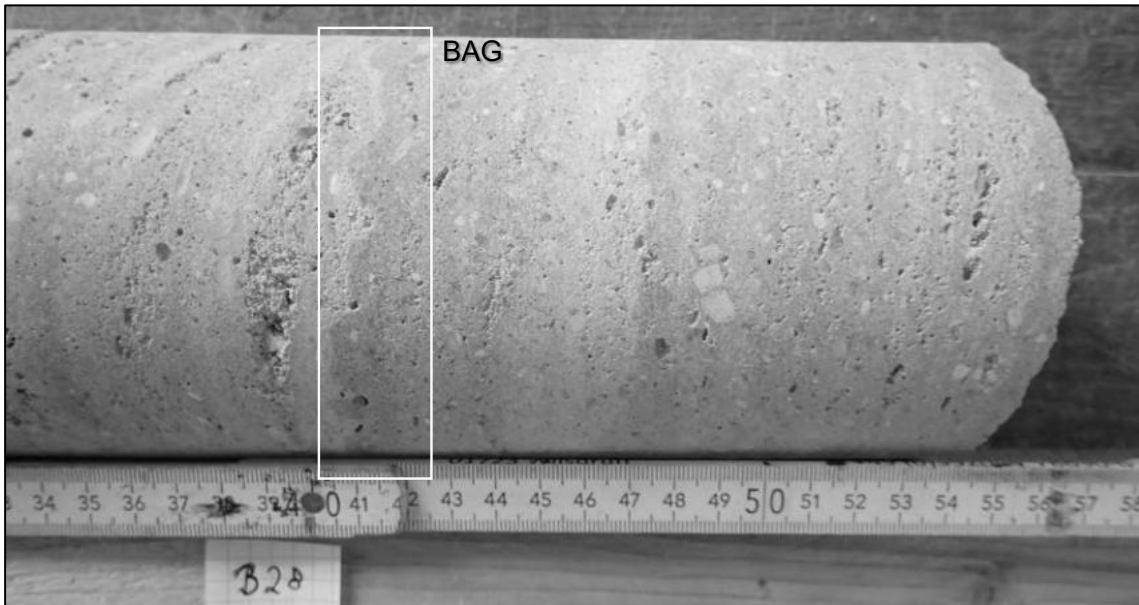


Abbildung 169: BAG an Bohrkern B28 des GSBV1

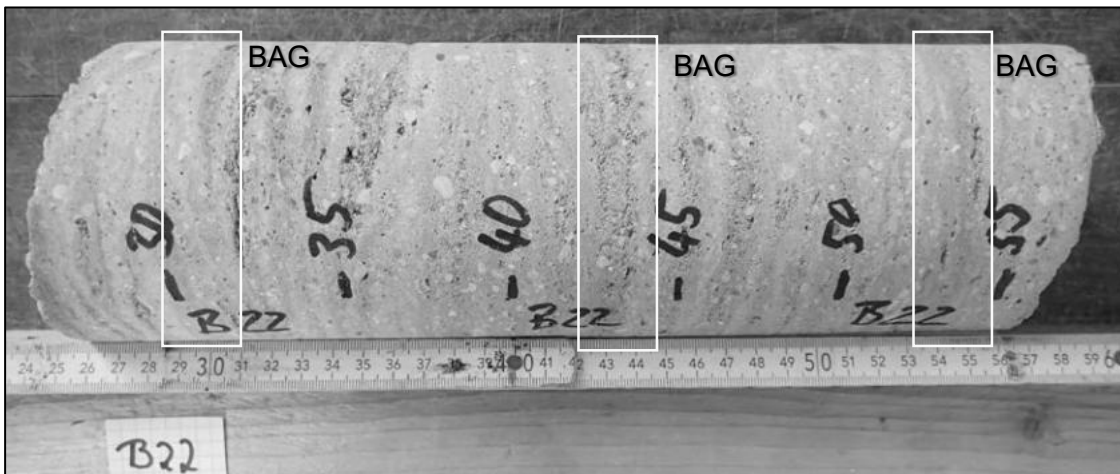


Abbildung 170: BAG an Bohrkern B22 des GSBV1

Beim GSBV2 gab es nur eine BAG. Diese war bei den Bohrkernen auch nur vereinzelt zu erkennen. Abbildung 171 zeigt den Bereich der BAG, die nur teilweise am Kern an der dunklen Farbe zu sehen ist.

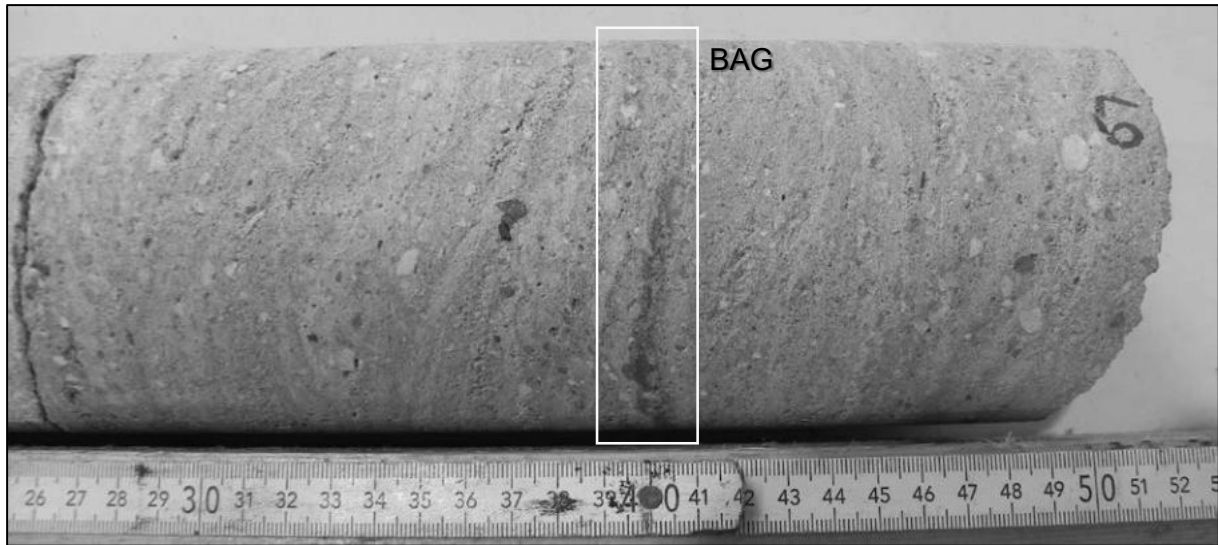


Abbildung 171: BAG an Bohrkern B9 des GSBV2

Bei den Bohrkernen des GSBV3 und GSBV4 waren die BAG besonders ausgeprägt. Hier sind praktisch alle BAG anhand der Farbunterschiede erkennbar. Die BAG ist ein bis zu 1 cm breiter Streifen mit einer dunkleren Färbung gegenüber dem umliegenden Beton (Abbildung 172 bis Abbildung 177).

Die dunkle Farbe ist möglicherweise auf das Vornässen des trockenen Betons der vorherigen Schicht zurückzuführen.

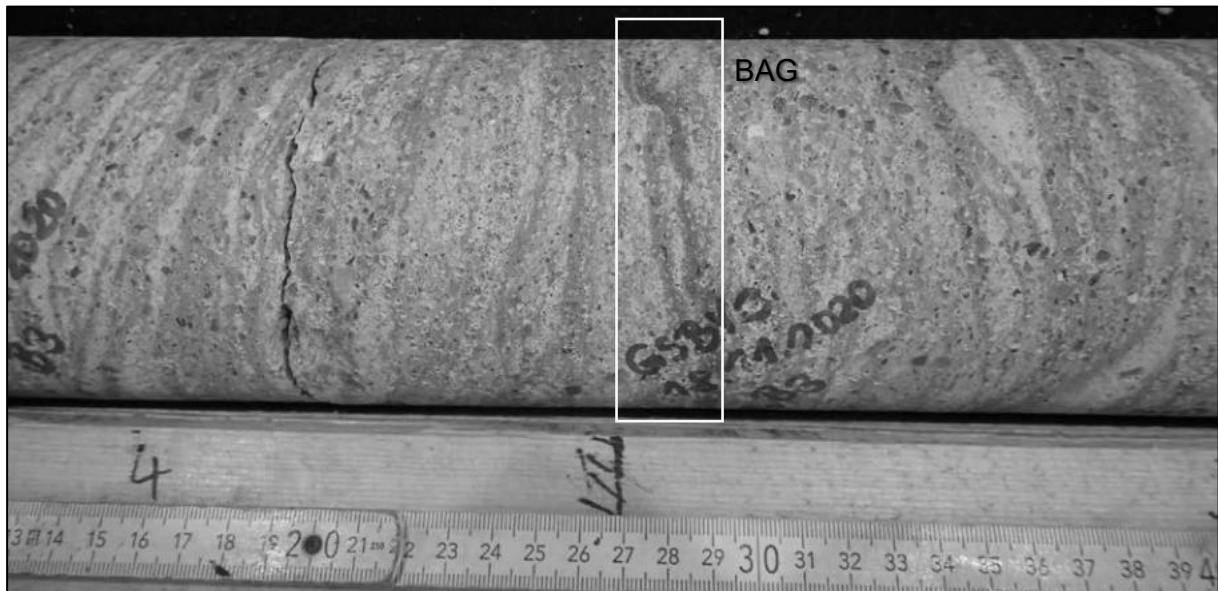


Abbildung 172: BAG an Bohrkern B3 des GSBV3

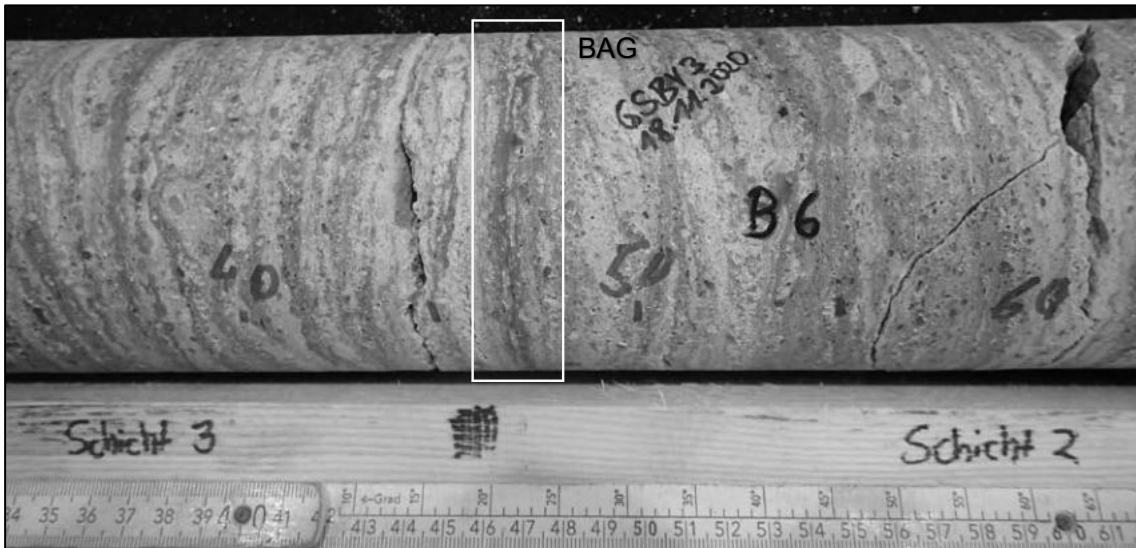


Abbildung 173: BAG an Bohrkern B6 des GSBV3

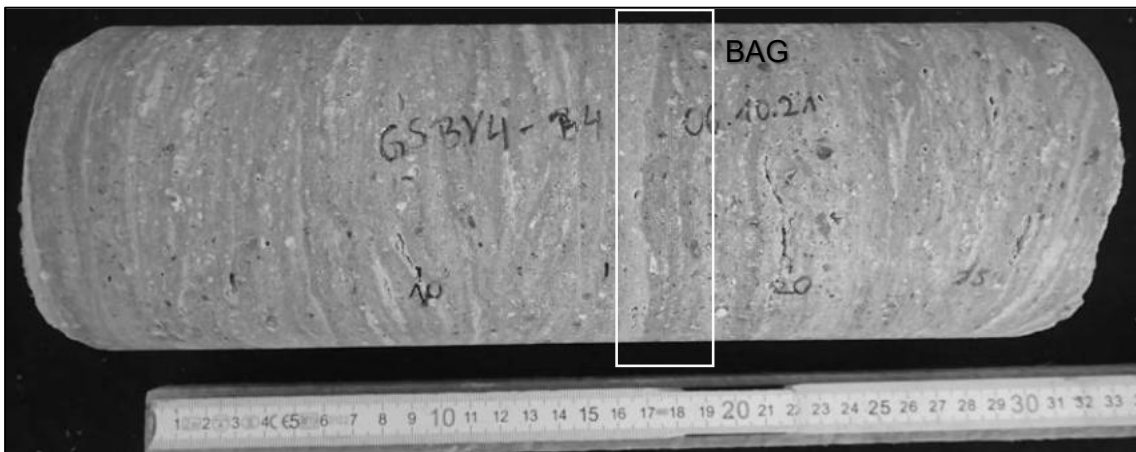


Abbildung 174: BAG an Bohrkern B4 des GSBV4

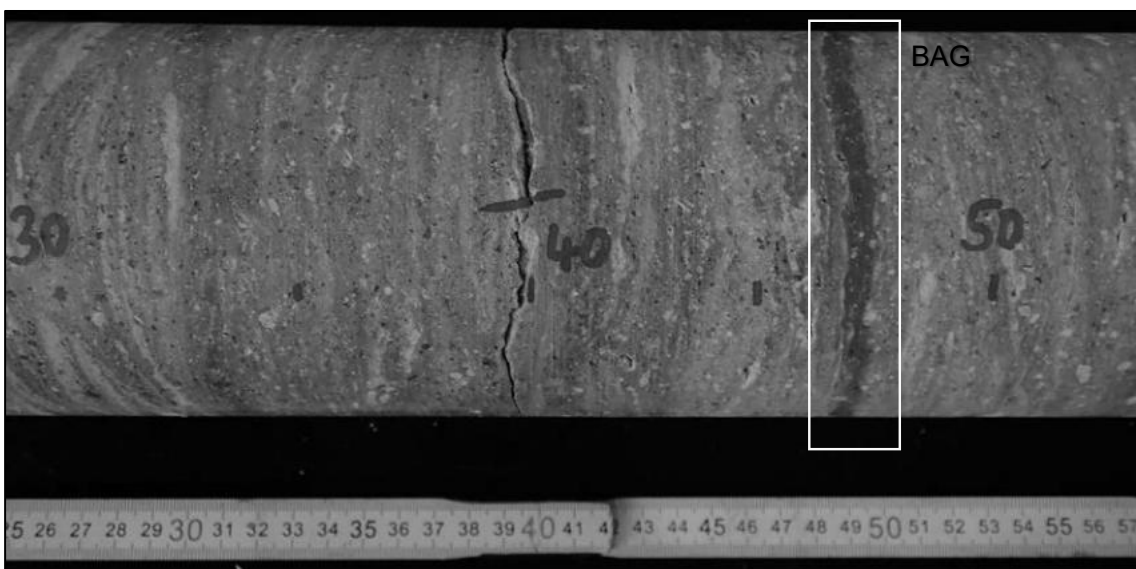


Abbildung 175: BAG an Bohrkern B13 des GSBV4

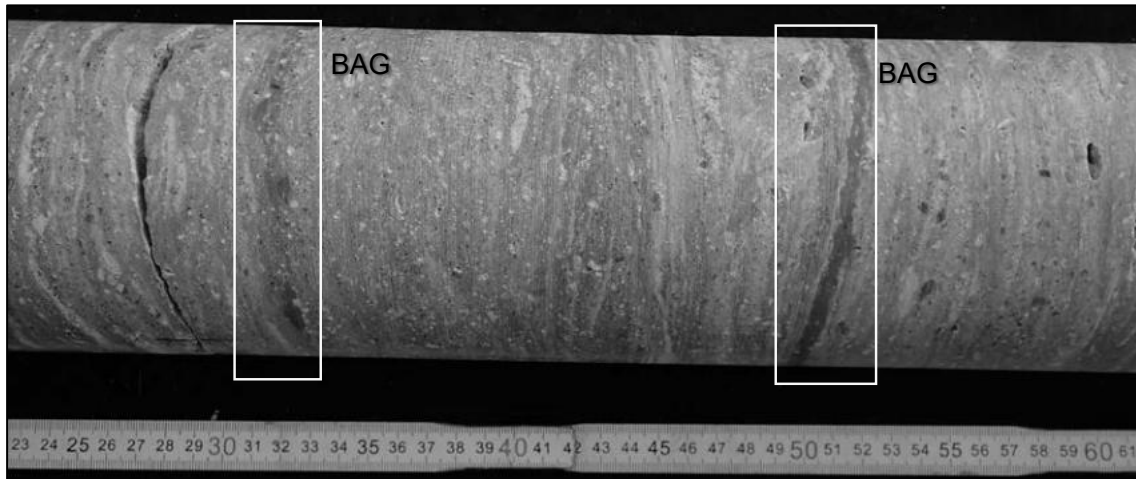


Abbildung 176: BAG an Bohrkern B15 des GSBV4

Bei allen Bohrkernen aller 4 in situ Versuche sind die Kerne beim Bohren und beim Herausbrechen der Kerne aus dem Spritzbetonkörper nicht an den BAG gebrochen. Der Verbund der einzelnen Spritzschichten ist sehr gut.

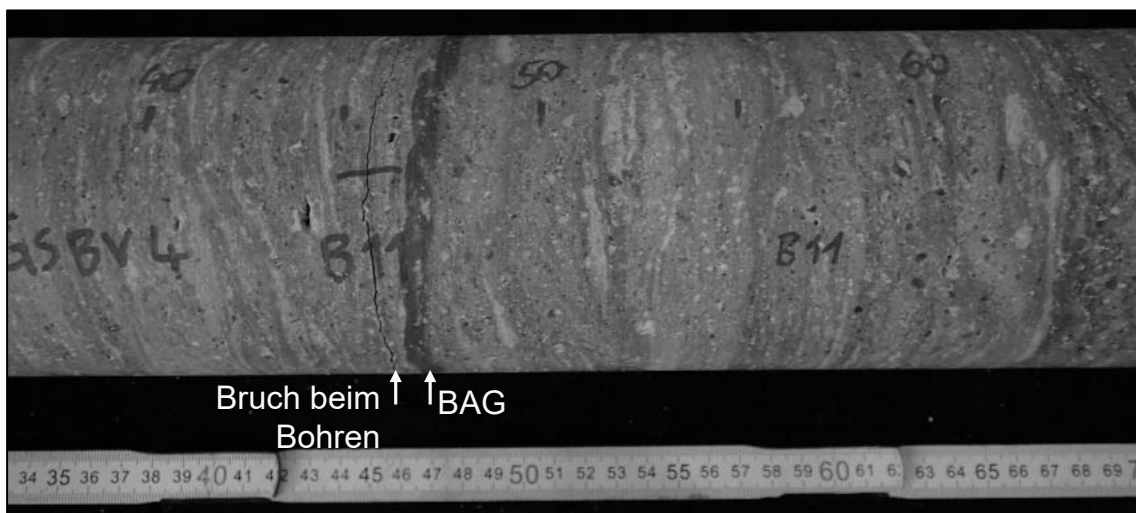


Abbildung 177: Bohrkern der B22 des GSBV4 mit BAG und Bruchstelle

Bei den in situ Messungen der Permeabilität mit Gas konnten nur beim GSBV4 erfolgreich Drucktests durchgeführt werden. Bei den vorherigen Versuchen ist das Gas stets entwichen und es konnte kein Druckimpuls aufgebaut werden. Ob das Gas über poröse Bereiche der BAG oder innerhalb einer Schicht abgeflossen ist, konnte nicht geprüft werden. Beim GSBV4 betrug die Gaspermeabilität zwischen $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ für Bereiche mit BAG und $2,2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ für den intakten Spritzbetonkörper.

7.3 Untersuchung zum Kontakt zwischen MgO-Beton und Steinsalz

7.3.1 Ziele und Untersuchungsmethodik

Bei einem Verschlussbauwerk bestimmen (unter Annahme eines dichten Dammkörpers) die Eigenschaften der Auflockerungs- (ALZ) und Kontaktzone maßgeblich die Permeabilität des Verschlussbauwerkes. Beim Nachweis der hydromechanischen Integrität wird eine mögliche fluiddruck-induzierte Verletzung des Minimalspannungskriteriums geprüft, wofür neben der wirkenden Normalspannung auf der Kontaktfuge auch die Kohäsion zwischen Baustoff und Gebirge relevant ist. Eine Verletzung des Minimalspannungskriteriums tritt erst dann ein, wenn der Fluiddruck (p_{fl}) größer als der Betrag aus Normalspannung auf die Kontaktfuge (σ_n) und der Zugfestigkeit zwischen Baustoff und Gebirge (σ_z) ist: $p_{fl} > \sigma_n + \sigma_z$. Zusätzlich muss beim Nachweis noch ein Sicherheitsbeiwert berücksichtigt werden.

Voraussetzung für die zur Bewertung dieses Kriteriums erforderliche Durchführung mechanisch/hydraulisch gekoppelter Modellrechnungen ist, dass die hydro-mechanischen Parameter des Kontaktbereichs Gebirge/Bauwerk unter in situ relevanten Belastungsbedingungen bekannt sind. Dabei sind insbesondere die zeitabhängigen Veränderungen der Eigenschaften der ALZ in der Anfangsphase von Bedeutung, wenn das Gebirge aufkriecht. Mit dem konvergenzbedingten Aufkriechen des Gebirges auf den steifen Dammkörper bildet sich die ALZ zurück und auch die Permeabilität der Kontaktfuge wird mit zunehmendem Kontaktdruck geringer.

Allerdings gibt es in der Literatur, allgemein zu Sorelbaustoffen sowie zu den hier zu untersuchenden Spritzbetonrezepturen, bisher nur wenige zuverlässige Kennwerte zu den hydro-mechanischen Eigenschaften der Kontaktfuge MgO-Baustoff / Steinsalz, sondern eher zu der Kontaktfläche MgO-Beton / Carnallit (u.a. aus dem Vorhaben CARLA [3]).

Ausgehend von der Tatsache, dass nur die mechanischen Eigenschaften zuverlässig im Laborversuch bestimmbar sind⁹, lag ein wesentlicher Schwerpunkt der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Baustoffuntersuchungen in der Quantifizierung der entsprechenden mechanischen Eigenschaften an der Kontaktfuge MgO-Baustoff /Steinsalz.

Dazu mussten zunächst geeignete Prüfkörper hergestellt werden. Hierfür wurden Steinsalzproben (repräsentatives, kompaktes Staßfurt-Steinsalz aus Erkundungsbohrungen in einem Salzstock Norddeutschlands) vorkonfektioniert. Die hergestellten Grundkörper bestanden aus halbierten Zylinderkernstücken (Höhe ca. 2 x 100 mm, mit jeweils einer planen Endfläche). Die mittels Spaltvorgang durch Meißel erzeugte Bruchfläche weist eine Rauigkeit und Morphologie (2 bis 3 cm Höhenunterschied) auf, wie sie für die in situ vorliegende Stoßoberfläche (z.B. beim schonenden Nachschnitt einer Steinsalzstrecke mittels Teilschnittmaschine) repräsentativ ist.

⁹ Die mechanischen Eigenschaften (u.a. Haft- bzw. Scherfestigkeit) der Kontaktfuge können mit qualifizierten Untersuchungsmethoden im Labor zuverlässig bestimmt werden (s. jeweils Anlage 1.7 und Anlage 1.8). Die Untersuchung der Durchlässigkeit der Kontaktfuge ist aufgrund der vorliegenden Strömungsanisotropie weitaus schwieriger. Während die hydraulischen Eigenschaften senkrecht zur Kontaktfläche (die aber generell weniger von Interesse sind) im Labor im axialen Durchströmungsversuch bestimmbar sind, sind Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Durchlässigkeit in Längsrichtung der Kontaktfläche (z.B. mittels einer radialen Strömungsgeometrie) aufgrund der Skalenabhängigkeit vermutlich weniger repräsentativ. Diese geben aber zumindest Hinweise für die Größenordnung. In der Konsequenz sind integrale Messungen der Bauwerkpermeabilität als in situ-Untersuchungen unerlässlich.

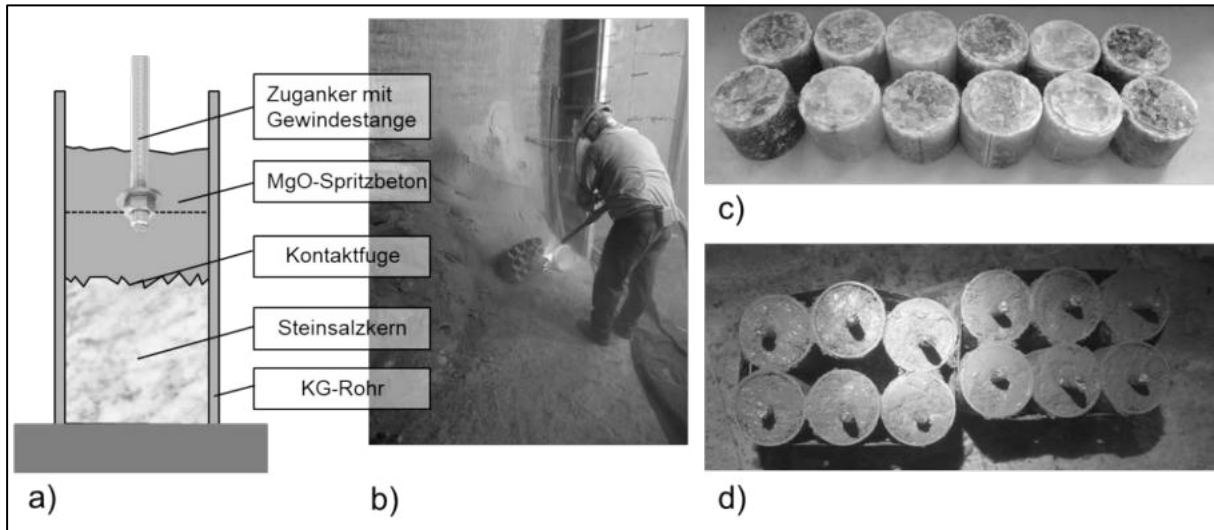


Abbildung 178: Herstellung von Prüfkörpern zur Untersuchung der Kontaktflächeneigenschaften MgO-Spritzbeton auf Steinsalz. a) Schematische Probenanordnung; b) Spritzen der Kontaktflächenproben vor Ort im Großversuch GSBV4 (Grube Teutschenthal, 28.09.2021); c) vorbereitete Steinsalzprüfkörper; d) vorbereitete Prüfkörper untertage zum Abbinden gelagert

Die Probe wurde wie folgt hergestellt: Ein Steinsalzkern wurde erbohrt und in ein mindestens doppelt so hohes KG-Rohr ($\varnothing \approx \text{ca. } 100 \text{ mm}$, $l \approx 300 \text{ mm}$) gestellt. Mehrere Rohre wurden als „Batterie“ zusammengefasst. Auf diese Rohre wurde dann Spritzbeton aufgespritzt (Abbildung 178, „Technikumsversuch“ unter Tage). Die obere Rohrhälfte wurde etwa zur Hälfte eingespritzt und im verbleibenden Rohrviertel noch manuell ein Zuganker einbetoniert (über Einstampfen von Spritzbeton-Baustoff)¹⁰.

Dann wurde eine Druckplatte an das Steinsalzende aufgeklebt und somit eine geeignete Zugversuchsprobe (hälftig Steinsalz sowie MgO-Spritzbeton = Sandwichprüfkörper) erhalten.

7.3.2 Haftzugfestigkeit Kontakt Steinsalz / Spritzbeton

Entsprechend Kap. 6.4 wurden verschiedene Rezepturen im Labor und im Technikum getestet, auf deren Ergebnisse dann als großtechnische Erprobung vier Großspritzbetonversuche (GSBV) in situ in der Grube Teutschenthal ausgeführt wurden (Abschnitt 6.5).

Während der Großspritzbetonversuche GSBV1, GSBV3 und GSSBV4 wurden gleichzeitig an abgestimmten Spritzversuchstagen die Proben für Haftzuguntersuchungen an nachfolgend angegebenem Datum hergestellt.

- GSBV1: 09.06.2020
- GSBV3: 17.11.2020
- GSBV4: 28.09.2021

Die Proben aus dem GSBV3 und 4 wurden auch für Scherversuche genutzt.

Die Steinsalz-/MgO-Betonproben wurden standardmäßig gemäß der in Anlage 1.7 beschriebenen Methodik geprüft.

¹⁰ In der Praxis zeigte sich, dass die in Abbildung 178 schematisch dargestellte Kontaktfuge zwischen dem eingespritzten Baustoff und dem darüber eingebrachten / händisch verdichtetem Material eine Schwächezone darstellte.

7.3.2.1 Ergebnisse

Ergebnisse GSBV1: Steinsalz/Spritzbeton

Für den ersten Großspritzbetonversuch (GSBV1) wurde die GV2-Rezeptur, angepasst an die aktuell verfügbaren Bestandteile (MgO, Lösung), „quasi“ wiederholt (für Details s. Abschnitt 6.5.2).

Ausgehend von der Probenherstellung untertage standen 12 vorbereitete Proben zur Verfügung, die mit einem Prüfalter von 18 Tagen nacheinander geprüft wurden (s. hierzu Abbildung 179).

Dabei versagten jeweils

- 8 Proben an der Kontaktfläche bzw. im unmittelbar angrenzenden Steinsalzbereich
- 4 Proben im Steinsalz bzw. dem Kontaktbereich zum Stahlstempel

Da bei den letzten vier Proben die Kontaktfläche jeweils noch intakt war, wurden die Proben im Steinsalz nochmals gekürzt und eben abgeschliffen. Die Stempel wurden aufgeklebt und die Proben erneut im Haftzugversuch belastet. Dabei versagten die Proben nahezu alle am Kontakt Steinsalz/Spritzbeton bzw. im unmittelbar angrenzenden Bereich (mit Ausnahme der Probe 717-HZV4_2, die erneut im Steinsalz mit $\sigma_T \approx 0,58$ MPa versagte).

Repräsentativ für die „ideale Bruchfläche“ ist das Versagensbild der Probe 717/HZF3 (Abbildung 180), die einen Mischbruch mit Versagen am direkten Kontakt (Haftung des Baustoffs am Steinsalz) sowie im angrenzenden Steinsalz zeigt.

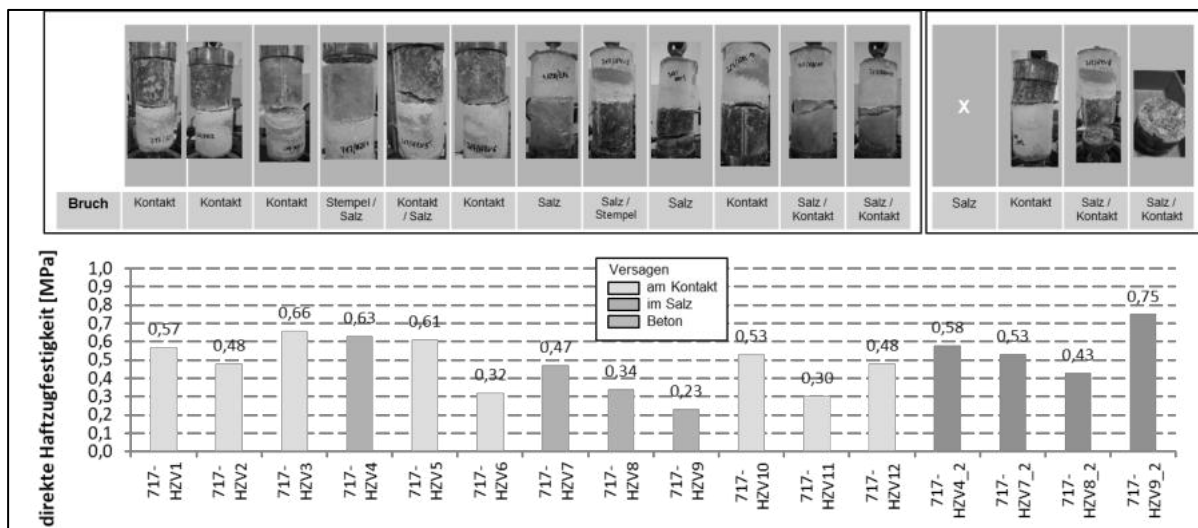


Abbildung 179: Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV1 / Steinsalz (Laborserie 717): Haftzugfestigkeit nach 18 bzw. 28 d (braune Balken) (x: kein Probenbild vorhanden)

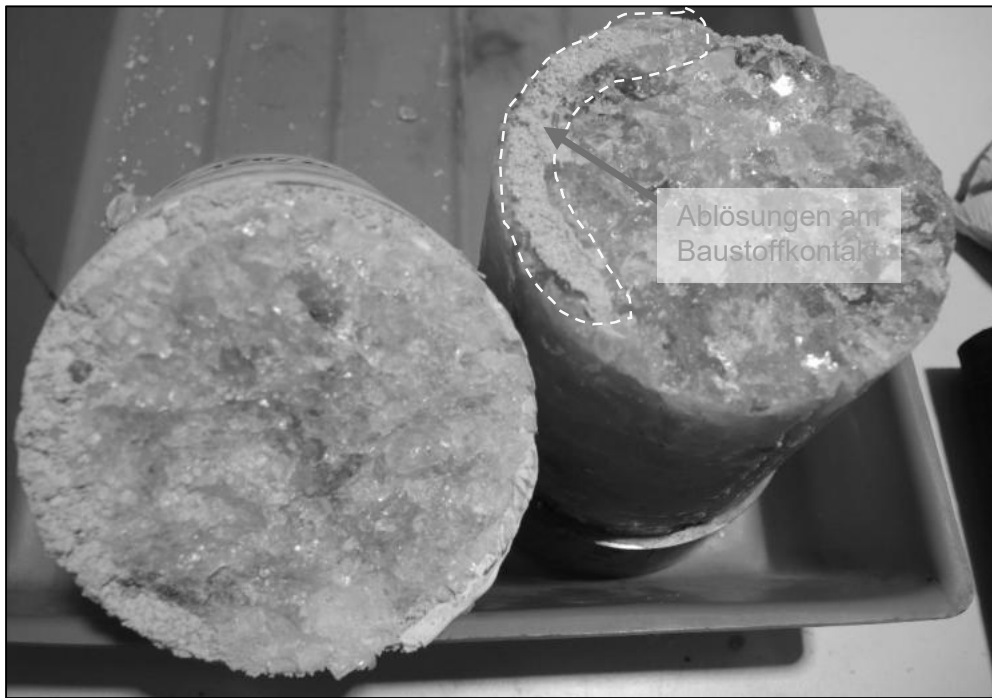


Abbildung 180: Morphologie der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV1 / Steinsalz nach Zugversuch (Versagen an der Kontaktfläche) (Labornummer 717/HZF3)

Die Haftzugfestigkeit wird statistisch durch der Mittelwert und die Standardabweichung, die Quartile (0,25 bzw. 0,75) und den Median¹¹ beschrieben. Diese Parameter sind in Tabelle 78 zusammengefasst bzw. in Abbildung 183 grafisch dargestellt. Die mittlere Haftzugfestigkeit (Median) beträgt für die Hauptmessreihe nach 18 Tagen $\sigma_T = 0,48$ MPa bzw. für die Wiederholungsversuche nach 28 Tagen $\sigma_T = 0,56$ MPa. Der Median entspricht fast genau dem Mittelwert¹².

Tabelle 78: Quartile (25 % bzw. 75 %), Median, Mittelwert, Minimum und Maximum der erhaltenen Messergebnisse der Haftzugfestigkeit zwischen der jeweiligen Spritzbetonrezeptur und Steinsalz bei den verschiedenen Großspritzbetonversuchen (GSBV)

	GSBV1		GSBV3	GSBV4
Aushärtungs-dauer	18d	28d	>28d	>28d
Anzahl	12	4	12	6
min	0,23	0,43	0,09	0,15
25 % Quartil	0,34	0,51	0,16	0,19
50 % Quartil	0,48	0,56	0,22	0,25
75 % Quartil	0,58	0,62	0,36	0,34
max	0,66	0,75	0,53	0,41
Mittelwert	0,47±0,14	0,57±0,13	0,26±0,14	0,27±0,11

¹¹ Der Vorteil des Medianwerts liegt insbesondere bei einer geringen Probenzahl darin, dass er gegenüber Ausreißern in seiner Aussage robuster ist.

¹² Bei der Bewertung der Ergebnisse ist generell zu berücksichtigen, dass die Kontaktfestigkeit der Proben zwischen Baustoff und Bruchfläche unterschiedlich vorgeschädigt sein kann, weshalb eine gewisse Streuung der Versuchsergebnisse möglich ist. Insofern ist der Unterschied bzw. die beobachtete Zunahme der Festigkeit von 18d zu 28d vermutlich nicht signifikant.

Ergebnisse GSBV3: Steinsalz/Spritzbeton

Für den dritten Großspritzbetonversuch (GSBV3) wurde erstmals ausschließlich Salzzuschlag im großtechnischen Einsatz verwendet, dessen prinzipielle Eignung in mehreren Spritzbetonversuchen im Technikumsmaßstab belegt wurde. Hierbei war die Haftung bzw. Klebrigkeit des frisch gespritzten Betons sehr gut, sodass für den GSBV3 hohe Spritzschichtmächtigkeiten bis annähernd 30 cm realisiert werden konnten (Abschnitt 6.5.4).

Ausgehend von der Probenherstellung untertage (Spritzen der (letzten) Schicht 4 mit 27,8 cm Mächtigkeit) standen 12 vorbereitete Proben zur Verfügung, die mit einem Prüfalter von >28 Tagen nacheinander geprüft wurden (s. hierzu Abbildung 181)

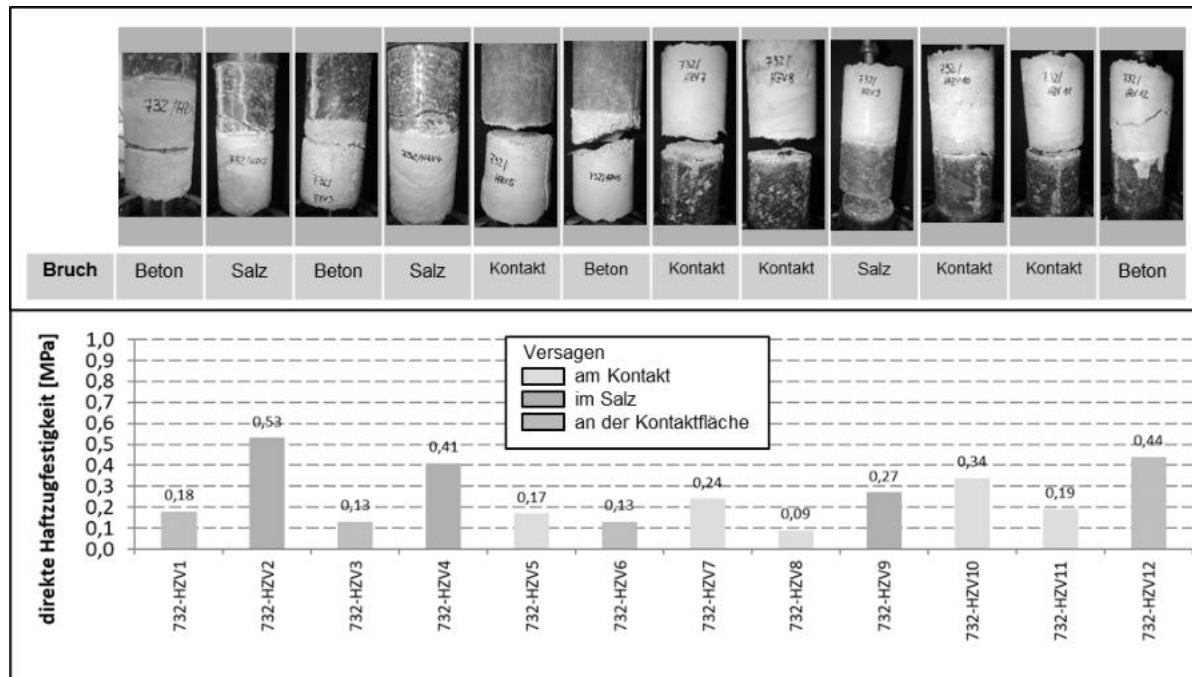


Abbildung 181: Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV3 / Steinsalz; oben: Bruchbilder der „Sandwichprüfkörper“ (12 Proben, Probenalter > 28d)

Überraschenderweise ergaben sich deutliche Unterschiede in der Haftzugfestigkeit der Proben vom GSBV3 zu den Proben aus GSBV1 (Rezeptur analog GV2 mit Silikatzuschlag), weil einige der Proben nicht am Kontakt oder im Salz, sondern im Beton versagten:

- 5 Proben an der Kontaktfläche bzw. im unmittelbar angrenzenden Steinsalzbereich
- 3 Proben im Steinsalz bzw. dem Kontaktbereich zum Stahlstempel
- 4 Proben im Beton

Insgesamt war die mittlere Haftzugfestigkeit von ca. 0,22 MPa (25 % Quartil: 0,16 MPa; 75 % Quartil: 0,36 MPa) vergleichsweise niedrig für die Kontaktfläche Baustoff / Steinsalz. Sie betrug somit nur ca. 40 % der Haftzugfestigkeit, die mit der GV2-Rezeptur im GSBV1-Spritzversuch ermittelt wurde (vgl. Abbildung 183 bzw. Tabelle 78).

Auffällig ist, dass die in den jeweiligen Probenbildern dargestellten Versagensflächen im Beton nicht immer ideal senkrecht zur Zugrichtung liegen, sondern im Bereich der Zugplatte teilweise auch schräg dazu sein können. Dies ist vermutlich auf eine geringere Anbindung im Bereich der Zuganker zurückzuführen, vermutlich aufgrund der händischen Nachbetonage des Ankers, die nicht immer gleichmäßig war. Eventuell waren auch einzelne Anker nicht parallel zur Achse des Prüfkörpers eingebaut, sodass sich Biegemomente in der Probe einstellten. Gleichzeitig weisen die Ergebnisse der Haftzugversuche an den kompakten Proben eine

relativ hohe Matrixfestigkeit von im Mittel ca. 2,58 MPa (25 % Quartil: 1,58 MPa; 75 % Quartil: 2,87 MPa) auf (vgl. Kap. 6.5.4.5).

Ergebnisse GSBV4: Steinsalz/Spritzbeton

Für den vierten Großspritzbetonversuch (GSBV4) wurde, wie beim GSBV3, ausschließlich Salzzuschlag verwendet. Im Gegensatz zum GSBV3 wurde eine Schichtmächtigkeit von ca. 16 cm bei allen Schichten gespritzt, um eine geringere maximale Abbinde­temperatur zu erreichen. Sechs Schichten wurden realisiert (vgl. Abschnitt 6.5.5).

Die Proben wurden untertage hergestellt (Spritzen der Schicht 2 mit 15,5 cm Mächtigkeit). 6 der 12 Proben wurden für Haftzugversuche vorbereitet. Deren Ergebnisse (Probenalter > 28 d) sind in Abbildung 182 zusammengestellt.

Als wesentlicher Unterschied zur entsprechenden Probenserie aus GSBV3 (s.o.) zeigte sich, dass die Proben nicht im Beton abgerissen sind, sondern entweder im Steinsalz (nahe der Kontaktfläche) oder direkt an der Kontaktfläche versagen.

Allerdings ist auch hier die Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Baustoff / Steinsalz mit im Mittel ca. 0,25 MPa (25 % Quartil: 0,19 MPa; 75 % Quartil: 0,34 MPa) vergleichsweise niedrig. Die Haftzugfestigkeit der Proben aus dem GSBV4 lag in der gleichen Größenordnung wie die Haftzugfestigkeit der Proben aus dem GSBV3 (vgl. Abbildung 183 bzw. Tabelle 78).

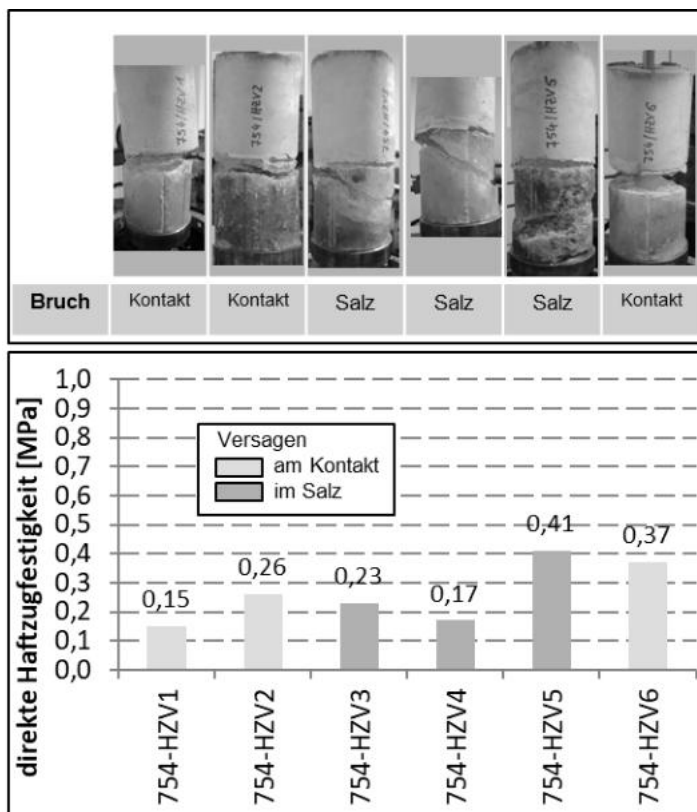


Abbildung 182: Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV4 / Steinsalz; oben: Bruchbilder der „Sandwichprüfkörper“ (6 Proben, Probenalter > 28 d)

7.3.2.2 Fazit

Insgesamt wurden 34 Haftzugversuche an unter realistischen Bedingungen hergestellten Proben (Spritzbeton auf Steinsalz mittels Aufspritzen im GSBV) aus unterschiedlichen Spritzbeton-Rezepturen durchgeführt (siehe Tabelle 79).

Tabelle 79: Vergleich der Haftzugfestigkeit aus den GSBV

Probenherkunft	Spritzbeton-Modifikation	Prüfzeit (d)	Haftzugfestigkeit (MPa)		
			0,25	Median	0,75
GSBV1	ursprüngliche GV2-Rezeptur (mit Silikatzuschlag)	18	0,34	0,48	0,58
		28	0,51	0,56	0,62
GSBV3	modifizierte Spritzbeton-Rezeptur (mit Salzzuschlag)	>28	0,16	0,22	0,36
GSBV4		>28	0,19	0,25	0,34

Für den direkten Vergleich sind die Daten aller Versuche als Box-Plot-Diagramm in Abbildung 183 grafisch dargestellt.

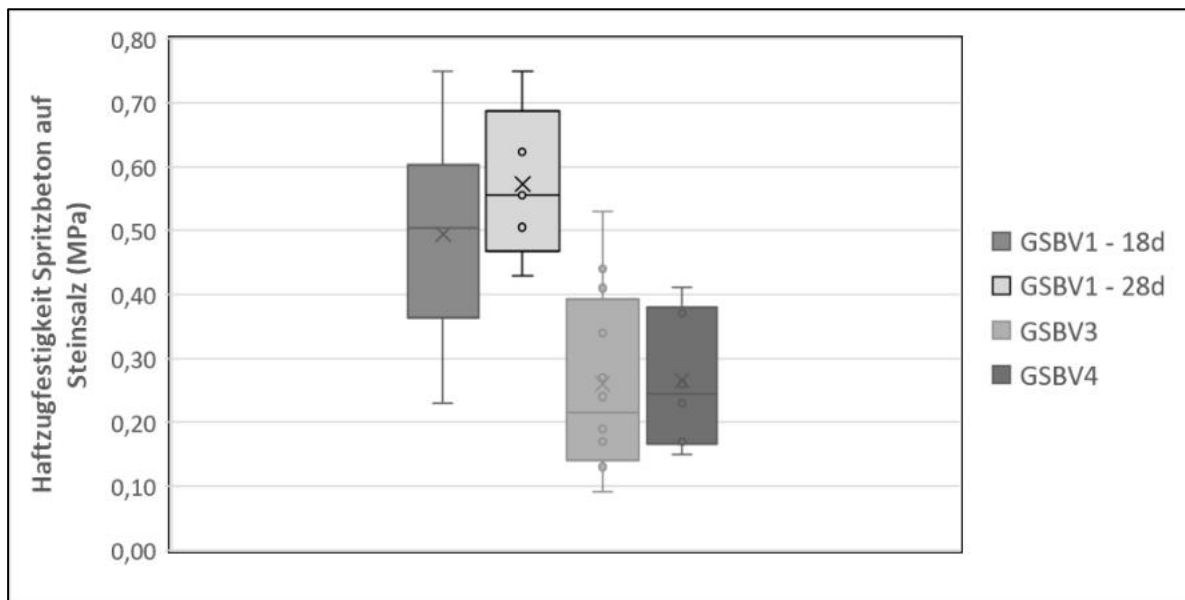


Abbildung 183: Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton zu Steinsalz in Box-Plot-Darstellung in den GSBV (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75 sowie als Strich der Median (0,5) und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x)

Als Referenz zur Einordnung der Ergebnisse können Daten von Steinsalz herangezogen werden:

- (1) Die Haftzugfestigkeit von kompaktem Steinsalz (hier Asse-Steinsalz) beträgt nach [33]:
 $\sigma_T = 2,4 \text{ MPa} \pm 10\%$ ¹³
- (2) Die Haftzugfestigkeit von aufgelockertem Steinsalz ist deutlich abgemindert, wobei sich nach den Erfahrungen des IfG eine deutliche Spannweite ergibt:
 $\sigma_T = \text{als Mittel } 0,5 - 1 \text{ MPa, sowie bis max. } 2 \text{ MPa}$

¹³ Hinweis: diese Werte sind nach den Erfahrungen des IfG nur repräsentativ für ein intaktes, gleichförmiges Steinsalz. Verunreinigungen innerhalb von Steinsalz (z.B. Anhydrit- oder Ton-Einschlüsse) können diese Festigkeit abmindern, weshalb mutmaßlich der unter (2) genannte Streubereich als Referenzwerte herangezogen werden sollte.

Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Die Streuung der Haftzugfestigkeit für den Kontakt Baustoff / Steinsalz ist generell moderat. Die Kennwerte aus den zwei Großspritzbetonversuchen GSBV3 und 4 unterscheiden sich nicht wesentlich. Dies dokumentiert eine gute Reproduzierbarkeit der Eigenschaften.
- Die Rezeptur mit Salzzuschlag weist eine gute Haftfestigkeit zum Steinsalz auf, die in der Größenordnung der Zugfestigkeit von aufgelockerten Salzproben liegt. Aufgrund der Probenherstellung (mechanisches Spalten) sind die jeweils angrenzenden Salzpartien vorgeschädigt bzw. aufgelockert, was auch durch Abrisse in der Steinsalzmatrix dokumentiert wird.
- Die Haftzugfestigkeit für die D4-Rezeptur (GSBV1) nimmt mit der Zeit zu. Die Beobachtung sollte durch weitere Untersuchungen mit gleichförmigeren Probekörpern (z.B. durch Verwendung von sehr gleichförmigen Steinsalz-Kernproben) abgesichert werden.
- Die Spritzbetonrezeptur mit Salzzuschlag weist eine geringere Haftzugfestigkeit auf, die nur ca. 40 % der Festigkeit der GV2-Rezeptur beträgt.
Beim Zugversuch trat teilweise Versagen innerhalb des Spritzbetons auf, was auf eine etwas geringere Festigkeit des Baustoffs hindeutet.

Die Ursachen für das schlechtere Anbindeverhalten der neuen Spritzbeton-Rezeptur mit reinem Salzzuschlag an Steinsalz sind nicht bekannt. Möglich ist, dass mit der Zugabe des Salzzuschlags eine Sättigung an NaCl erzielt wird, so dass keine weitere Anlösung des Gebirges stattfindet, die ansonsten nach dem Abbinden wegen der größeren Kontaktoberfläche zu einer Verbesserung der Kohäsion führen würde.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Probekörper zwar längere Zeit (mindestens eine Woche) unter den Klimabedingungen vor Ort gelagert wurden, dass die Proben aber nicht die gleiche Temperaturentwicklung wie das größere Bauwerk erfahren haben. Insofern kann sich das Abbindeverhalten unterscheiden, wobei vor dem Hintergrund der lithologischen Streuung des Salzprobekörpers dieser Effekt nicht einfach quantifizierbar ist.

7.3.3 Scherfestigkeit Kontakt Steinsalz / Spritzbeton

Die Festigkeit einer Kontaktfläche zwischen Baustoff und Gebirge (ausgedrückt durch die in der Kontaktflächenebene wirkenden resultierenden Schubspannung τ_{res}) ist von der senkrecht zur Kontaktfläche gerichteten Normalspannung σ_n abhängig (Mohr-Coulombsches Bruchkriterium).

$$\tau_{\text{res}} = c + \sigma_n \cdot \tan\varphi$$

Um die Scherparameter zu bestimmen, wurde das MTS-Großschergerät des IfG eingesetzt, vgl. Anlage 1.8.

Beispielhaft für eine experimentelle Bestimmung dieser Parameter sind in Abbildung 184 die Ergebnisse eines 2-Stufenscherversuchs dargestellt, bei dem die Probe in der Kontaktfläche zwischen Baustoff und Steinsalz in zwei Belastungsstufen, jeweils mit unterschiedlicher Normalspannung, abgesichert wurde.

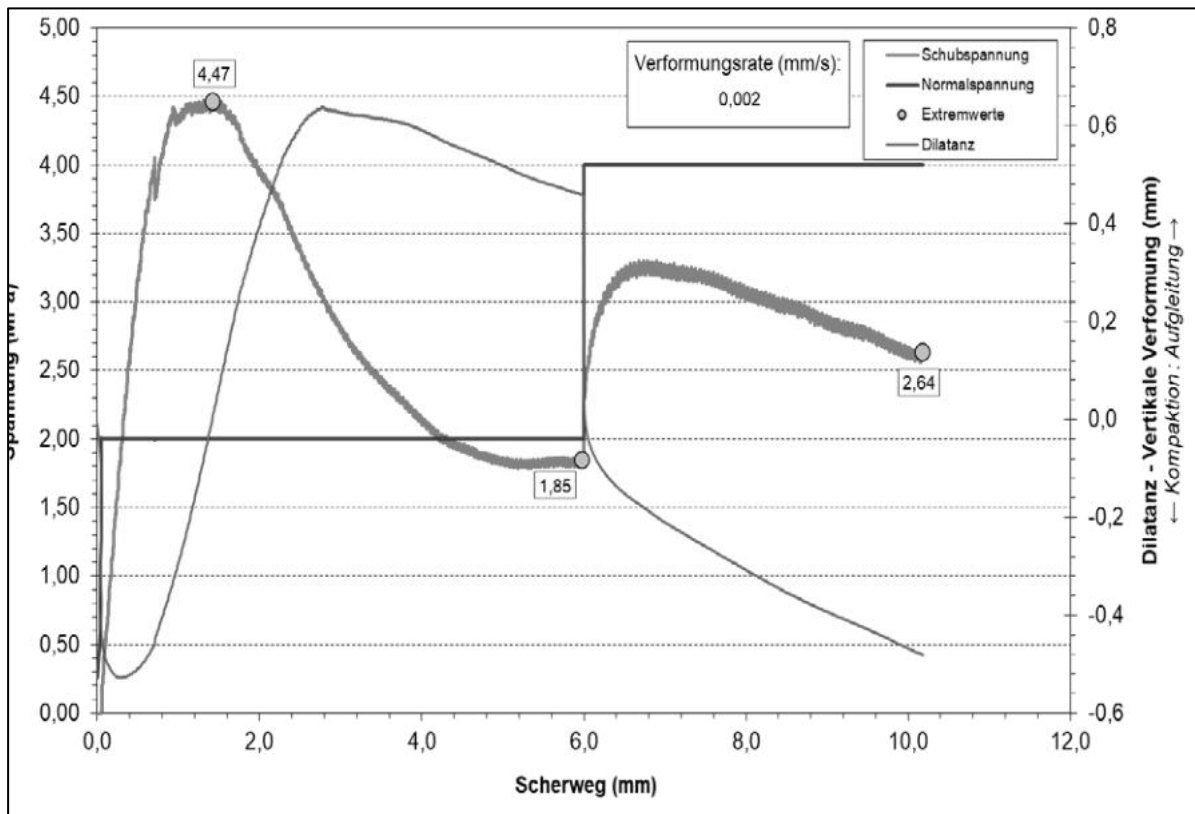


Abbildung 184: Zweistufenversuch zur Bestimmung der Scherfestigkeit einer MgO-Spritzbeton/Steinsalz-Kontaktfläche - Exp. 754/SV2

In der initialen Belastungsstufe ($\sigma_n = 2 \text{ MPa}$) steigt mit fortschreitender Verformung der Schwerwiderstand zunächst an. Wird die Festigkeitsgrenze erreicht, kommt es zu einem (z.B. sprödebruchartigen oder allmählichen) Versagen. Nach einem Festigkeitsmaximum mit dem vollständigen Durchschneiden der Probe ergibt sich ein Übergang ins Restfestigkeitsniveau. Nach dem erfolgten Durchschneiden der Probe wurde die Normalspannung erhöht ($\sigma_n = 4 \text{ MPa}$) und ein weiterer Restscherfestigkeitskennwert bestimmt.

Als Ergebnis werden die für eine Normalspannung definierte Peak- und die Restfestigkeit (sowie die Dilatanzentwicklung mit fortschreitender Verformung) bestimmt. Die entsprechenden Kennwerte der 6 Festigkeitsversuche sind in Tabelle 80 zusammengefasst bzw. in Abbildung 185 als Mohr-Coulomb-Diagramm dargestellt.

Über eine Regressionsanalyse wurden aus den Einzelwerten der Scherversuche die Mohr-Coulomb-Festigkeitsparameter der Trennfläche zwischen Steinsalz und MgO-Spritzbeton bestimmt:

Peakfestigkeit:	$\varphi_{\text{Trennfläche}}$	= 50°	$c_{\text{Trennfläche}}$	= 1,45 MPa
Restfestigkeit:	$\varphi_{\text{Trennfläche}}$	= 35°	$c_{\text{Trennfläche}}$	= 0 MPa

Als Vergleichsbeispiel können Parameter herangezogen, die im Vorhaben CARLA für den Kontakt MgO-Spritzbeton (GV2-Rezeptur) / Carnallit bestimmt wurden [3]:

Peakfestigkeit:	$\varphi_{\text{Trennfläche}}$	= 50°	$c_{\text{Trennfläche}}$	= 1,56 MPa
-----------------	--------------------------------	--------------	--------------------------	------------

Tabelle 80: Normal- und Schubspannung aus den direkten Scherversuchen an der Kontaktfläche Spritzbeton (GSBV4 / Steinsalz (1 Peak- und 2-Restscherfestigkeitswerte))

Versuch	Stufe	Scherparameter	
		σ_n	τ
		MPa	MPa
754-SV1	1 - Peak	0,50	1,92
	1 - Rest	0,50	1,02
	2 - Rest	1,25	1,13
754-SV2	1 - Peak	2,00	4,47
	1 - Rest	2,00	1,85
	2 - Rest	4,00	2,64
754-SV3	1 - Peak	5,00	7,73
	1 - Rest	5,00	3,66
	2 - Rest	7,00	4,23
754-SV4	1 - Peak	1,00	2,38
	1 - Rest	1,00	1,12
	2 - Rest	3,00	1,99
754-SV5	1 - Peak	0,25	1,93
	1 - Rest	0,25	0,36
	2 - Rest	1,75	1,42
754-SV6	1 - Peak	3,50	5,24
	1 - Rest	3,50	2,92
	2 - Rest	4,50	3,54

Die Kennwerte für beide (unterschiedlichen) MgO-Spritzbetonrezepturen (aus GV2 bzw. GSBV4) im Kontakt zu Steinsalz bzw. Carnallit sind bzgl. Kohäsion und Reibungswinkel praktisch identisch. Ursächlich dafür sind vermutlich die Salzgesteinseigenschaften, die die Festigkeit der Kontaktfuge dominieren, wobei im Detail das Scherverhalten beider MgO-Spritzbetonrezepturen phänomenologisch unterschiedlich war.

Bei den aktuellen Spritzbeton / Steinsalz-Schertests lag die Versagensfläche direkt an der Kontaktfläche zum Baustoff (wie durch das Inset in Abbildung 185 beispielhaft dokumentiert ist) während in den Scherversuchen am Carnallit (Vorhaben CARLA [3]) die Versagensfläche zumeist im Carnallit lag.

Dafür ursächlich ist mutmaßlich die Tatsache, dass die Matrixfestigkeiten der modifizierten Spritzbeton-Rezeptur (Salzzuschlag) etwas niedriger sind, aber insgesamt dominieren die Salzgesteinseigenschaften. Unabhängig ist die Kohäsion von ca. 1,45 MPa ein hoher Wert.

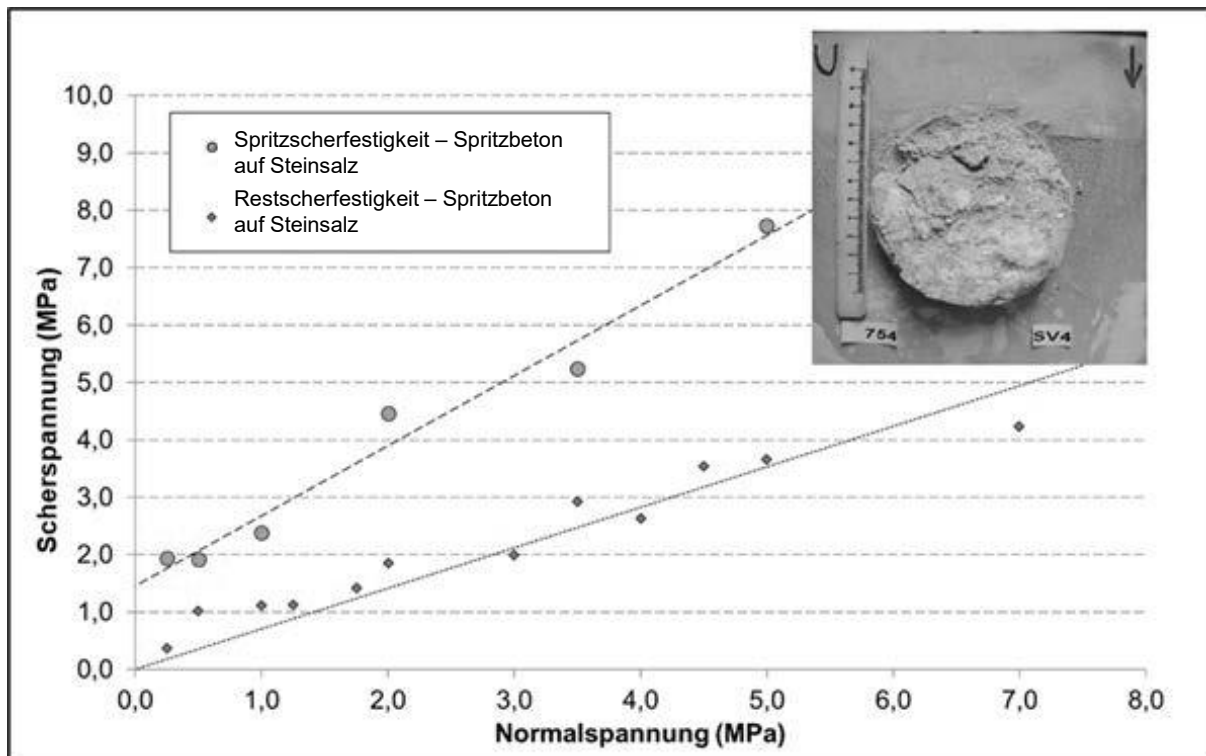


Abbildung 185: Mohr-Coulomb-Diagramm zur Scherfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV4 / Steinsalz (6 Proben, Probenalter > 28d); (Das Inset zeigt die Kontaktfläche der Probe 754-SV4 nach dem Scherversuch)

7.4 Untersuchungen zu Baustoffveränderungen – Phasenbestand und Einfluss von CO₂

Nach Abschluss der Großspritzbetonversuche (GSBV) wurden aus den Spritzkörpern Bohrkern für Nachuntersuchungen gewonnen.

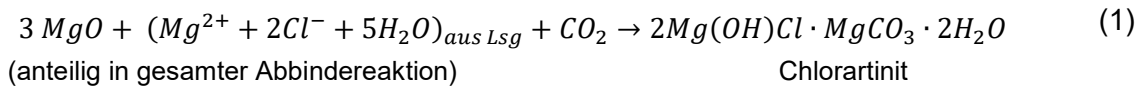
Der Phasenbestand wurde an ausgewählten Kernproben des GSBV1 und GSBV3 durch röntgenographische Messungen bestimmt. Die Ergebnisse dazu werden nachfolgend beschrieben.

Veränderungen des MgO-Spritzbetons (Phasenbestand und Gaspermeabilität) aufgrund der Einwirkung von CO₂ unter definierten Bedingungen von Atmosphäre (Luft sowie CO₂) und Feuchte wurden an Bohrkernscheiben aus dem GV2 untersucht. Die Ergebnisse werden im Abschnitt 7.4.2 beschrieben.

7.4.1 Phasenbestandsuntersuchungen an Spritzbetonbohrkernen

Das Bohrkernmaterial des in-situ-Spritzbetonversuches GSBV1 wies im Abstand von ca. 5 cm wechselnde Hell-Dunkel-Bereiche auf (Abschnitt 6.5.2.3), wie das Foto in Abbildung 186 oben zeigt. Um mögliche Unterschiede im Phasenbestand zwischen den hellen und dunklen Bereichen festzustellen, wurde ein Probestück aus dem Bohrkern B7 (Abschnitt 32,5 cm – 42,5 cm) für eine orts aufgelöste Phasenanalyse (Messpositionen in Abbildung 186 oben) präpariert. Die Diffraktogramme in Abbildung 186 zeigen, dass die dunklen Bereiche den der Rezeptur entsprechenden Phasenbestand aus 5-1-8-Phase, MgO und silikatischen Zuschlag aufweisen. In den hellen Bereichen wurde zusätzlich Chlorartinit, Mg(OH)Cl·MgCO₃·2H₂O, identifiziert sowie ein geringer Rest-MgO-Anteil festgestellt. Das Ergebnis wurde an

pulverisierten Proben aus den jeweiligen Bereichen reproduziert (Abbildung 187). Offensichtlich hat sich in einer Nebenreaktion zur Bindemittelphasenbildung auch Chlorartinit aus MgO und der Anmischlösung in Gegenwart von CO₂ entsprechend nachfolgender Reaktionsgleichung (1) gebildet:



Die Ursache für die bereichsweise Chlorartinitbildung während des Spritzvorganges, d.h. inwieweit beim Spritzen dieses Abschnittes andere Bedingungen bzgl. CO₂ und evtl. Temperatur gegeben waren, konnte bisher nicht geklärt werden.

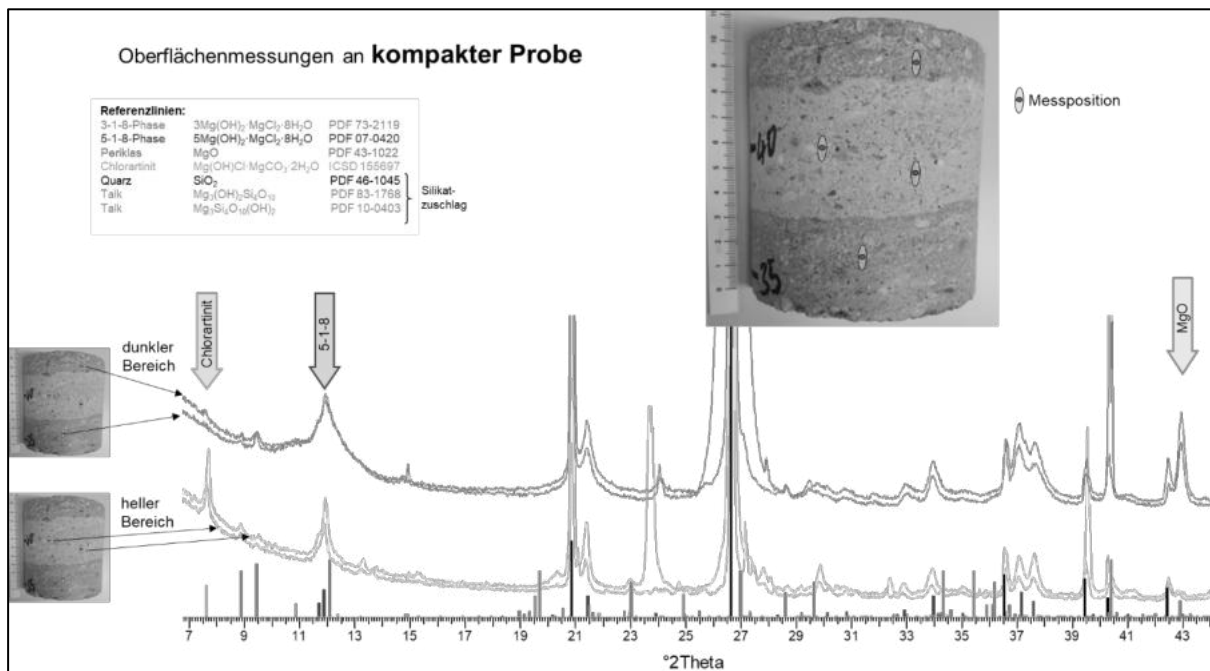


Abbildung 186: Ortsaufgelöste Phasenanalyse an kompakter Spritzbetonprobe aus dem GSBV1 (Bohrung B7, 32,5 cm – 42,5 cm)

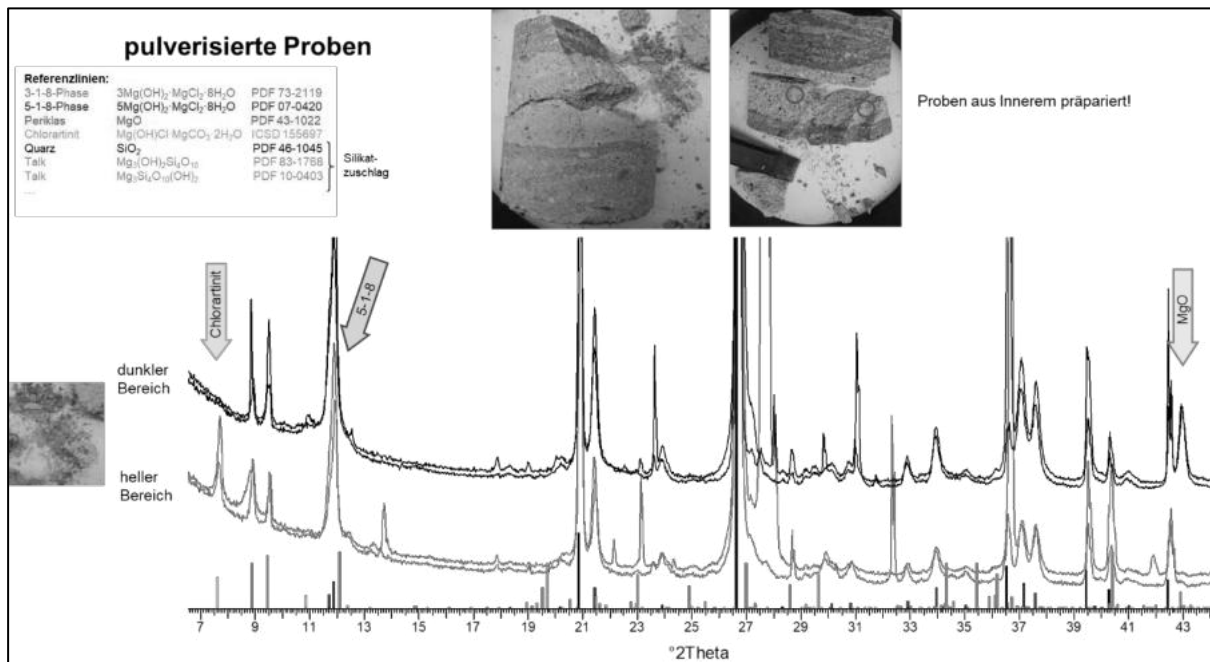


Abbildung 187: Phasenanalyse an pulverisierten Proben aus hellem und dunklem Bereich des entsprechend Abbildung 186 vermessenen Probestückes aus dem GSBV1 (Bohrung B7, 32,5 cm – 42,5 cm)

Auch das Bohrkernmaterial aus dem GSBV3 (Rezeptur mit reinem Steinsalzzuschlag) zeigt eine Hell-Dunkel-Maserung, wobei die Bereiche eher „schlierenartig“ das Kernmaterial durchziehen (Abbildung 188). Es wurden wiederum die hellen und dunklen Bereiche, sowie der Grenzbereich der Schichten an Probestücken aus den Bohrungen B20 und B30 vermessen (s. Abschnitt 6.5.4.3). Aus jeder Bohrung wurde Probematerial mit einer Betonierabschnittsgrenze (BAG) sowie aus der Mitte der zweiten Betonierschicht (höchste Abbinde­temperatur mit > 80 °C, s. Abschnitt 6.5.5.7) ausgewählt. Die ortsaufgelösten Messungen erfolgten auf den ebenen Innenflächen der halbierten Bohrkernstücke (orange Umrandungen in Abbildung 188).

Die Röntgendiffraktogramme zeigen im Gegensatz zum GSBV1 keinen Chlorartinit im Bereich der hellen Schlieren. Es wurde auch im Bereich der BAG ausschließlich der erwartete Phasenbestand aus 5-1-8-Phase und Rest-MgO neben dem NaCl-Zuschlag identifiziert (Abbildung 189). In der Schicht 2 (Bohrung 20 und 30) wurden zusätzlich geringe Anteile der Hochtemperaturphase 9-1-4 detektiert (Abbildung 190 bis Abbildung 192). Diese bildete sich aufgrund der hohen Temperatur (> 80 °C) beim Abbinden.

Aufgrund des im GSBV1 nachgewiesenen Chlorartinit wurde während des Spritzens des GSBV3 die Vorort-CO₂-Konzentration gemessen. Es konnte keine erhöhte CO₂-Konzentration (< 0,4 Vol%) im Vergleich zur Umgebungsluft festgestellt werden.



Abbildung 188: Fotos des Bohrkernmaterials der Bohrungen B20 und B30 aus dem GSBV3; S1, S2, S3: 1., 2. und 3. Betonierschicht; rote Linie: Lage BAG

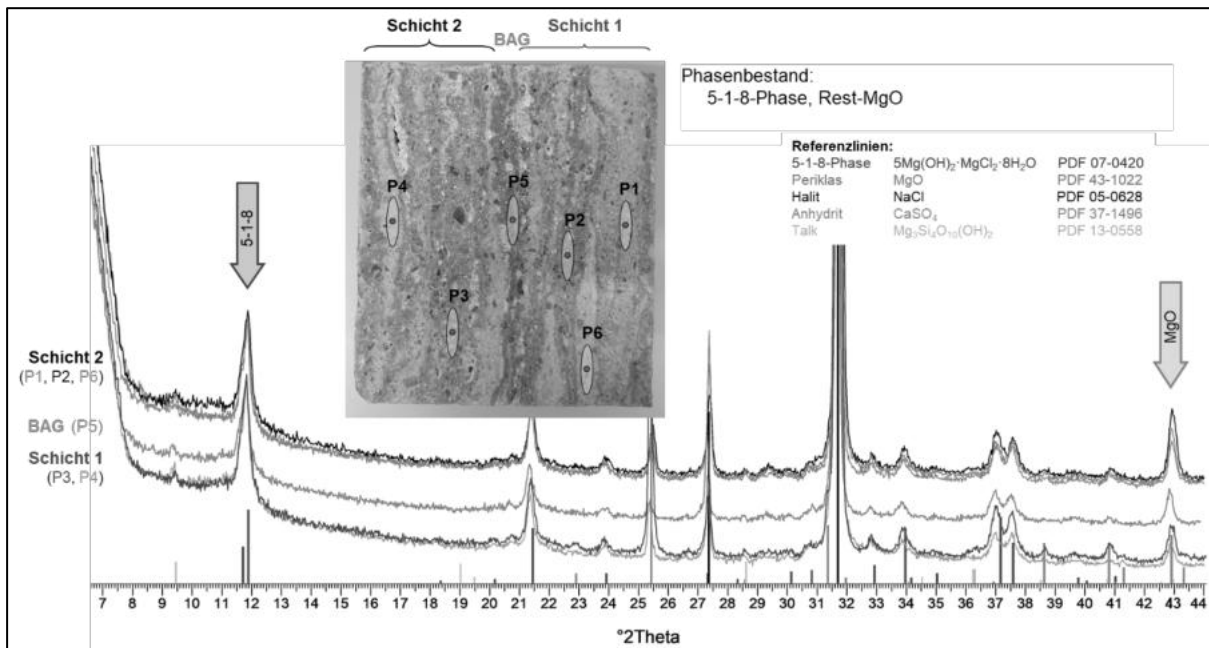


Abbildung 189: Ortaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 - B30: Bereich mit Schicht 1, BAG und Schicht 2 (s. Abbildung 188).

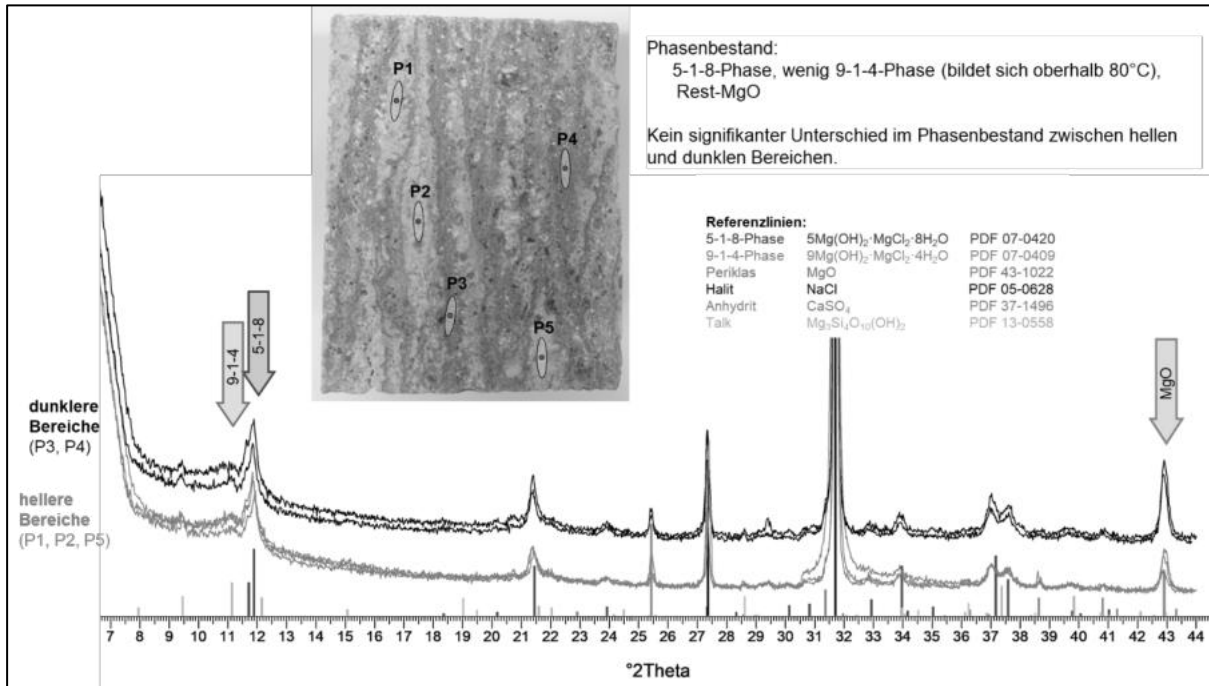


Abbildung 190: Ortaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 – B30: Schicht 2 (s. Abbildung 188)

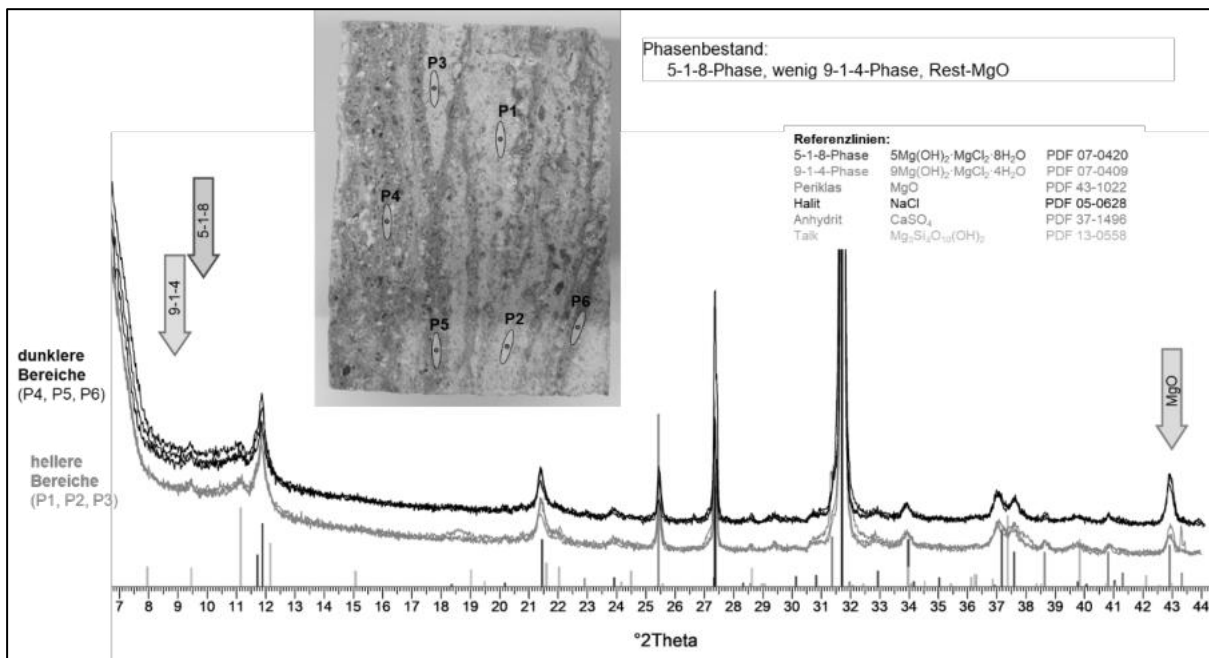


Abbildung 191: Ortaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 - B20: Schicht 2 (s. Abbildung 188)

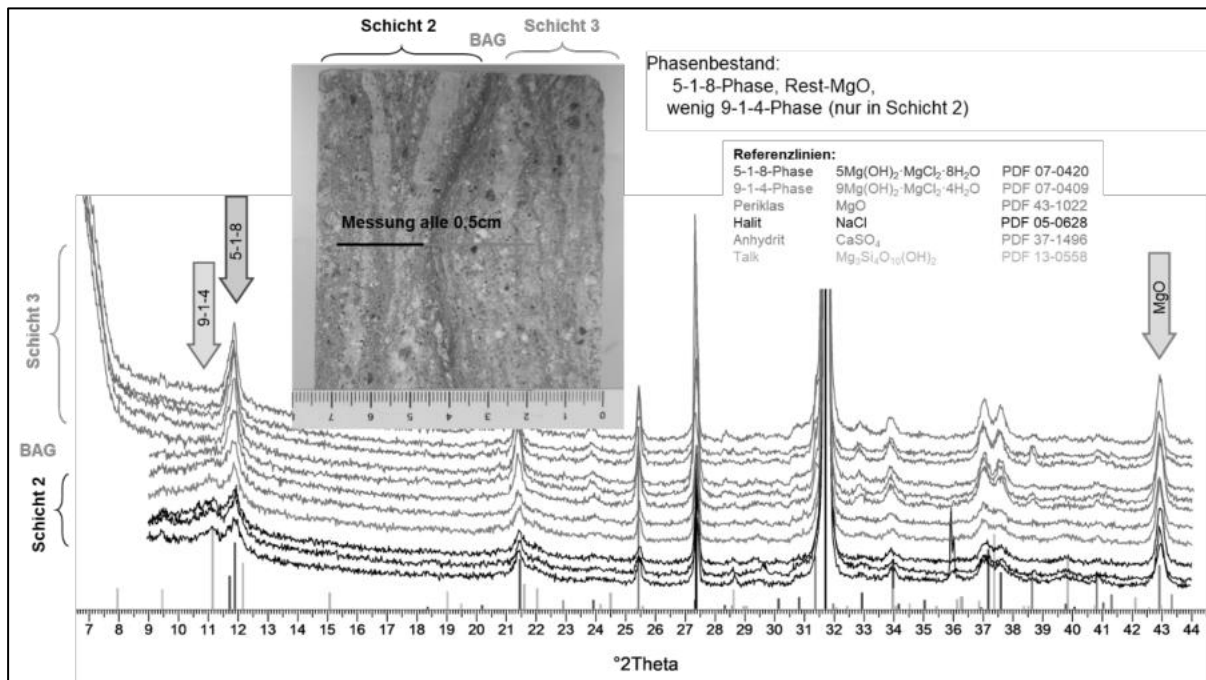


Abbildung 192: Ortaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 – B20: Schicht 2, BAG und Schicht 3 (s. Abbildung 188)

7.4.2 Untersuchungen zum Einfluss von CO₂ und definierter Luftfeuchte auf den MgO-Spritzbeton

Am GV2-Bauwerk hatte sich nach 7-jähriger Standzeit auf der Oberfläche des an das Bauwerk angrenzenden Salzgebirges eine leicht ablösbare Verkrustung gebildet, bei der es sich um eine Verwachsung von Carnallit und Chlorartinit handelte. Weiterhin wurde bei ersten Lagerungsversuchen von MgO-Spritzbetonproben bei 30 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45 % bis 65 % die Bildung von Chlorartinit nachgewiesen. [4]

Im Rahmen dieses Projektes wurden weitere Lagerungsversuche mit GV2-Probematerial in CO₂- sowie in Luft-Atmosphäre mit jeweils definierter Feuchte (über NaCl-gesättigter 2 molaler MgCl₂-Lösung = repräsentative Standortlösung HAW-Endlager im Steinsalz) durchgeführt. Die Lösung dieser Zusammensetzung weist bei 25 °C eine Wasseraktivität a_w von 0,7 auf [29]. Damit stellt sich über der Lösung bei dieser Temperatur eine relative Luftfeuchte von 70 % ein. Ziel dieser Untersuchungen war es, Massen-, Volumen- und Permeabilitätsveränderungen aufgrund von Veränderungen im Phasenbestand (wie der Chlorartinitbildung) grundsätzlich zu beurteilen.

7.4.2.1 Methodik

Für die Untersuchungen wurde Probematerial aus der Bohrung B48 des Bauwerks GV2 verwendet, welche im April 2020 auf 6,20 m geteuft wurde (Abschnitt 5.1.3). Bis zum Zuschnitt lagerte das Kernmaterial luftdicht in Folie eingeschweißt bei Raumtemperatur. Die Kernscheiben wurden aus massiven Betonschichten senkrecht zu den BAG gewonnen. Aus dem Kernmaterial wurden im Teufenbereich von 2,02 m bis 2,16 m mehrere Scheiben (20 mm Länge, 95 mm Durchmesser, Ausgangsmasse 310 g – 360 g) hergestellt (Abbildung 193).

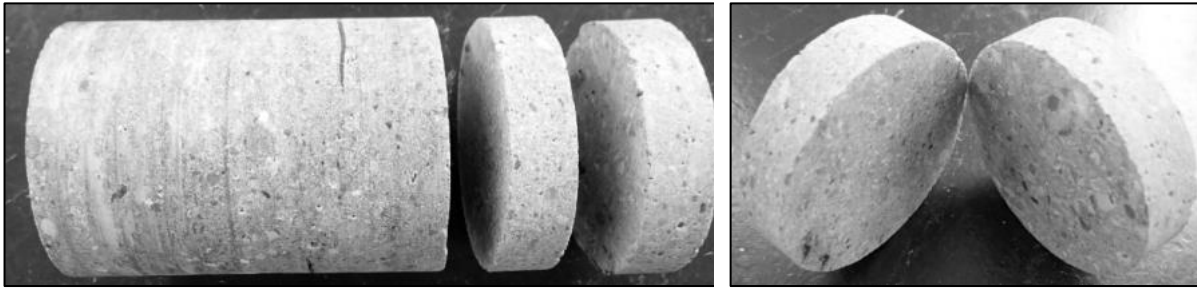


Abbildung 193: Fotos vom Bohrkern der Bohrung B48 (links) und gewonnene Bohrkernscheiben (rechts)

Vor Beginn der Lagerung wurde an den Bohrkernscheiben die effektive Gaspermeabilität (Manteldruck 1,1 MPa, Fluiddruck 0,6 MPa) sowie der Phasenbestand bestimmt. Die Messpositionen auf den Stirnflächen der Proben wurden gekennzeichnet (siehe Tabelle 82), um an den gleichen Positionen nach der Lagerung den Phasenbestand erneut zu bestimmen. Die Methodik der Permeabilitätsuntersuchungen wird in Anlage 1.9 erläutert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 6.8 dokumentiert.

Die Proben wurden ca. 260 Tage bei Raumtemperatur und ohne Volumeneinspannung in verschlossenen Exsikkatoren über NaCl-gesättigter, 2 molaler MgCl₂-Lösung gelagert (Abbildung 194). Der Exsikkator für die Lagerung unter CO₂-Atmosphäre wurde zu Beginn des Versuchs mehrere Minuten mit CO₂ gespült, um einen möglichst großen Teil der Luft zu verdrängen. Es wurden zwei Probescheiben (P302-2/13 und P302-2/14) unter CO₂ gelagert. In einem zweiten Exsikkator lagerten zwei Bohrkernscheiben (P302-2/18 und P302-2/19) in Luft-Atmosphäre. Über den gesamten Versuchszeitraum wurden Luftdruck, relative Luftfeuchte und Temperatur in den Exsikkatoren mit VOLTcraft-Datenloggern, DL-220THP, aufgezeichnet. In größeren Abständen wurden die geometrischen Abmessungen und die Masse der Probenkörper bestimmt. Um die Atmosphäre in den Exsikkatoren nicht zu oft zu stören, wurden die Abmessungen und Massen der Probenkörper bewusst nicht regelmäßig ermittelt. Nach Abschluss der Lagerung wurde der Phasenbestand und die effektive Gaspermeabilität erneut gemessen.

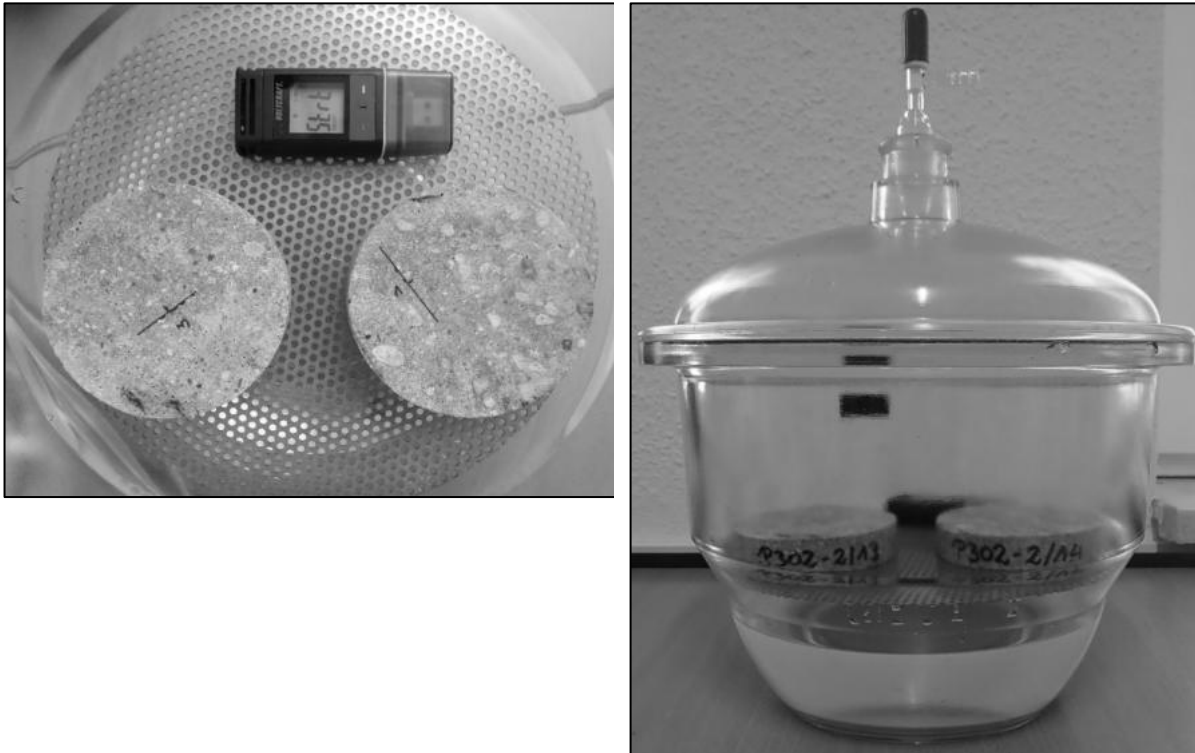


Abbildung 194: Lagerung von Proben unter CO₂-Atmosphäre über endlagerrelevanter Lösung

7.4.2.2 Ergebnisse

Der Ausgangsphasenbestand aller vier Probescheiben entspricht mit 5-1-8-Phase und Rest-MgO neben silikatischen Zuschlagsphasen wiederum dem erwarteten Phasenbestand (schwarze Diffraktogramme Abbildung 197 und Abbildung 198).

In beiden Exsikkatoren stellte sich während des gesamten Versuchszeitraums über der NaCl-gesättigten 2 molalen MgCl₂-Lösung eine messbare relative Feuchte von $65 \pm 2 \%$ bei einer Temperatur von $24 \pm 4 \text{ °C}$ ein (Abbildung 195), welche der berechneten von ca. 70 % F_R bei 25 °C entspricht. Zeitweise sind die verwendeten Datenlogger ausgefallen, weshalb Lücken im Datenverlauf nach 170 Tagen auftreten (durchgezogene Linien).

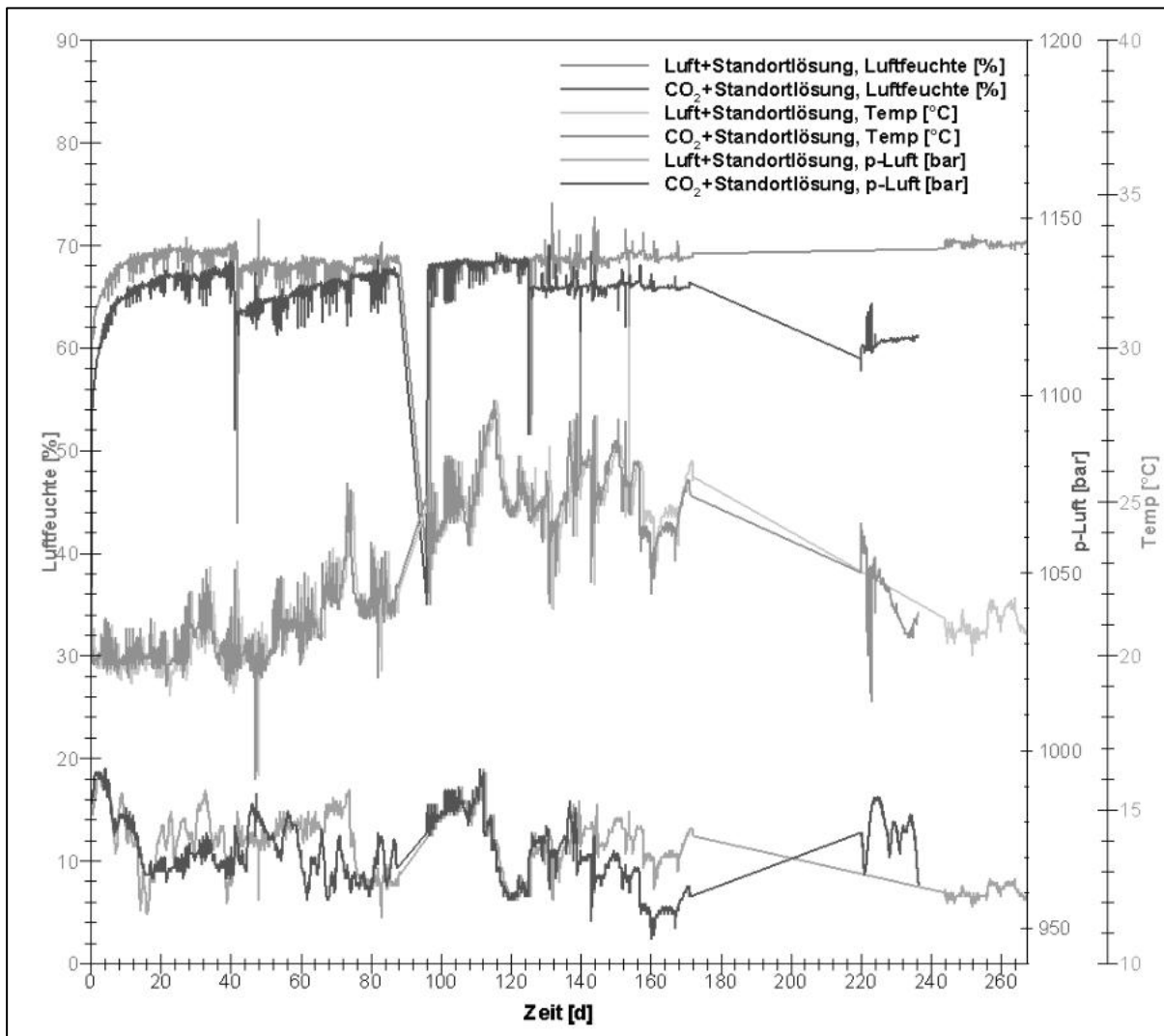


Abbildung 195: Zeitlicher Verlauf von relativer Luftfeuchte, Luftdruck und Temperatur in den Exsikkatoren während der Lagerungsversuche (Datenloggerausfälle nach 170 Tagen)

Bereits nach etwa 6 bis 8 Wochen Lagerungsdauer der Bohrkernscheiben in CO₂-Atmosphäre konnten auf den Oberflächen der Proben, insbesondere den Randbereichen, deutliche weiße Ausblühungen festgestellt werden. An den in Luft gelagerten Proben waren visuell keine Veränderungen zu erkennen. Anhand der Fotos in Tabelle 82 können die Proben vor und nach der Lagerung in CO₂- bzw. Luft-Atmosphäre verglichen werden.

Es wurde für alle Proben über den Lagerungszeitraum eine Massenzunahme festgestellt. Die relative Massenzunahme der in CO₂-Atmosphäre gelagerten Proben ist mit 3,5-3,7 % ± 0,1 % tendenziell größer als für die in Luft-Atmosphäre gelagerten Proben mit 3,3-3,4 % ± 0,1 %. Die relative Massenänderung $\left(\frac{m(t)-m_0}{m_0}\right)$ der vier Probescheiben über den Versuchszeitraum ist in Abbildung 196 dargestellt.

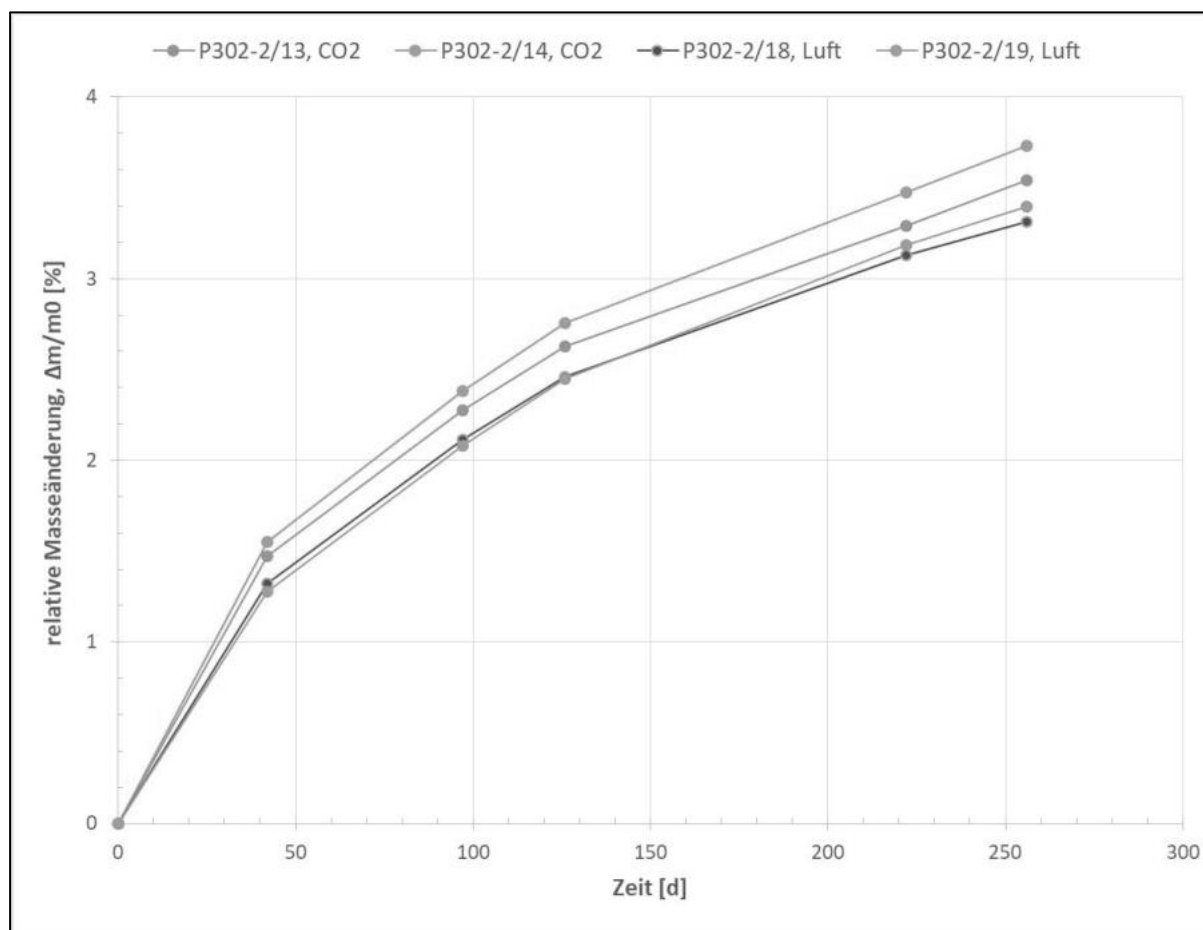












Abbildung 196: Relative Masseänderungen der Proben über den Versuchszeitraum

Ebenfalls wurde bei allen Proben eine Volumenzunahme über die Lagerungszeit festgestellt. In Abbildung 199 sind die Volumina der Proben gegenübergestellt. Für die in CO₂-Atmosphäre gelagerten Proben beträgt die relative Volumenzunahme $4,0 \% \pm 1,7 \%$ bis $4,2 \% \pm 2,1 \%$. Sie ist größer als für die in Luft gelagerten Proben mit $2,2 \% \pm 8,9 \%$ bis $3,4 \% \pm 6,8 \%$ Volumenzunahme (Tabelle 81).

Tabelle 81: Änderung der Prüfkörpervolumina über den Versuchszeitraum

Probe – Atmosph.	Beginn Lagerung	Ende Lagerung	relative Volumenänderung
	[cm ³]	[cm ³]	[%]
P302-2/13 – CO₂	147,51 ± 1,58	153,46 ± 1,91	4,0 ± 1,7
P302-2/14 – CO₂	144,26 ± 1,82	150,27 ± 2,29	4,2 ± 2,1
P302-2/18 – Luft	139,19 ± 8,43	142,21 ± 8,81	2,2 ± 8,9
P302-2/19 - Luft	163,18 ± 6,80	168,73 ± 8,44	3,4 ± 6,8

Tabelle 82: Probenfotos vor und nach der Lagerung in CO₂- bzw. Luft-Atmosphäre

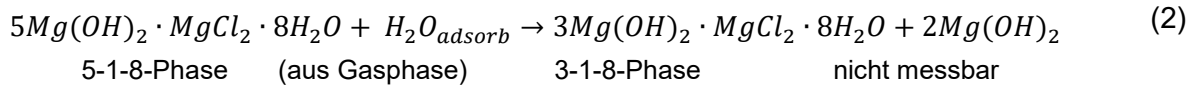
Lagerungs- bedingung	Probe	Beginn Lagerungsversuch	Ende Lagerungsversuch
CO ₂ -Atmosphäre über NaCl-gesättigter 2 molaler MgCl ₂ -Lösung	P302-2/13		 
	P302-2/14		 
Luft-Atmosphäre über endlagerrelevanter Lösung	P302-2/18		
	P302-2/19		

Nach der Lagerung in CO₂- bzw. Luft-Atmosphäre wurde an den Bohrkernscheiben erneut der Phasenbestand an den gekennzeichneten Messpositionen bestimmt, um den Phasenbestand mit dem Phasenbestand im Ausgangszustand zu vergleichen.

Die Diffraktogramme in Abbildung 197 zeigen, dass sich in der CO₂-Atmosphäre bei $65 \pm 2 \%$ F_R das Magnesiumcarbonat-Hydrat Nesquehonit, MgCO₃·3 H₂O, gebildet hat. Die Bildung von

Chlorartinit konnte nicht nachgewiesen werden. Im Unterschied zu den Versuchen im Rahmen von [4] wurden die Proben hier einer reinen CO₂-Atmosphäre ausgesetzt.

Jedoch hatte sich auch in Luft-Atmosphäre bei 65 ± 2 % F_R bei den Proben kein Chlorartinit und auch keine andere Carbonatphase gebildet¹⁴ (Abbildung 198). Dagegen sind schwache Reflexe der 3-1-8-Phase sichtbar. Deren Bildung kann über die aus der umgebenden Luftfeuchte adsorbierenden Wassermoleküle und damit bewirkten Umbildung der 5-1-8-Phase in die 3-1-8-Phase auf der Betonoberfläche bzw. im zugänglichen Porenraum entsprechend Gleichung (2) erklärt werden. Auch die 3-1-8-Phasenbildung geht mit der registrierten Masse- und Volumenzunahmen einher.



Da aber die Bildung von Mg(OH)₂ entsprechend Gleichung (2) nicht festgestellt wurde, kann die 3-1-8-Phase auch durch die Gegenwart von MgCl₂-haltigen Salzen entsprechend Reaktionsgleichung (3) entstehen. Derartige Salze liegen vermutlich in sehr geringem Anteil feinverteilt im Betongefüge vor (röntgenographisch in den Spritzbetonproben nicht detektierbar), da zur Errichtung des GV2 R-Lösung aus der Grube Teutschenthal als Anmischlösung eingesetzt wurde. Diese Lösung enthielt eine höhere Salzkonzentration (darunter MgCl₂) als für die Bildung der 5-1-8-Phase benötigt wird.

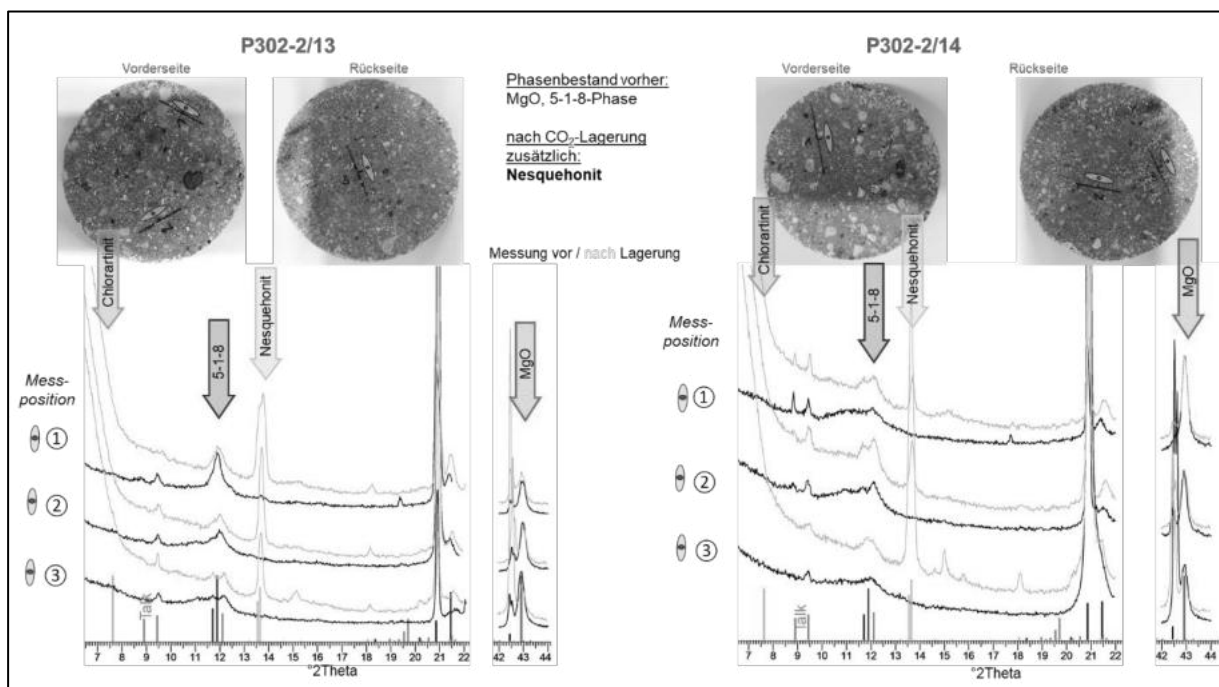
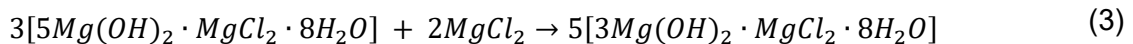


Abbildung 197: Ortsaufgelöste Phasenanalyse auf der Probenscheiben P302-2/13 und P302-2/14 vor und nach der Lagerung in CO₂-Atmosphäre und relativer Gasfeuchte von 65±2 % bei 24±4 °C

¹⁴ Bei der Lagerung in geschlossenen Exsikkatoren wird das in der eingeschlossenen Luft geringfügig enthaltene CO₂ für die Beton-Carbonatisierung verbraucht. Aus der Umgebungsluft wird CO₂ nicht ausreichend nachgeliefert, ein gelegentliches Öffnen der Exsikkatoren ist offensichtlich nicht ausreichend.

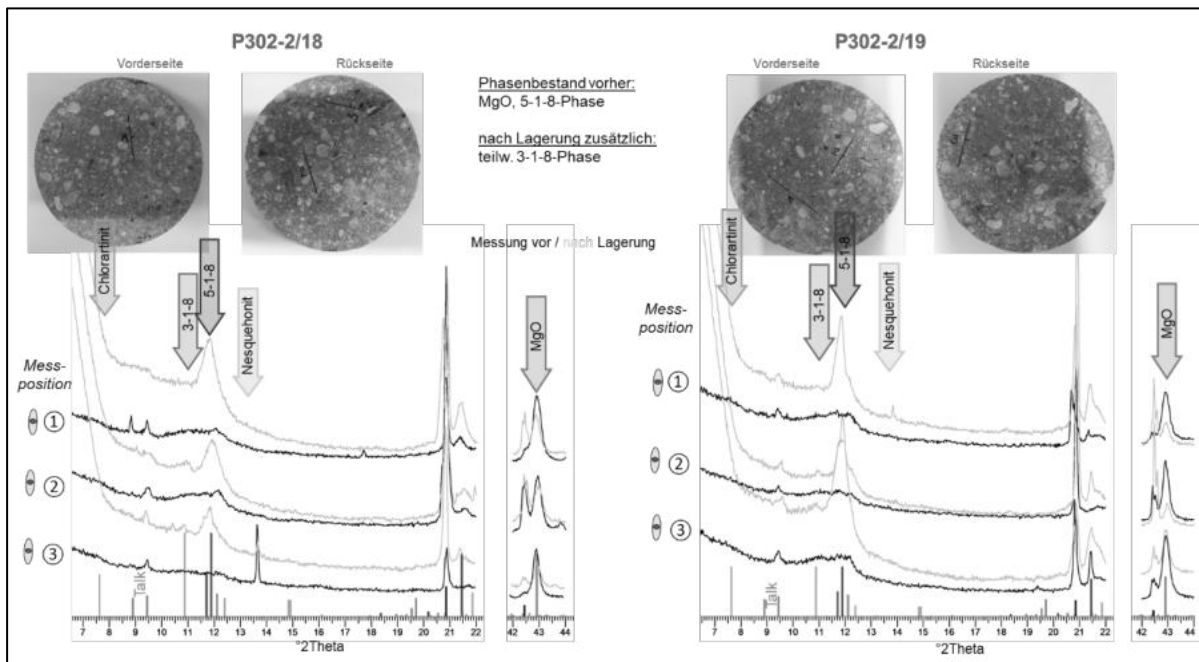


Abbildung 198: Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Probescheiben P302-2/18 und P302-2/19 vor und nach der Lagerung in Luft-Atmosphäre bei 65±2 % FR bei 24±4 °C

Die Ergebnisse der Gaspermeabilitätsuntersuchungen der Proben vor bzw. nach Lagerung sind in Tabelle 83 zusammengefasst. Die Abbildung 199 zeigt die effektive Gaspermeabilität im Zusammenhang mit der ermittelten Volumenänderung.

Bei beiden Lagerungsbedingungen erhöht sich bei den untersuchten Proben die effektive Gaspermeabilität über die Zeit. Für die Erhöhung der Permeabilität ist von einer Vergrößerung der Porosität oder der Bildung eines besser verbundenen Porenraums in den Proben auszugehen. Die Volumenzunahme der Proben kann sowohl über eine Zunahme des inneren Porenraumes als/und auch durch den Festphasenzuwachs an Nesquehonit bzw. der 3-1-8-Phase verursacht sein.

Die Permeabilität am Ende der Lagerung wurde auf die Anfangspermeabilität normiert (k_t/k_0 , letzte Spalte der Tabelle 83). Daraus ist ersichtlich, dass sich bei Lagerung in CO₂-Atmosphäre und einer Anfangspermeabilität zwischen $2,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $4,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ die effektive Gaspermeabilität um den Faktor 44 bzw. 548 erhöht hat. Für die Lagerung in Luft ergibt sich für eine Anfangspermeabilität zwischen $4,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ und $6,8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ eine Erhöhung der effektiven Gaspermeabilität um den Faktor 22 bzw. 10. Die Ergebnisse für die beiden Probenpaare lassen darauf schließen, dass sich die Gaspermeabilität bei einer Lagerung in CO₂-Atmosphäre stärker erhöht als in Luft. Aufgrund der geringen Probenanzahl ist die gegebene Einschätzung allerdings unsicher. Für eine Absicherung und Verifizierung dieser Ergebnisse sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

Tabelle 83: Effektive Gaspermeabilität vor und nach der Lagerung in CO₂- bzw. Luft-Atmosphäre bei relativer Feuchte von 65±2 % und 24±4 °C

Probe	Atmosphäre	effektive Gaspermeabilität vor Lagerung k_0	effektive Gaspermeabilität nach Lagerung k_t	k_t/k_0
		[m ²]	[m ²]	
P302-2/13	CO ₂	$2,5 \cdot 10^{-17}$	$1,1 \cdot 10^{-15}$	44
P302-2/14	CO ₂	$4,2 \cdot 10^{-19}$	$2,3 \cdot 10^{-16}$	548
P302-2/18	Luft	$4,0 \cdot 10^{-18}$	$8,8 \cdot 10^{-17}$	22
P302-2/19	Luft	$6,8 \cdot 10^{-19}$	$6,5 \cdot 10^{-18}$	10

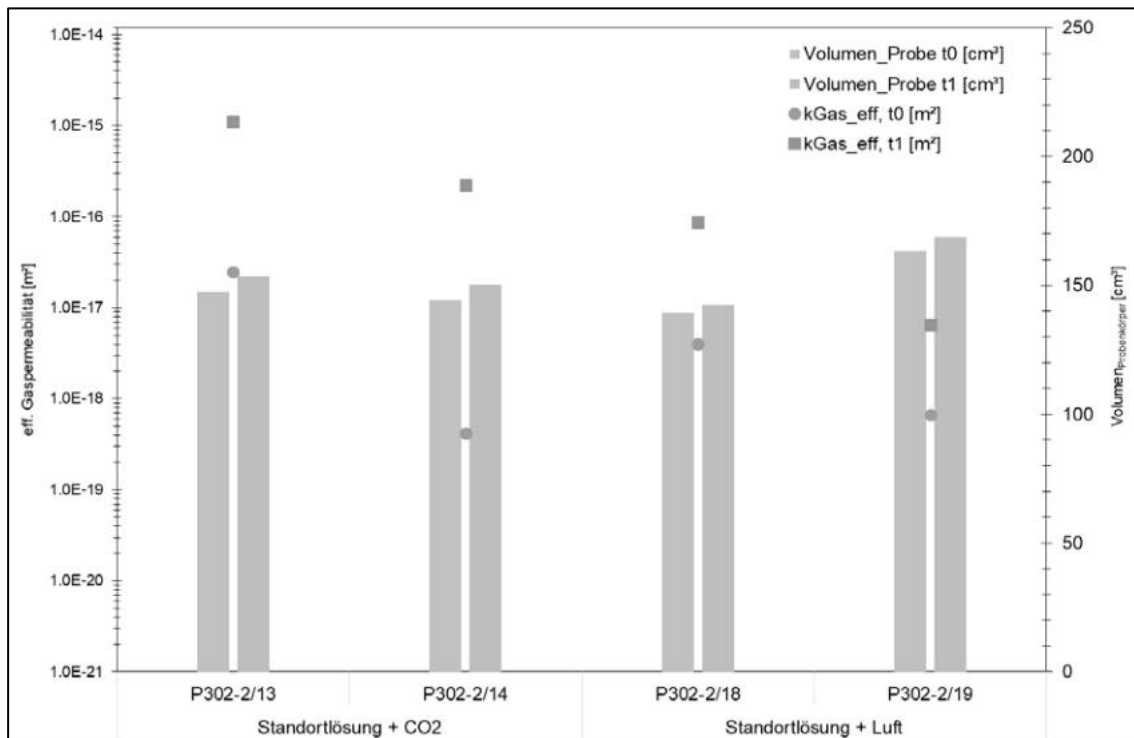


Abbildung 199: Effektive Gaspermeabilität und Probenvolumina vor (t_0) und nach (t_1) der Lagerung in CO₂- bzw. Luft-Atmosphäre

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass es zu Wechselwirkungen des MgO-Spritzbetons mit der Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre kommt. Für die Beurteilung dieser Prozesse und der Auswirkungen auf das Langzeitverhalten des Baustoffes ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Welche Größenordnung erreicht der Stofftransport von Wasser im Bauwerk unter den gegebenen thermodynamischen und zeitlichen Bedingungen für die skizzierten Prozesse?
- Welche Veränderungen sind in der Bindemittelmatrix (Umkristallisationen in der Bindemittelmatrix, Carbonatisierung, Porosität, Permeabilität, mechanische Eigenschaften des Baustoffes) über die lange Standzeit der Streckenschlussbauwerke aus MgO-Baustoff im Kontakt zur Grubenatmosphäre zu erwarten?
- Welche Parameter für den Baustoff und die thermodynamischen Randbedingungen sind für eine repräsentative modellgestützte Beschreibung der Prozesse erforderlich und mit welchen Modellen können diese Prozesse beschrieben werden?

Als Grundlage für die Beurteilung des Langzeitverhaltens eines Streckenschlussbauwerkes aus MgO-Baustoff unter den Bedingungen einer Grubenatmosphäre sollten Untersuchungen zur Klärung der Fragestellungen durchgeführt werden. Diese beinhalten:

- die Prozessanalyse und die Ableitung von prozessbeschreibenden Ansätzen für die modellgestützte gekoppelte Simulation der dominierenden Strömungs- und Transportvorgänge und der daraus resultierenden Reaktion- und Kristallisationsprozesse unter Berücksichtigung der thermodynamischen Randbedingungen,
- die zeitabhängige Bilanzierung des möglichen Wasserdampftransportes/der Wasseraufnahme durch den Baustoff aus der Grubenatmosphäre und die Beurteilung der Auswirkungen für den Baustoff,
- Konzipierung, Durchführung und Auswertung von Labor- und in situ-Untersuchungen, um die bestimmenden Teilprozesse zu beurteilen,
- Kalibrierung des im ersten Anstrich genannten gekoppelten Prozessmodells anhand der Versuchsergebnisse,

- Prognose des Langzeitverhaltens von MgO-basierten Streckenverschlussbauwerken für Standzeiten von mehreren 1000 Jahren.

Im Zusammenhang mit der Bearbeitung derartiger Fragestellungen muss in Forschungsarbeiten die Bildung und Existenz von Magnesiumcarbonat-Phasen im System der ozeanischen Salze grundlegend untersucht werden. Bisher gibt es in der Literatur keine Kenntnisse über die Art der Phasenbildung¹⁵ in Abhängigkeit von Lösungszusammensetzungen (a_w / F_R), CO₂-Partialdruck und Temperatur. Hier bedarf es einer systematischen Untersuchung mit speziell konzipierten FuE-Projekten in der Zukunft, um Reaktions- und Kristallisationsprozesse auf Basis thermodynamischer Daten beschreiben zu können.

7.5 Untersuchungen zum zeitabhängigen Verformungsverhalten der neuen Spritzbetonrezeptur mit Salzzuschlag

7.5.1 Einleitung

Im vorliegenden Abschnitt werden die Ergebnisse des Relaxationsverhaltens von Proben aus den in situ Spritzversuchen GSBV3 und GSBV4 beschrieben. In der weiteren Auswertung wird neben dem Relaxationsverhalten auch auf das Kompaktionsverhalten eingegangen.

Die Tatsache, dass der Zuschlag im Spritzbeton von granularem Silikatmaterial zu Steinsalz gewechselt wurde, legt nahe, dass beim neuen Baustoff auch signifikante plastische Verformungsanteile vorliegen können. Das würde bedeuten, dass der neue Spritzbeton-Baustoff neben belastungsabhängigen Effekten auch zeitabhängig kompaktiert (kriecht). Zur Quantifizierung bzw. für den Vergleich dieser Prozesse wurden Relaxationstests unter anfänglich hoher deviatorischer Belastung (80 % der Bruchfestigkeit) durchgeführt¹⁶. Die Durchführung der aufwendigen Relaxationstests ist in Anlage 1.6 beschrieben.

7.5.2 Ergebnisse zum Relaxationsverhalten

In Analogie zu der in Kap. 6.5.4.5 beschriebenen methodischen Vorgehensweise wurden zur Quantifizierung möglicher zeitabhängiger Verformungsprozesse bei entsprechender mechanischer Belastung auch hier Relaxationstests durchgeführt¹⁷.

Zur Darstellung der Ergebnisse werden nachfolgend transformierte Kurven dargestellt, die eine Bewertung des von der Verformungsrate abhängigen Beanspruchungszustandes ermöglichen. In Abbildung 123 ist links der jeweils auf den Ausgangsspannungszustand ($\sigma = 1$) normierte Druckabfall dargestellt. Rechts sind die über die Systemsteifigkeit über den Spannungsabfall in Verformungsraten transformierten Messkurven, d.h. der Tragwiderstand vs. Verformungsrate, dargestellt.

¹⁵ Noch weitere neben Chlorartinit und Nequehonit bisher bekannte Phasen sind: Magnesit: MgCO₃; MgCO₃·H₂O; Barringtonit: MgCO₃·2H₂O; Lansfordit: MgCO₃·5H₂O; Artinit: Mg₂(CO₃)(OH)₂·3H₂O; Hydromagnesit: 4 MgCO₃·Mg(OH)₂·4H₂O; Dypingit: 4 MgCO₃·Mg(OH)₂·5H₂O; Pokrovskit: MgCO₃·Mg(OH)₂·0,5H₂O; Giorgiosit: 4 MgCO₃·Mg(OH)₂·5-6H₂O; 4MgCO₃·Mg(OH)₂·8H₂O; Schmittler'sches Salz: MgCO₃·MgCl₂·7H₂O (ohne Kenntnisse über Bildungs- und Existenzbedingungen im System der ozeanischen Salze inkl. Magnesiabaustoff).

¹⁶ Wie Anlage 1.6 ausgeführt, dienen die hier durchgeführten Relaxationstests ausschließlich dem Vergleich zeitabhängiger Verformungseigenschaften im „Kurzzeitversuch“, wobei aus den ermittelten Relaxationskurven keine Quantifizierung des Kriechverhaltens eines Absperrbauwerkes möglich ist.

¹⁷ Wie Anlage 1.6 ausgeführt, dienen die hier durchgeführten Relaxationstests ausschließlich dem Vergleich zeitabhängiger Verformungseigenschaften im „Kurzzeitversuch“, wobei aus den ermittelten Relaxationskurven keine Quantifizierung des Kriechverhaltens eines Absperrbauwerkes möglich ist.

Der Vergleich der Messkurven in Abbildung 123 (links) zeigt einen exponentiellen Spannungsabfall, der innerhalb des Versuchszeitraums von > 2 Tagen (Zeit im TZF) zwischen ca. 60 % bis 48 % der normierten Spannung liegt. Unter Berücksichtigung der Eigenverformung des geomechanischen Prüfsystems ergeben sich über die Kurventransformation in der halb-logarithmischen Darstellung (σ vs. $\log \dot{\epsilon}_{transf.}$) annähernd Geraden, die sich auf eine Restspannung unter in-situ relevanten Belastungsraten (hier: $\dot{\epsilon} = 10^{-10}$ 1/s) extrapolieren lassen.

Die extrapolierten Spannungen (Abbildung 123-re.) liegen in einem Bereich von 12 MPa bis ca. 17 MPa, wobei sich auch die Daten des späteren GSBV4 gut einordnen (vgl. Kap. 6.5.5.5). Die auf eine sehr kleine Verformungsrate extrapolierte Spannung (Abbildung 123-re.) beträgt beim GSBV4 ca. 14 MPa und liegt damit im Mittel zwischen den beiden Daten des GSBV3 (vgl. Kap. 6.5.4.5).

7.5.3 Wertung des Relaxations- und Kompaktionsverhaltens

Da offenbar der Zuschlag Steinsalz im Spritzbeton das Festigkeitsverhalten bestimmt, ist aufgrund der signifikant plastischen Verformungsanteile der Steinsalzkomponente zu überprüfen, ob möglicherweise auch das Relaxationsverhalten des Baustoffs beeinflusst sein kann. Das würde bedeuten, dass der neue Spritzbeton-Baustoff neben belastungsabhängigen Effekten auch zeitabhängig kompaktiert (kriecht).

Zur Bewertung der Relevanz dieser Prozesse sind in Abbildung 200 die vorliegenden Datensätze aus Relaxationstests an Proben aus dem GSBV3 bzw. GSBV4 im Vergleich zu Ergebnissen von Proben aus dem GV2 sowie aus Laboransätzen verschiedener anderer Sorelbetonrezepturen zusammengestellt.

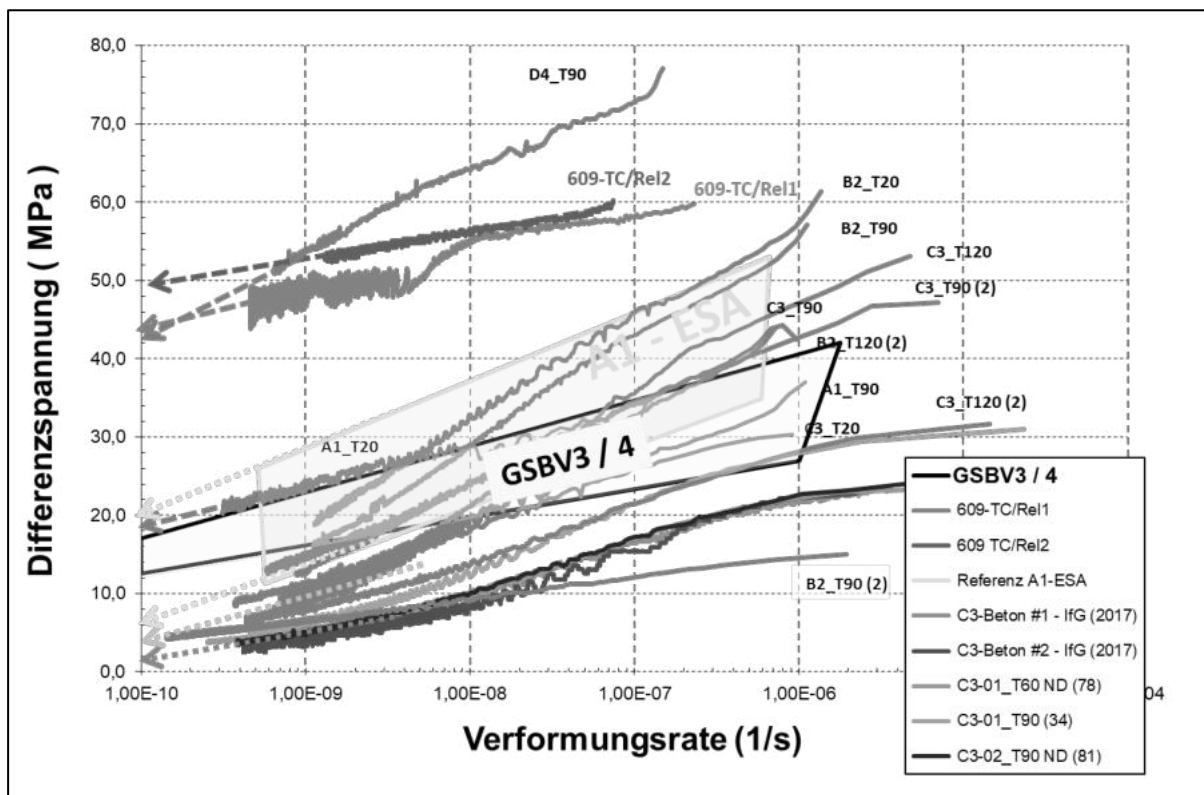


Abbildung 200: Relaxationsverhalten der zwei Spritzbeton-Chargen GSBV3 und 4; Transformierter Spannungsverlauf vs. log Kriechrate. Für den Vergleich sind Daten von D4-Ortbeton und verschiedenen C3-Varianten sowie von A1 aus dem ESA-Vorhaben dargestellt.

Als Ergebnis liegen die unterschiedlichen Relaxationskurven vor, die in einem weiten Bereich variieren. Entscheidend ist der Spannungswert, der sich aus der Extrapolation auf eine normierte Verformungsrate von $\dot{\epsilon} = 10^{-10}$ 1/s ergibt. Er beschreibt den Tragwiderstand gegenüber den angreifenden Gebirgsspannungen.

Es ergeben sich folgende Beobachtungen und Feststellungen:

- 1) Alle Messwerte von Proben aus dem GV2 liegen im oberen Bereich des Variationspektrums für MgO-Baustoffe. Die Proben der in rot dargestellten Versuchskurven relaxieren unter Endlager-relevanten Verformungsbedingungen gegen einen vergleichsweise hohen Restspannungswert von 45 MPa - 50 MPa (ca. 75 % des Ausgangswertes).

Das bedeutet, dass der MgO-Beton D4 in der hier untersuchten Spritzbetonvariante aus dem GV2 gegenüber den anderen Baustoffen ein günstiges Relaxationsverhalten aufweist, d.h. nur ein geringes oder vernachlässigbar kriecht.

- 2) Im Gegensatz dazu liegt beim modifizierten Spritzbeton aus dem GSBV3 bzw. 4 das Spannungsniveau mit 12 MPa - 17 MPa deutlich niedriger. Es verbleibt jedoch im Gegensatz zu anderen Rezepturen (insbesondere C3) noch ein signifikantes Restspannungsniveau.

Daraus folgt, dass der MgO-Spritzbeton mit Salzzuschlag als Baustoff mit der 5-1-8-Phase im Unterschied zu den Baustoffen mit 3-1-8 Phase in der Lage ist, deviatorische Spannungen, wie sie in einem Widerlager bei einer Druckbelastung zu erwarten sind, aufzunehmen. Allerdings kriecht der MgO-Baustoff mit Salzzuschlag deutlich stärker als das GV2-Material, wie es in den Kompaktionsversuchen dokumentiert ist.

Deshalb wird für eine zukünftige Nachweisführung empfohlen, in Analogie zu Qualitätsuntersuchungen am A1-Beton für die Asse, an Baustoffproben des Spritzbetons mit Salzzuschlag in Zukunft isostatische Kriechversuche in Kombination mit Festigkeitsversuchen durchzuführen, um den Ersatzkompaktionsmodul¹⁸ zu bestimmen.

¹⁸ 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.

7.6 Quantifizierung / Visualisierung des Porenraumes im MgO-Spritzbeton mit Salzzuschlag

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse des HZDR zu Mikro-Computertomographie-Untersuchungen (μ CT) und Positron-Emissions-Tomographie (PET) an Spritzbetonproben kurz zusammengefasst. Die vollständigen Erläuterungen sind in dem separaten Abschlussbericht unter [1] dargelegt.

7.6.1 Material

Für tomographische Injektionsexperimente wurden aus dem Versuch GSBV3 durch das IfG beidseitig kalottierte Kernstücke von den Bohrkernen B19, B21, B23 und B25 hergestellt, da sich die Verfahrensweise der Injektion über einen Oberflächen-Schutzring-Packer auf einer glatten Schnittfläche bei Proben aus dem GV2 (s. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4) bewährt hatte. Es wurden drei Proben aus dem Bereich von Betonierabschnittsgrenzen (MgO_06, 07, 08), einer Fehlstelle (MgO_04) sowie eine „ungestörte“ Probe (MgO_05) untersucht (Abbildung 201).



Abbildung 201: Bohrkerne GSBV3, Positionen der Proben für PET/CT-Untersuchungen. Die BAG-Zonen sind gelb markiert

Die Proben MgO_04 und MgO_06 für PET-Untersuchungen wurden anhand der CT-Abbildungen und des Zustandes der Ankopplungsflächen für den Oberflächenpacker ausgewählt.

Zusätzlich wurden die Bohrkerne GSBV4 B17, B19 und B31 mit μ CT untersucht, um Informationen zur Struktur der Matrix für den Vergleich mit Fluid-Permeabilitätsuntersuchungen zu gewinnen.

7.6.2 CT-Untersuchungen

7.6.2.1 GSBV3 (Proben MgO_04 und MgO_06)

Die für die Positron-Emissions-Tomographie (PET)-Messungen bestimmten Bohrkerne wurden zunächst mit höchstmöglicher Auflösung im Mikro-Computertomograph (μ CT) gescannt. Die höchstmögliche Auflösung ist vorgegeben durch die Größe der Bohrkerne und die Voxelgröße. Sie beträgt ca. 50 μ m. Die Aufnahmeparameter waren 195 kV, 220 μ A, mit einem Filter von 2,5 mm Cu. Durch die Filterung wird das Spektrum der Röntgenenergie monochromatisiert und damit der beam-hardening Effekt begrenzt.

Die Ergebnisse (Abbildung 202, Abbildung 203) sind zunächst Tomogramme mit Grauwerten, die der Dichte im jeweiligen Voxel proportional sind. Sie zeigen generell Wechsellagen von dichteren (dunkler) und weniger dichten Strukturen, wie es aufgrund der Herstellung als Spritzbeton zu erwarten war. Die Schichtdicken liegen im Bereich mehrerer Millimeter bis Zentimeter. Vermutlich handelt es sich um linsenförmige Strukturen mit lateralen Ausdehnungen über den Bohrkerndurchmesser von 10 cm hinaus.

Außerdem sind isolierte kugelförmige Luftblasen zu erkennen. Die bekannten Dichten der Luftblasen und des Zuschlags ermöglichen prinzipiell eine Skalierung der Grauwerte in Dichteeinheiten und somit eine Abschätzung der Porosität in weniger dichte Zonen, auch wenn dort aufgrund der Unterschreitung der räumlichen Auflösung keine einzelnen Poren segmentierbar sind. Es sind außerdem einige porösere Bereiche und Korngrenzen zu erkennen, bei denen sich größere Poren klar abgrenzen lassen.

Da die Poren klar erkennbar waren, wurde eine einfache Schwellwert-Segmentierung vorgenommen. Das Ergebnis enthält die verstreuten Luftporen und flächenhafte Porenstrukturen, meistens an der Oberfläche von Körnung, entlang der Schichtung und in poröseren (hellen) Bereichen. In einigen Bereichen erkennt man eine flächenhafte Aufreihung dieser porösen Strukturen. Allerdings ist keine durchgängige Wegsamkeit erkennbar.

Die Größenverteilung der Poren lässt sich als „Thickness Map“ darstellen. Die Thickness Map ordnet jedem Voxel einer Struktur den Durchmesser der größten Kugel zu, die komplett innerhalb dieser Struktur angeordnet werden kann. Diese Kugel gibt etwa den Krümmungsradius der Porenoberfläche wieder. Die „Thickness Map“ ist somit vergleichbar mit dem Porenradienverteilungen aus Quecksilber-Kapillardruckkurven. Vereinzelt große Poren weisen einen Durchmesser im Bereich von 1-3 mm auf, wobei noch nicht zwischen kugelförmigen Luftporen und anderen (längliche und flächige Poren) unterschieden wird.

Probe MgO_04 (Abbildung 202) enthält vermutlich keine Betonierabschnittsgrenze, sie wurde aber identifiziert als aus dem Bereich einer „Fehlstelle“ stammend. Im μ CT-Bild fallen allenfalls die relativ großräumigen Bereiche verringerter Dichte auf, die an geologische Kreuzschichtung erinnern. Im Bereich der vermuteten Fehlstelle fällt auf, dass einseitige Ablösungen des Bindemittels von Körnern entstanden sind, die durch Bewegung der Körner beim Aufbringen der Schicht darüber verursacht sein könnten.

Probe Mg_06 (Abbildung 203) stammt vermutlich aus einer Betonierabschnittsgrenze, die äußerlich schwer erkennbar ist, aber in den μ CT-Schnitten Ähnlichkeit mit einer geologischen Diskontinuität hat. Allerdings ist dort keine Auffälligkeit in der Porenverteilung zu erkennen. Bezüglich ihrer Porositätsverteilung und der Verteilung der Porenweiten, soweit die Poren im μ CT identifizierbar sind, besteht kein signifikanter, über den Streubereich hinausgehender Unterschied zwischen den beiden Proben (und den weiteren, hier nicht dargestellten).

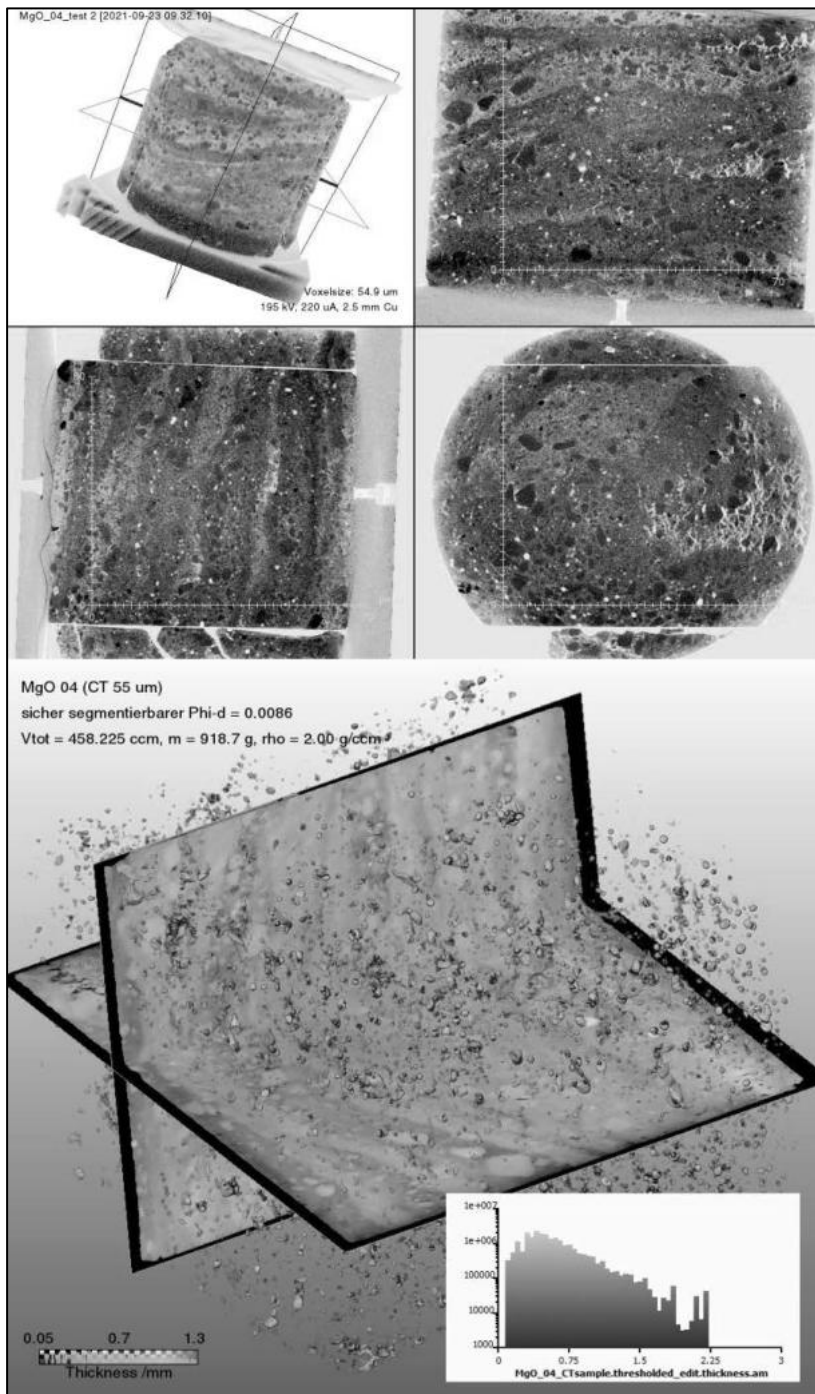


Abbildung 202: μ CT-Untersuchung der Probe MgO_04 (aus GSBV3, B19):
Oben: Grauwertdarstellung als Volumenrendering (oben links) und orthogonale zentrale Schnitte. Der Grauwertverlauf ist von hell (geringe CT-Dichte) zu dunkel (hohe Dichte). Einzelne große Poren, die überwiegend an Zuschlags-Körner grenzen, erscheinen weiß.
Unten: Thickness Map (Durchmesser) der segmentierbaren Poren. Beim unterlegten Dichtebild ist der Grauwertverlauf umgekehrt, um die Poren besser erkennen zu können.

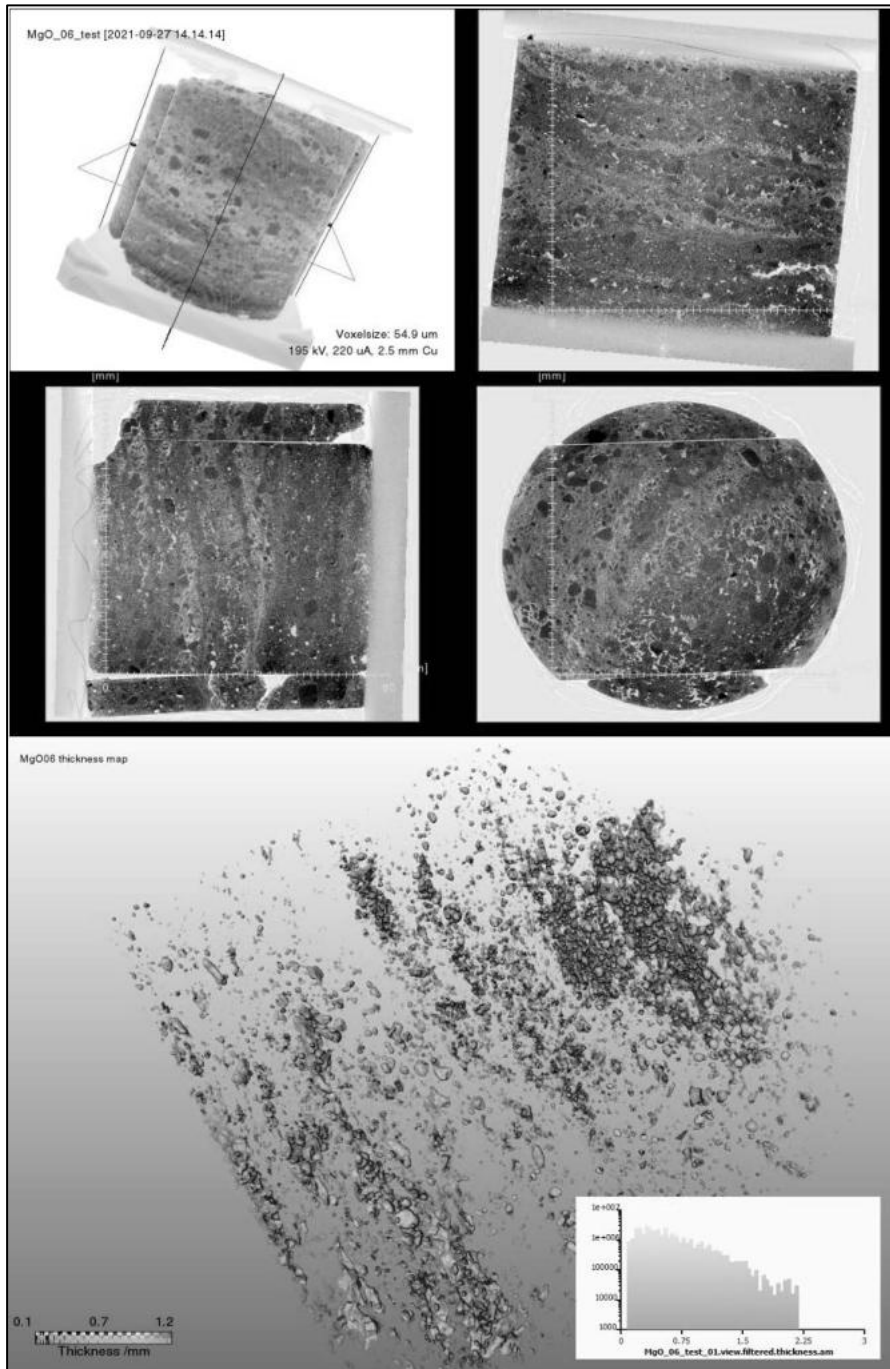


Abbildung 203: μ CT-Untersuchung der Probe MgO_06 (aus GSBV3, B21):
 Oben: Grauwertdarstellung als Volumenrendering (oben links) und orthogonale zentrale Schnitte. Der Grauwertverlauf ist von hell (geringe CT-Dichte) zu dunkel (hohe CT-Dichte). Einzelne schichtungsparelle offene Strukturen erscheinen weiß. Die Betonierabschnittsgrenze kann aufgrund der diskordanten Überlagerung einer dichteren „söhlige gelagerten“ Schicht mit einer keilförmig schräg verlaufenden, weniger dichten Struktur etwa im Bereich des mittleren Querschnitts des Bohrkerns vermutet werden (vergleiche Längsschnitt oben rechts).
 Unten: Thickness Map (Durchmesser) der segmentierbaren Poren.

7.6.2.2 GSBV4 (Proben GSBV4-B17, B19)

Die Proben aus dem GSBV4 wurden mit μ CT untersucht, um sie für den Vergleich mit Durchlässigkeitsuntersuchungen zu charakterisieren. Statt die Kerne komplett zu scannen, was aufgrund ihrer Länge eine geringe Auflösung bewirkt hätte, wurden die beiden Kerne B17 und B19 in einzelnen Sektionen mit bildfüllender Breite gescannt, um eine hohe Auflösung (39 μ m) zu erreichen. Die Sektionen wurden anschließend – nach Grauwertausgleich – zusammengefügt und komplett als etwa 100 GByte großes Tomogramm weiterbearbeitet (Abbildung 204, Abbildung 205). Dies bedeutet neben einem hohen rechentechnischen Aufwand auch, dass sektionsweise Grauwertunterschiede (also ein Streifenmuster) möglich sind.

Die Poren bei diesen Proben wurden durch „Adaptive Thresholding“ segmentiert. Dadurch erübrigt sich die Homogenisierung des Grauwert hintergrundes, weil Strukturen nur aufgrund ihres Kontrasts von ihrer Umgebung detektiert werden, ohne dass ein Schwellwert definiert werden müsste. Das Ergebnis ist auch unabhängig von sektionsweisen Grauwertvariationen.

Auch hier wurde für die segmentierten Porenstrukturen die Thickness Map berechnet und dargestellt. Insgesamt sind die Proben des GSBV4 strukturell ähnlich zu den Proben aus dem GSBV3. Allerdings erscheint bei den Proben des GSBV4 die flächige Aufreihung der Strukturen stärker ausgeprägt, woraus sich eventuell eine höhere Durchlässigkeit in Schichtrichtung ergeben könnte. Es gibt aber auch hier keine durchgehende Wegsamkeit, die mit der gegebenen Auflösung erkennbar wäre.

Durch geringfügiges Aufweiten (Dilatation um zwei Voxelweiten) der segmentierten Objekte erhält man allerdings stellenweise Konnektivität (Abbildung 206). Dies bedeutet, dass ein Weg mit Engstellen, d.h. Poren unterhalb des Auflösungsvermögens, mit einer Länge von weniger als ca. 60 μ m überwunden werden muss, „um eine Durchlässigkeit zu bewirken“.

Aus dem Flächenanteil der Poren bezogen auf eine Schnittebene lässt sich ein Porositätsprofil der Bohrkern berechnen – allerdings nur für die detektierbaren Poren. Diese Profile sind jeweils als unterste Kurve in Abbildung 204 und Abbildung 205 dargestellt. Während die mittlere Porosität etwa 1-2 % beträgt, sind Stellen mit einer größeren Porosität von 5 % und darüber klar erkennbar. Ihre Erstreckung entlang des Profils beträgt allerdings nur wenige Millimeter. Für die effektive Permeabilität der Proben werden sie nicht von Bedeutung sein.

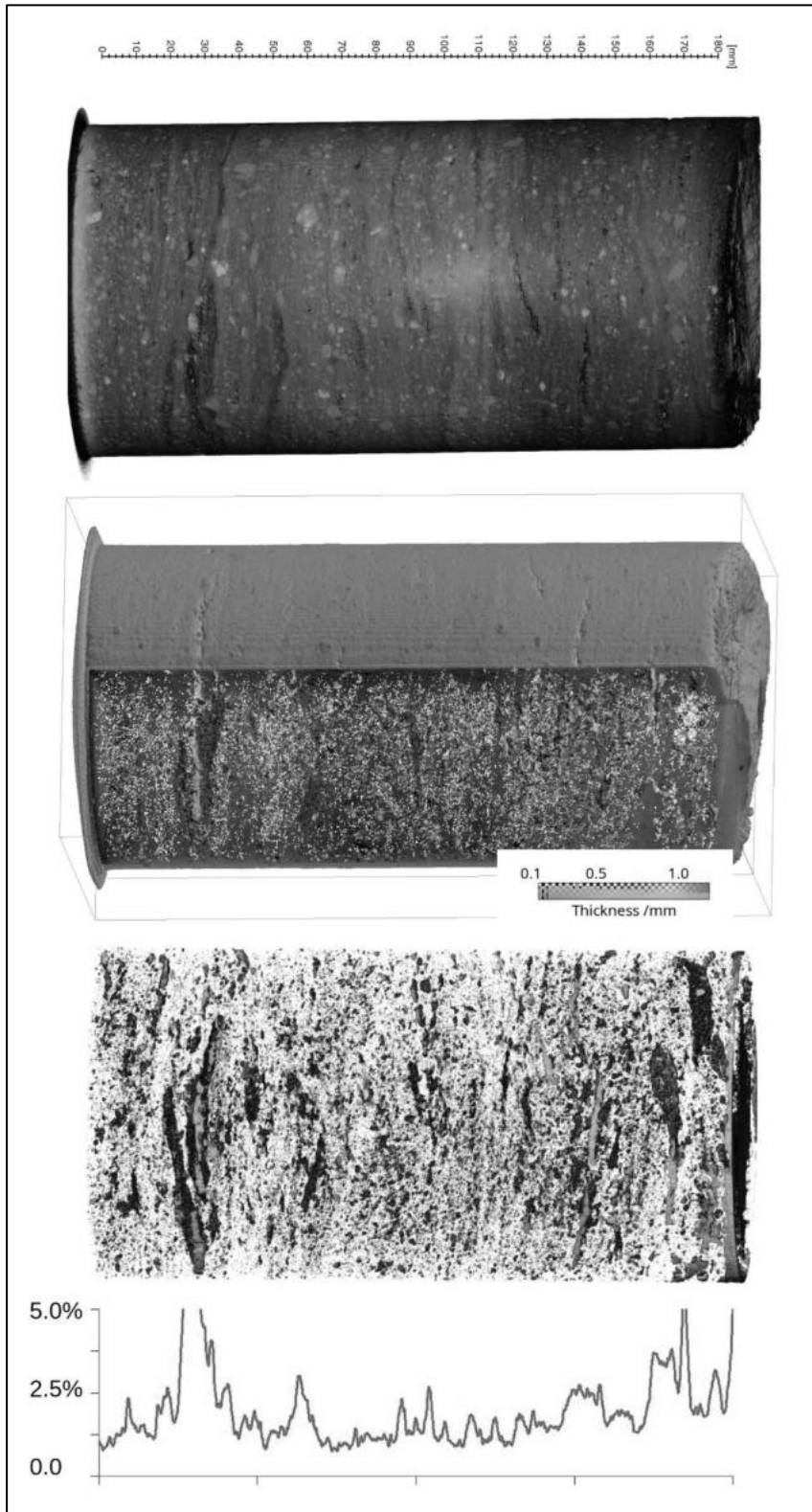


Abbildung 204: μ CT-Aufnahme von GSVBV4 B17. Von oben nach unten: Äußere Volumenansicht; Volumenrendering mit Thickness Map der segmentierten Poren im Ausschnitt, Volumenrendering der Thickness Map; Porositätsprofil.

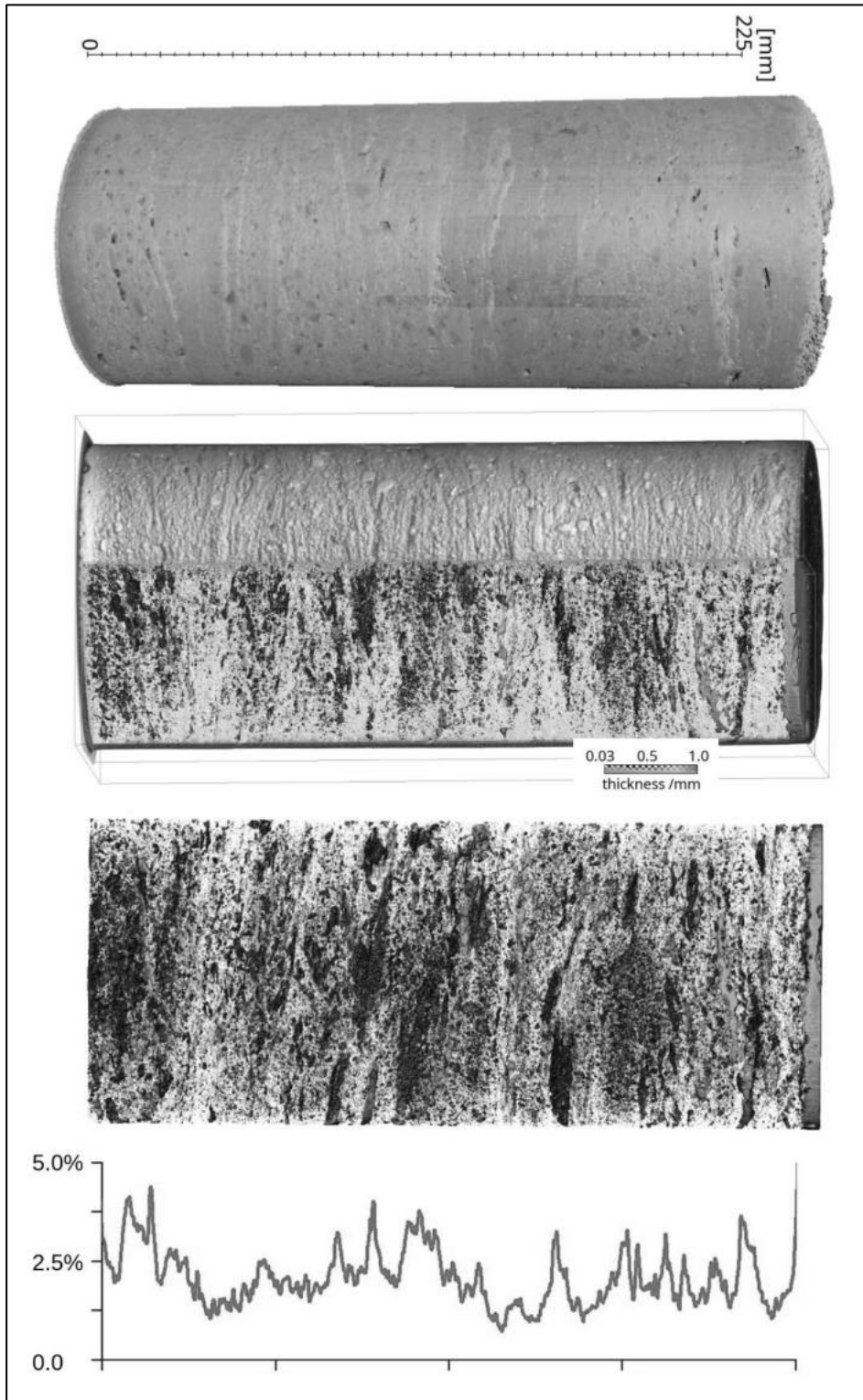


Abbildung 205: μ CT-Aufnahme von GSVBV4 B19. Von oben nach unten: Äußere Volumenansicht; Volumenrendering mit Thickness Map der segmentierten Poren im Ausschnitt, Volumenrendering der Thickness Map; Porositätsprofil.

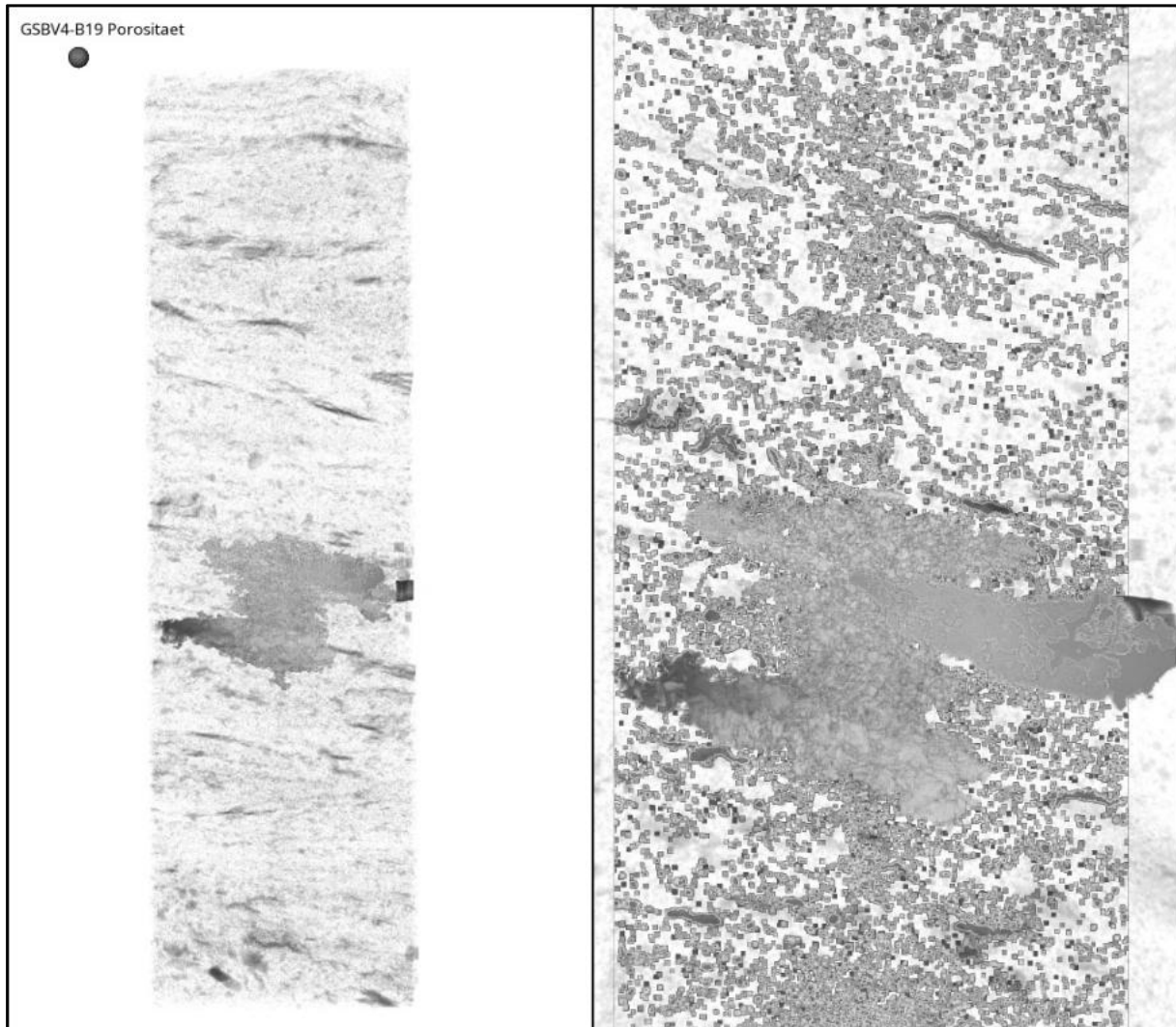


Abbildung 206: Dilatierte Poren (ca. 60 μ) der Probe GSBV4 B19 mit detektiertem durchgehendem Pfad längs der Schichtung. Die Farbkodierung gibt die Weglänge längs des verbundenen Porenraumes wieder.

7.6.3 PET-Untersuchungen

Bei den PET-Untersuchungen wurde ein Schutzring-Oberflächenpacker verwendet, da sich diese Vorgehensweise bereits bewährt hatte. Dazu wurden wieder die Bohrkernbeidseitig kalottiert, um Ankopplungsflächen für den Schutzring-Oberflächenpacker zu erhalten. Diese Flächen wiesen größere angeschnittene Poren auf, sodass ein schnelles Eindringen der Lösung und Leckagen unterhalb der O-Ring-Dichtungen zu erwarten waren. Aus diesem Grund wurde die Oberfläche im Bereich des äußeren O-Rings mittels Epoxidharz ringförmig abgedichtet und statt des langlebigen Tracers ²²Na das kurzlebige ¹⁸F verwendet. Der kurzlebige Tracer hatte eine höhere Aktivität und ermöglichte somit kürzere Messzeiten bzw. höhere Bildfolgeraten, um den Eindringvorgang zeitlich aufgelöst darzustellen. Es wurden 5 ml NaCl-gesättigte, MgCl₂-haltige Lösung eingesetzt, der ein kleines Volumen [¹⁸F]KF-Lösung mit einer Aktivität von 40 MBq hinzudosiert wurde. Der PET-Scanner wurde zeitgleich mit der Injektion der Lösung in den äußeren Ringraum gestartet, um den kompletten zeitlichen Ablauf des Eindringens der Lösung zu erfassen. Die gesamte Beobachtungszeit betrug 8 Stunden, wobei in der ersten Stunde kontinuierlich gemessen wurde und die Beobachtungszeit später in 60 zeitlich überlappende Frames mit Dauer von 2 Minuten zerlegt wurde. Dieses Verfahren

wurde an den Proben MgO_04 (GSBV3 B19) und MgO_06 (GSBV3 B21) durchgeführt (Abbildung 207 bis Abbildung 210).

Die große Zahl an Tomogrammen wurde rekonstruiert, wobei die Schwächungs- und Streukorrekturen mit Hilfe von μ CT-Aufnahmen parametrisiert wurden. Die Anpassung des μ CT-Bildes an die Positionierung des PET-Bildes (Ko-Registrierung) ist ein kritischer Schritt, weil der Informationsinhalt der Bilder sich zwar stark unterscheidet, weshalb die Anpassung manuell erfolgen muss, aber Abweichungen unterhalb der PET-Voxelgröße bereits Bildartefakte (ringförmige Muster) in den endgültigen PET-Ergebnissen bewirken können. In den Ergebnissen konnten solche Artefakte im relevanten Bildbereich weitgehend vermieden werden. Allerdings finden sich scheinbar aktive Bereiche oberhalb der ursprünglichen Quelle, bei denen es sich mit Sicherheit um Abbildungsfehler (Streuartefakte) handelt.

Die Folgen der PET-Bilder wurden als Film des Volumenrenderings und als Schnittflächen der PET/CT-Überlagerung dargestellt. In Abbildung 207 und Abbildung 209 sind einzelne beispielhafte Frames dieser Bildfolge dargestellt.

Die PET zeigt, dass ein signifikantes Flüssigkeitsvolumen in kurzer Zeit (ca. 30 min) längs weniger, eng umgrenzter Wegsamkeiten in die Probe eingedrungen ist. Die Eindringtiefe betrug lokal eng umgrenzt maximal 30 mm. Die Verteilung nach 30 Minuten lässt sich am besten in den PET/ μ CT-Überlagerungen (Abbildung 208 und Abbildung 210) erkennen. Nach 30 Minuten war das Flüssigkeitsvolumen von 5 ml weitgehend geleert, gleichzeitig stabilisierte sich die Tracerverteilung. Ihr Muster zeigte über die folgenden Stunden keine merkliche Veränderung.

Um zu prüfen, ob sich hieraus bereits eine zunehmende Selbstabdichtung des Materials ableiten lässt, wurde die äußere Kammer der Probe MgO_06 über drei Monate kontinuierlich wieder aufgefüllt. Nach einer Woche wurde die PET-Messung wiederholt (Abbildung 209). Der Unterschied zur ersten Messung war allerdings gering. Die Position der Transportwege und der zeitliche Ablauf erschienen unverändert. Die Wegsamkeiten stellten sich allerdings enger begrenzt dar.

Während der kontinuierlichen Beaufschlagung des äußeren Ringraumes mit Lösung wurden über einen weiteren Zeitraum von 3 Monaten regelmäßig μ CT-Aufnahmen wiederholt (Abbildung 211). Dabei wurde zunehmend ein Riss erkennbar. Nachdem er im Verlauf des Versuchs deutlich erkennbar wurde, ließ er sich nachträglich bereits in der ersten Aufnahme vor der Lösungsbeaufschlagung partiell detektieren – er war ursprünglich bereits angelegt. Die Überlagerung der einzelnen μ CT-Bilder erwies sich als unerwartet schwierig, da automatische Anpassungsfunktionen versagten. Erst nach manueller Anpassung zeigte sich, dass sich die Porenstrukturen merklich verlagert hatten. Die Verschiebung dieser Strukturen lässt sich durch eine isotrope Expansion erklären, die vom Zentrum der Fluidkammer ausgehend nach außen zunehmend bis zu 3 mm beträgt. Sie erfolgt augenscheinlich isotrop, da es keine Anhaltspunkte für einen Einfluss der Schichtausrichtung auf die Richtung der Expansion gibt. Es ist anzunehmen, dass die damit einhergehende Spannungsverteilung zur Aufweitung des Risses geführt hat. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem Lösung im unteren Bereich austrat.

Bei einem Wiederholungsexperiment an einer weiteren Probe wurde ein ähnliches Verhalten festgestellt.

Diese Volumenexpansion könnte auf Sekundärreaktionen der Lösung mit der 5-1-8-Phase zusammenhängen. Als Folge der Reaktion bildet sich die 3-1-8-Phase (s. Abschnitt 7.4.1). Die Phasenumwandlung geht mit einer Volumenexpansion einher, wenn die Probe nicht ausreichend eingespannt ist. Die Proben bei den PET-Untersuchungen konnten aus versuchstechnischen Gründen nicht eingespannt werden.

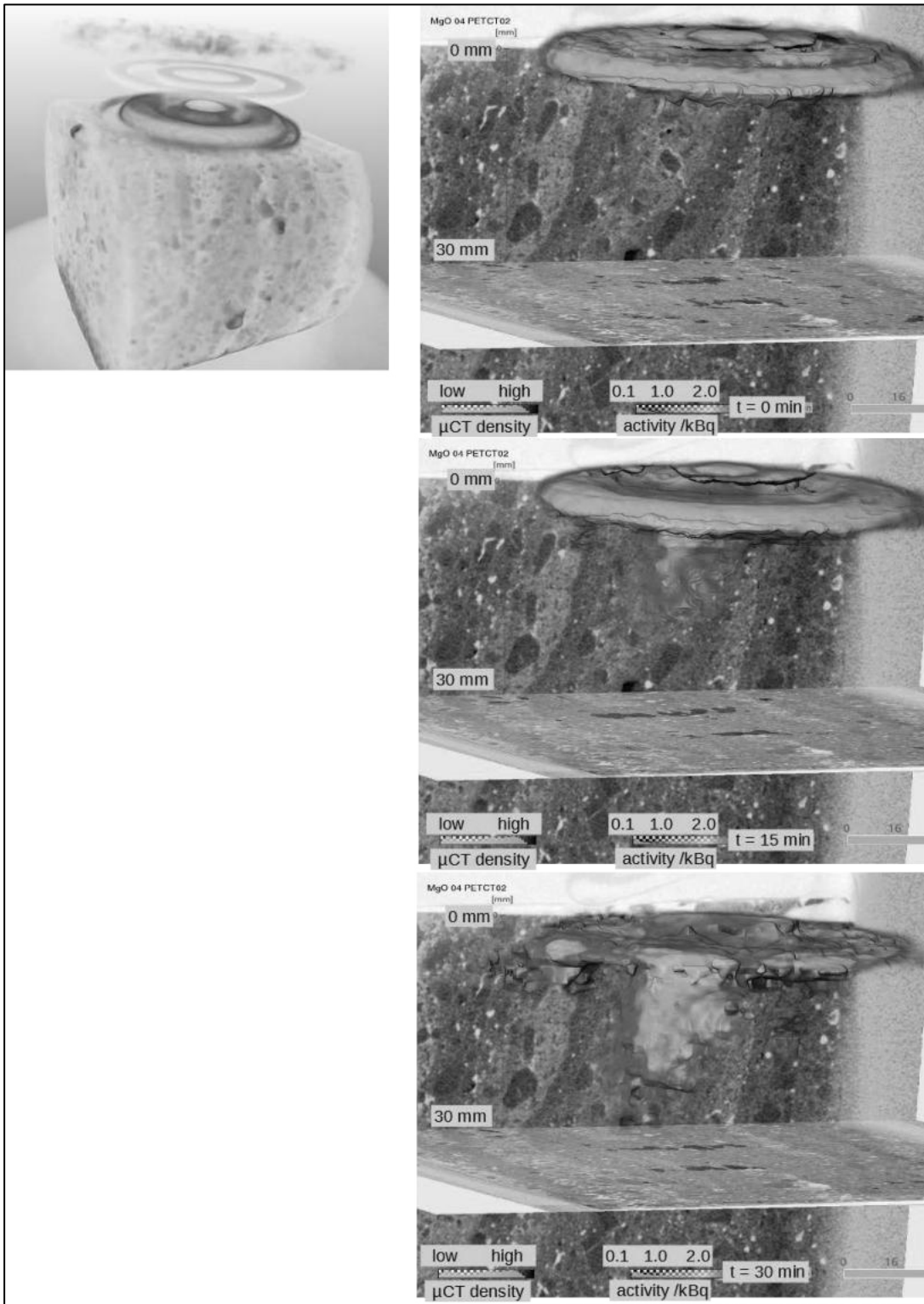


Abbildung 207: PET-Untersuchung an MgO₀₄ (GSBV3 B19):
 Links: Überlagerung des µCT- und PET- Volumenrenderings zeigt die Position Injektionszelle auf der Schnittfläche.
 Rechts: Volumenrendering der PET-Frames 0, 15, und 30 min nach dem Aufbringen der Lösung; im Hintergrund µCT-Schnitte.

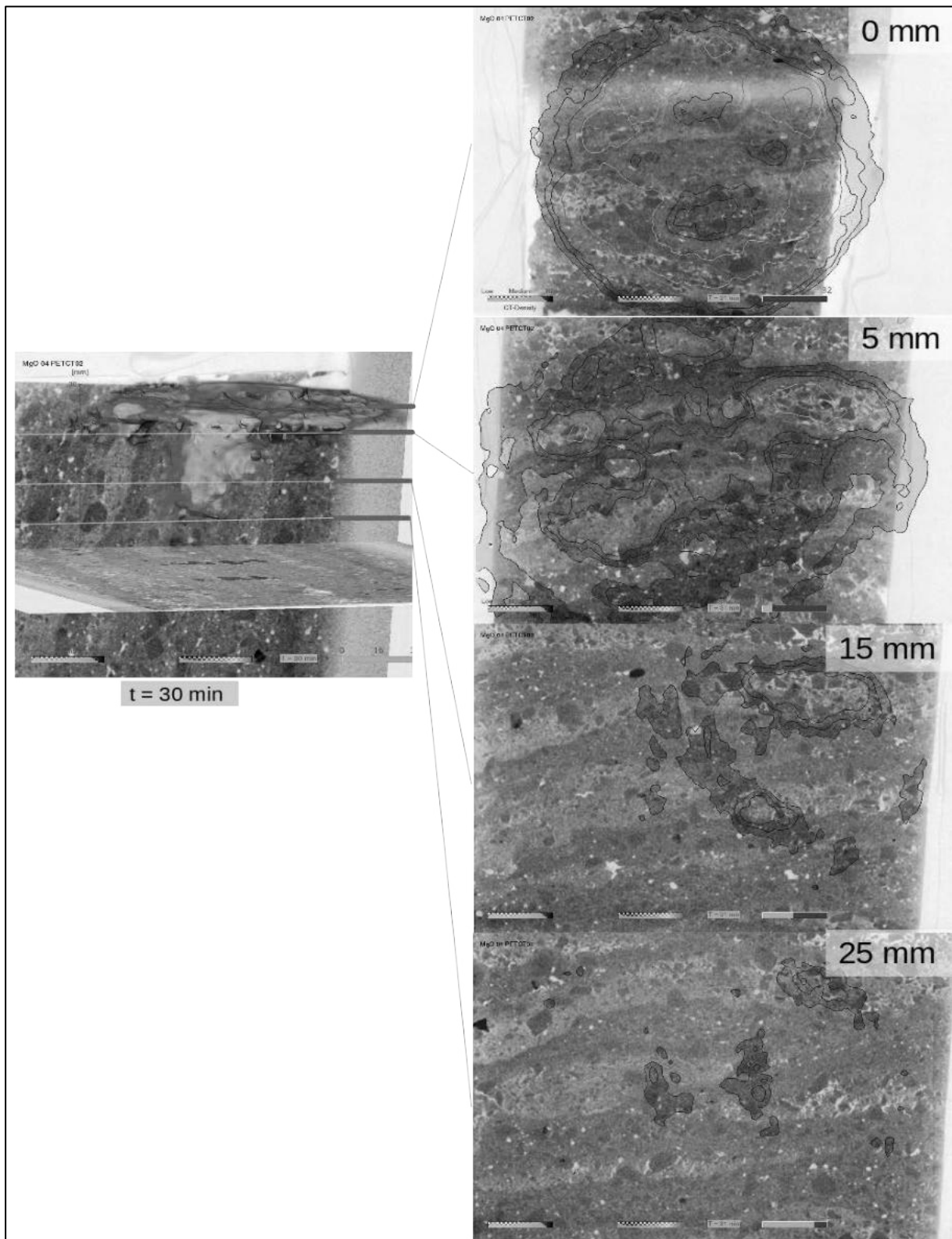


Abbildung 208: Querschnitte der Ebenen 0, 5, 15, 25 mm unterhalb der Oberfläche mit μ CT-Bild (hell: geringe Dichte, dunkel: hohe Dichte) und überlagerter PET-Aktivitätskonzentration, Probe MgO_04. Es ergeben sich drei eng begrenzte Wegsamkeiten mit Querschnitten im Millimeterbereich mit einer Eindringtiefe von etwa 25 mm in den poröseren Zonen.

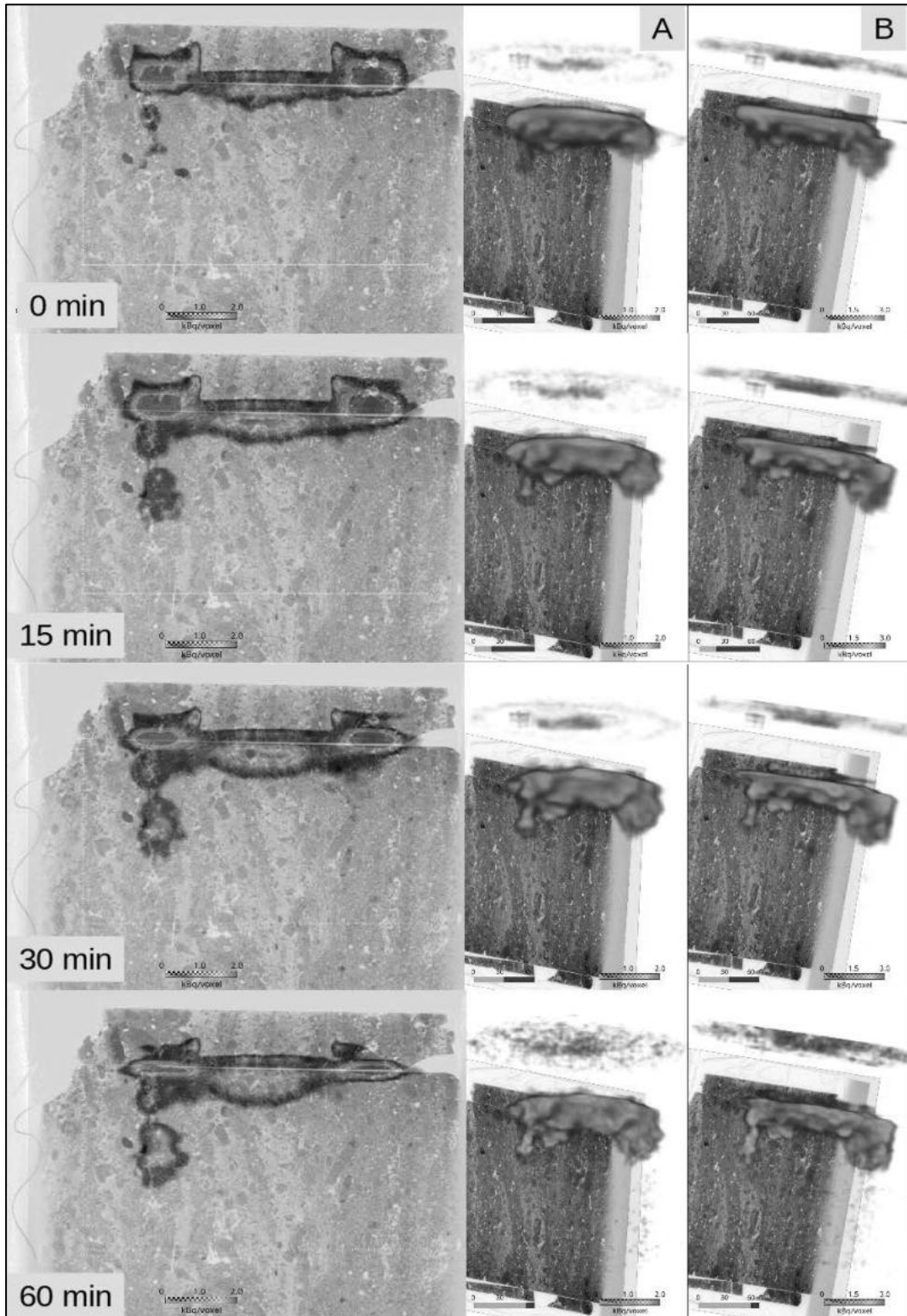


Abbildung 209: PET-Untersuchung an MgO_06 (GSBV3 B21), PET-Frames 0, 15, 30 und 60 min nach Aufbringen der Lösung. Links: Überlagerung der Längsschnitte von μ CT- und PET. Rechts: Volumenrendering der PET-Frames für die initiale und die Wiederholungsmessung; im Hintergrund μ CT-Schnitte.

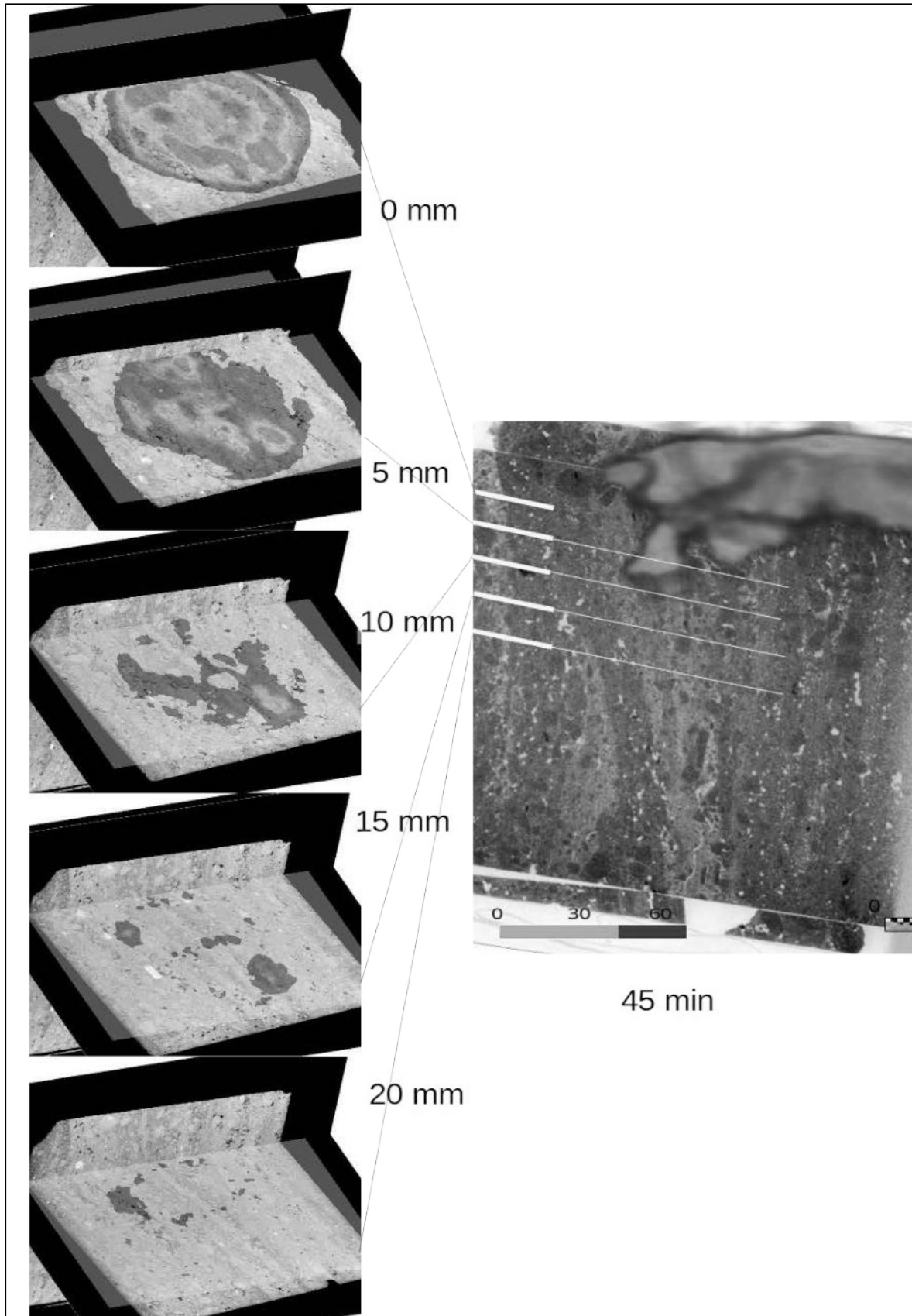


Abbildung 210: Querschnitte der Ebenen 0, 5, 15, 25 mm unterhalb der Oberfläche mit μ CT-Bild (hell: geringe Dichte, dunkel: hohe Dichte) und überlagerter PET-Aktivitätskonzentration, Probe MgO_06. Hier ergeben sich zwei eng begrenzte Wegsamkeiten mit Querschnitten im Millimeterbereich und eine etwas diffusere Ausbreitung bis zu einer Tiefe von ca. 10 mm.

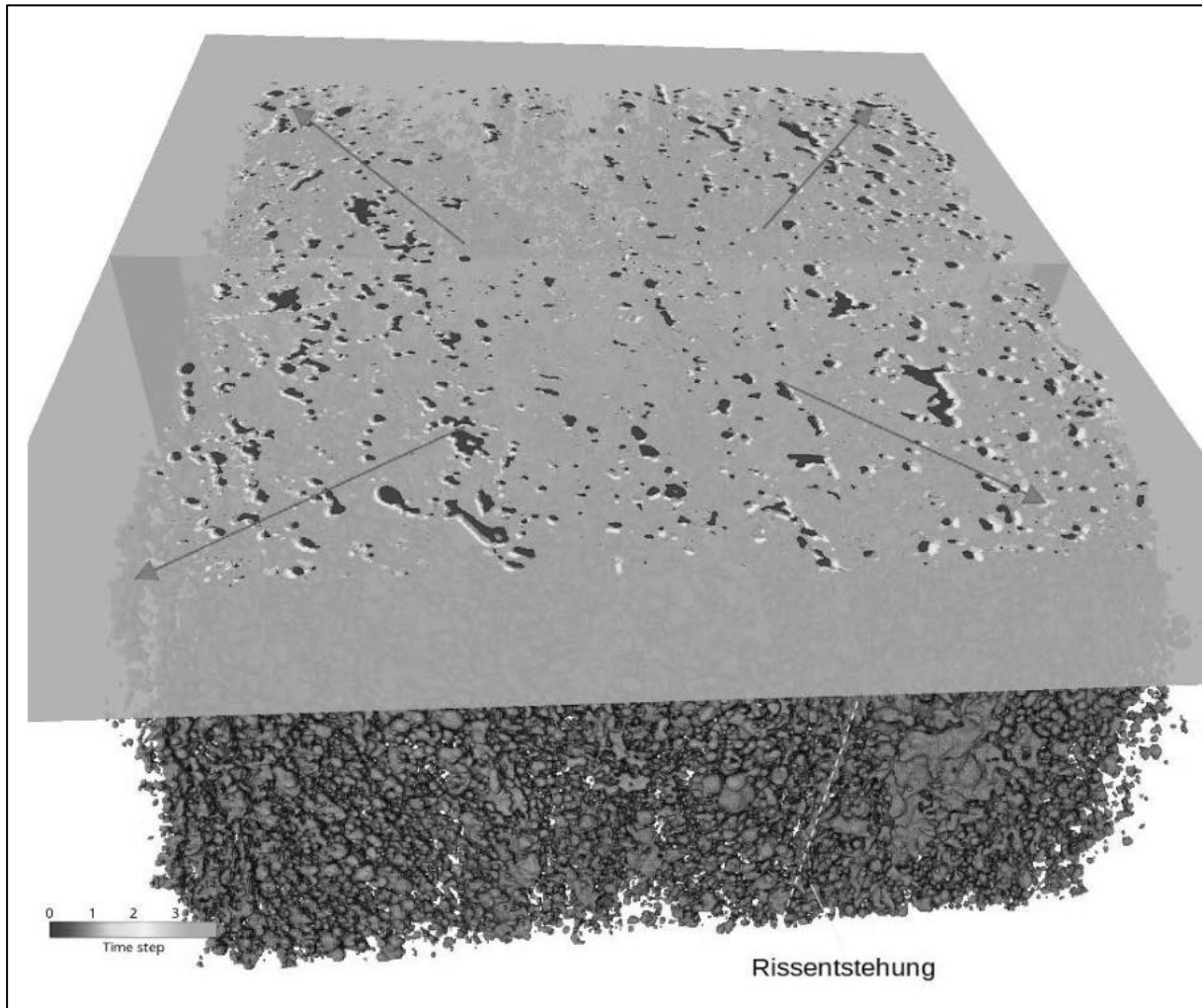


Abbildung 211: Isotrope Verlagerung der Porenstrukturen nach außen durch Expansion der Probe. Volumenrendering der ersten Aufnahme, farbkodierte Folgeaufnahmen in einer horizontalen Schnittebene (bezogen auf die Injektion). Der Riss ist in der ersten Aufnahme nur angedeutet (gelbe Linie).

7.6.4 Schlussfolgerungen aus den PET/CT-Untersuchungen

Die Darstellung der räumlichen Ordnung der Dichte, der segmentierbaren Poren (oberhalb des Auflösungsvermögens der μ CT, Größenordnung 50 μ m, Makroporen) und ihrer Größen zeigen keine auffälligen Unterschiede zwischen den untersuchten Proben aus unterschiedlichen Bereichen von GSBV3 und GSBV4 – allerdings wurde bisher keine vertiefte bildanalytische Untersuchung, z.B. unter Einbeziehung geometrischer Parameter der identifizierbaren Objekte vorgenommen. Innerhalb der einzelnen Proben können gewöhnlich Wechsellagerungen dichter und weniger dichter Zonen identifiziert werden. Der größere Anteil der Poren und die räumlich ausgedehnteren identifizierbaren Poren finden sich erwartungsgemäß in den weniger dichten Bereichen. Dabei bedeutet „weniger dicht“, dass neben den detektierbaren Poren auch unterhalb des Auflösungsvermögens der μ CT erhöhte Porosität im Vergleich zu den dichteren Bereichen vorhanden ist. Nirgends war jedoch oberhalb dieser Auflösungsgrenze eine durchgängige Porenstruktur erkennbar. Die Durchlässigkeit des Materials beruht deshalb maßgeblich auf der Transmissivität feinerer Anteile des Porenspektrums im Mikrometerbereich und darunter (Meso- und Mikroporen), der mit μ CT-Aufnahmen der gesamten Probe nicht

detektierbar ist. In Einzelfällen ist die zu überbrückende Länge mit feineren Poren offenbar kleiner als 60 µm.

Obwohl das räumliche Auflösungsvermögen der PET mehrere Größenordnungen oberhalb dieser feinen Porendimensionen liegt, zeichnet sich das Eindringen des Tracers deutlich erkennbar ab, da es nur auf das Vorhandensein von Traceratomen ankommt, nicht auf die räumliche Auflösung einzelner Poren. Die markierte Lösung wird schnell eingesaugt und bereits nach einer Stunde ist die Tracerverteilung stationär. Es finden sich dabei nur einzelne, lokal begrenzte Transportpfade, die an poröse Zonen gebunden sind.

Die Transportuntersuchungen mussten aus technischen Gründen unter nicht-eingespannten Bedingungen durchgeführt werden. Dies hatte zur Folge, dass die Proben bei Lösungsbeaufschlagung expandierten, ohne dass die Saugwirkung im Laufe der Zeit abnahm. Hierdurch lassen sich zwar keine direkten Schlussfolgerungen auf die Dichtheit unter eingespannten Bedingungen nach längerer Zeit ableiten. Dafür kann die initiale Phase des Eindringens der Lösung gut beobachtet werden. Während dieser Phase von wenigen Stunden lässt sich neben den lokalen Transportwegen keine diffuse Ausbreitung in das gesamte Volumen erkennen. Aufgrund der homogenen Expansion ist aber anzunehmen, dass eine solche Diffusion von Lösung in den gesamten Probenkörper über einen längeren Zeitraum stattfindet. Wegen der begrenzten Lebensdauer des Tracers ließ sich diese aber nicht darstellen.

Während der Laufzeit des Projekts wurden Kunststoff-Druckbehälter entwickelt, die zukünftig PET- und CT-Beobachtungen an einer Probe unter einem äußeren Druck erlauben. Somit kann zukünftig auch der Transport der Flüssigkeit in eingespanntem Zustand der Probe bei einer zunehmend impermeablen Probe beobachtet werden. Hiermit sind Langzeituntersuchungen über Monate und Jahre mit längerlebigerem Tracer möglich. Somit kann gegebenenfalls beobachtet werden, wie sich der Tracer längerfristig diffusiv in der gesamten Probe ausbreitet.

7.7 Materialcharakterisierung durch Ultraschall

7.7.1 Mess- und Auswerteverfahren

Zum Einsatz kommt das **Ultraschall-Echo-Prüfverfahren**, das bereits im Kapitel über die Messungen mit dem LAUS-Messsystem (Abschnitt 5.1.5) beschrieben wurde.

Für die Untersuchungen des Spritzbetons in den Kästen wurde das kommerziell verfügbare Messgerät der Firma Acoustic Control Systems (ACS) mit der Gerätebezeichnung A 1040 **MIRA** (im Folgenden kurz MIRA) eingesetzt (Abbildung 212 und Abbildung 213). Es handelt sich dabei um ein Linear-Arraysystem, mit einem festen Abstand von 3 cm zwischen den Prüfkopfbänken und jeweils vier fest gekoppelten Einzelprüfköpfen je Bank.

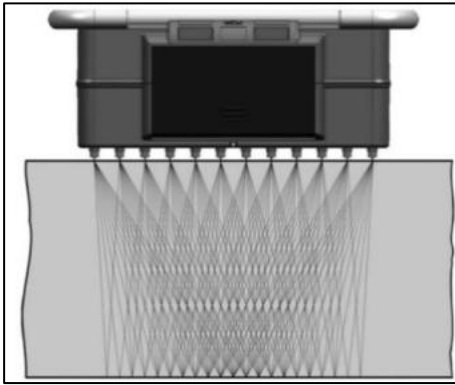


Abbildung 212: Schematische Darstellung des verwendeten MIRA-Messsystem (Typ A 1040)



Abbildung 213: MIRA-System Bedienfeld und Bildschirm (links) und Transversalwellen-Prüfköpfen (rechts)

Das MIRA-System arbeitet mit Transversalwellen-Prüfköpfen und ist Stand der Technik bei Bauwerksuntersuchungen (z. B. Dickenbestimmung von Elementen, Spannkanallokalisierung). Bei den Messungen wurde eine Messfrequenz von 50 kHz eingestellt.

Die Daten wurden mithilfe des SAFT („Synthetic Aperture Focusing Technique“) -Verfahrens, welches bereits im Kapitel 5.1.5 über die Ultraschall-LAUS-Messungen beschrieben wurde, ausgewertet. Hier wurde es analog angewandt und für das MIRA-System angepasst.

7.7.2 Messungen und Ergebnisse

7.7.2.1 Messungen am GSBV1 mit dem MIRA-System

MIRA-Ultraschall-Messungen wurden im Juni 2020 auf einer ungefähr 0,5 m x 1 m großen Messfläche am Spritzbetonversuch-Kasten des GSBV1 in der Grube Teutschenthal durchgeführt (Abbildung: 214 und Abbildung: 215). Das Ziel dieser Messungen war es, die Machbarkeit und Genauigkeit von Ultraschall-Messverfahren mit dem MIRA-System für die Qualitätssicherung von Spritzbetonbauwerken zu testen und zu verifizieren.

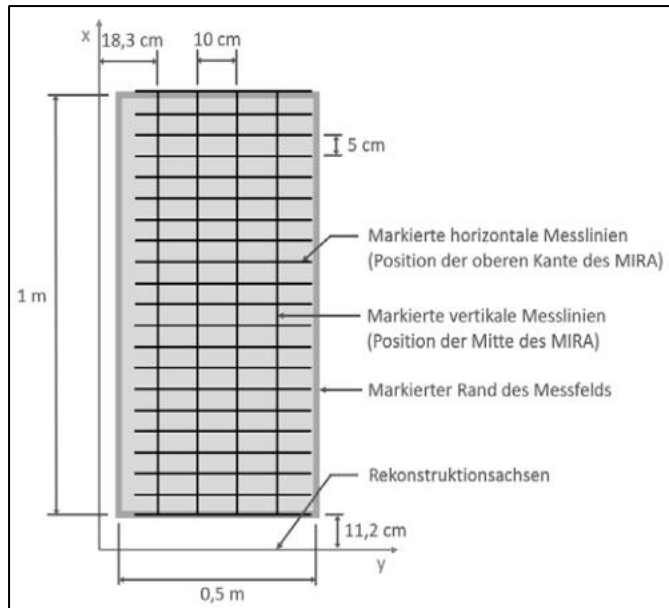


Abbildung: 214: Messschema beim GSBV1



Abbildung: 215: Messung mit dem MIRA-Gerät beim GSBV1

Bei der MIRA-Messserie wurde die lange Achse des MIRA-Systems horizontal ausgerichtet (siehe Abbildung: 215). Es wurde ein Messraster aus vier vertikalen Linien (horizontaler Abstand jeweils 10 cm) und 21 horizontalen Linien (vertikaler Abstand jeweils 5 cm) genutzt, wobei die Messungen entlang der horizontalen Messlinien stattfanden. Für jede einzelne Messung wurde das MIRA-System so positioniert, dass die Oberkante des Geräts direkt auf der entsprechenden horizontalen Messlinie positioniert war und gleichzeitig das Gerät über der entsprechenden vertikalen Messlinie zentriert war (Abbildung: 214).

Die Ergebnisse der Messserie sind in Abbildung 216 dargestellt. Die z-Achse zeigt in das Bauwerk hinein (Messoberfläche bei $z = 0$ m). Die x-Achse läuft vertikal von unten nach oben, $x = 0$ m entspricht der Unterkante des MIRA-System bei der untersten Arrayposition (d.h. 11,2 cm unter der untersten horizontalen Linie in der Abbildung: 214, links). Durch den Öffnungswinkel der Schallausbreitung werden auch Echos oberhalb und unterhalb der Messanordnung empfangen. Daher geht die x-Achse über den vom Messkopfarray überdeckten Bereich hinaus. Allerdings ist am Rand mit Verzerrungen des Reflektorbildes zu rechnen. Die y-Achse läuft horizontal nach rechts, $y = 0$ m entspricht der linken Kante des MIRA bei der am weitesten links durchgeführten Messung. Dies entspricht einer Linie 18,3 cm links von der am weitesten links liegenden markierten Messlinie in der Abbildung: 214.

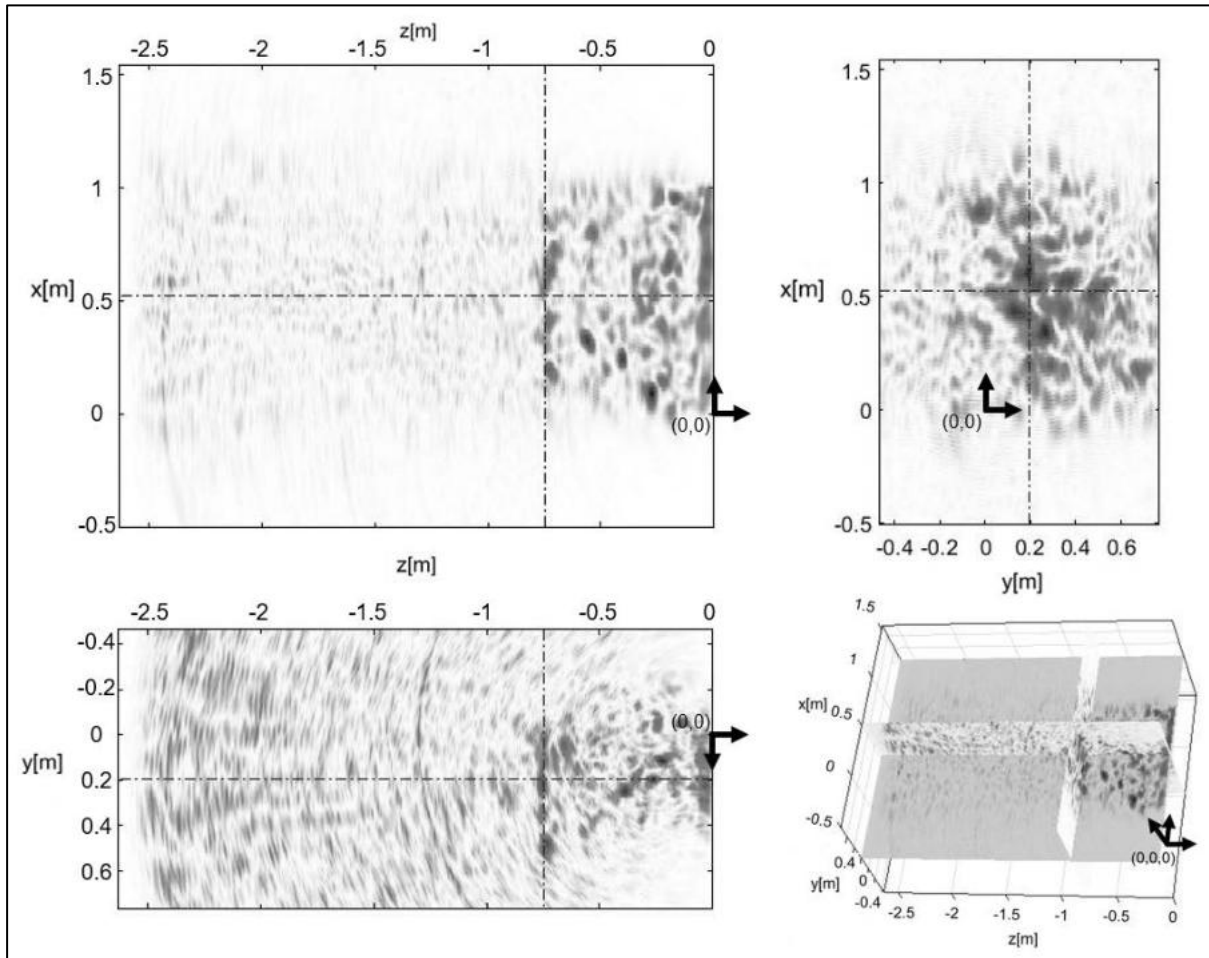


Abbildung 216: 3D-Rekonstruktion der MIRA-Messergebnisse für die Messfläche am GSBV1. Der Schnitt oben rechts liegt parallel zur Messfläche in $z = -0,75$ m Tiefe.

Da der Spritzbeton im GSBV1 nur ungefähr 1 m tief ist, werden hier nur Reflektoren in dem Bereich von $z < 1$ m diskutiert. Besonders starke Reflektoren sind im Bereich $z = -0,75$ m sichtbar. Klare, sequenzielle Reflexionen aus den zahlreichen Spritzbeton-Schichten wie in den Testmessungen von 2018 sind in den Rekonstruktionen nicht sichtbar. Somit gibt es keine Hinweise auf signifikante Ablösungen zwischen den einzelnen Spritzbetonschichten.

7.7.2.2 Messungen am GSBV3 mit dem MIRA-System

Die Ultraschall-Messungen am 26.11.2020 wurden analog zur Messung am GSBV1 vorgenommen. Oberhalb des Messfeldes für die Ultraschall-Messungen waren Thermoelemente eingebaut. Analog zu den Messungen am GSBV1 wurden auf dem Raster aus 4 Linien in vertikaler Richtung mit einem Abstand von 10 cm und 21 Linien in horizontaler Richtung in einem Abstand von 5 cm gemessen (Abbildung 217). In diesem Fall befand sich das MIRA-Messsystem mittig über den horizontalen Linien (siehe Abbildung 217 rechts).

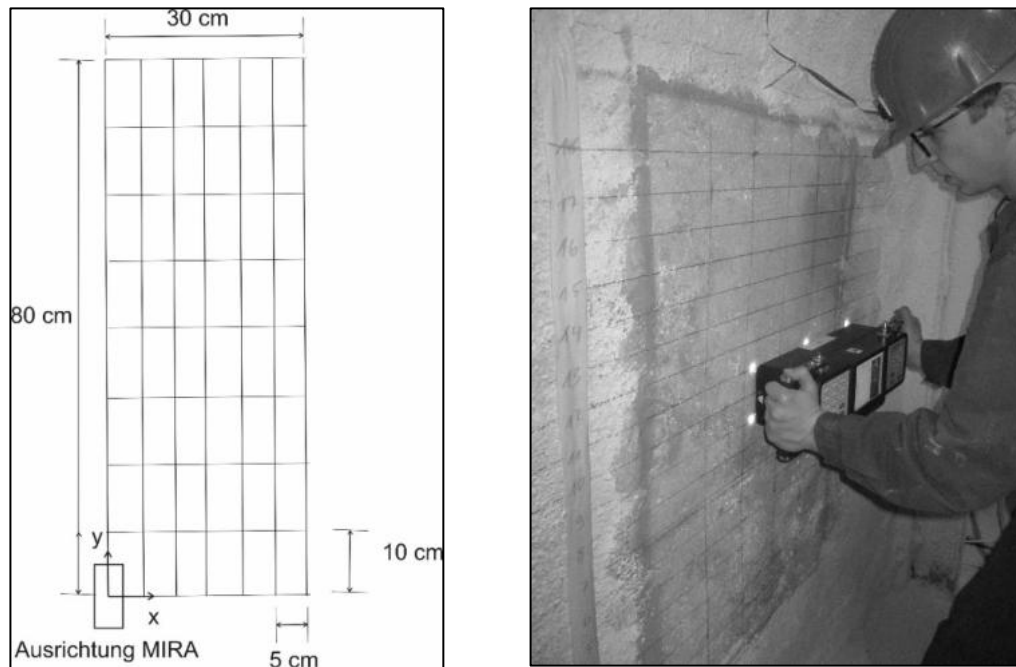


Abbildung 217: Ultraschall-Messfeld des GSBV3, links: Skizze mit vertikaler Ausrichtung des MIRA-Messsystems, rechts: MIRA-Messung in horizontaler Ausrichtung, Ultraschall-Messfeld rot umrandet.

In Abbildung 217 rechts ist das Ultraschall-Messfeld rot umrandet. Das Rekonstruktionsfeld erfasst ebenfalls Signale von Reflektoren, die über das Messfeld und auch die Außenkanten des Messgerätes reichen.

Die Ergebnisse der vertikalen Messkonfiguration sind in Abbildung 218 dargestellt. Deutliche Reflektoren sind zu sehen und durch farbliche Ellipsen markiert.

Die x-z-Ebene in Abbildung 218 links zeigt deutliche Reflektoren bei $z = -0,3$ m (braun) und bei $z = -0,7$ m (rot). Ebenfalls ist ein Reflektor bei $z = -1,1$ m sichtbar (orange). Dagegen zeigt die Darstellung der y-z-Ebene in Abbildung 218 rechts unten die oberflächennahen Reflektoren bei $z = -0,1$ m und $z = -0,2$ m deutlich (hellblau), während die Reflektoren bei $z = -0,7$ m (rot) und $z = -1,1$ m (orange) schwächer erkennbar sind. Der Reflektor bei $z = -0,5$ m (gelb) ist im Rekonstruktionsmodus gut abgrenzbar.

Weiterführende Auswertungen z. B. mit einer Phasenauswertung liefern Anhaltspunkte über die Ursache der Reflexionen und werden im separaten Teil-Endbericht der BAM [2] über die Ultraschall-Messungen des MgO-S³-Projekts diskutiert .

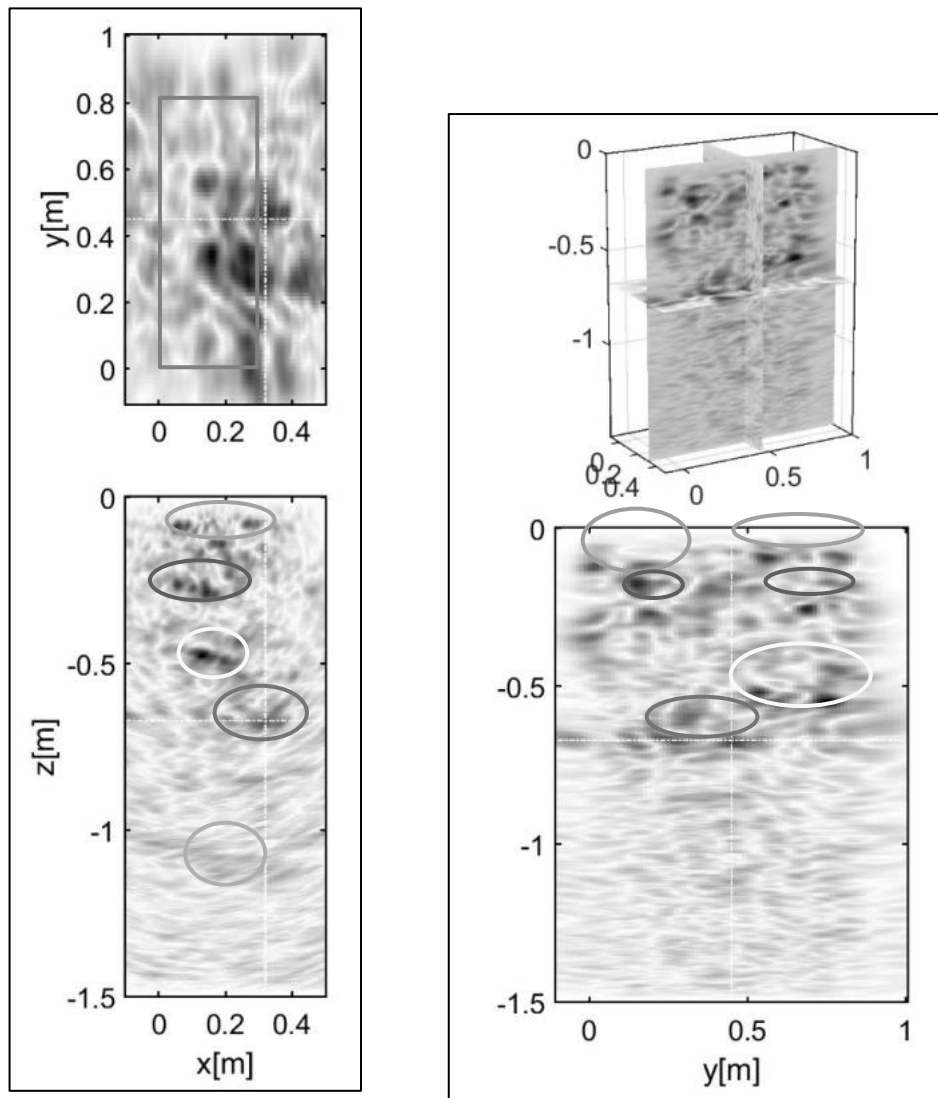


Abbildung 218: 3D-Darstellung der SAFT-Rekonstruktion der MIRA-Messungen bei vertikaler Ausrichtung des Gerätes mit 3D-Volumen (oben rechts), oberflächenparalleler Tiefenschnitt (oben links, Projektion des Messfeldes rot eingezeichnet) bei $z = -0,3$ m, Vertikalschnitten (xz unten links und yz unten rechts).

7.7.2.3 Messungen am GSBV4 mit dem MIRA-System

Am 18.10.2021 wurden MIRA-Messungen an dem Spritzbetonversuch GSBV4 durchgeführt. Hierbei sollte auch geprüft werden, inwieweit planmäßig eingebaute Teile/„Störkörper“ detektiert werden können. Dies wurde als so genannter „Blindversuch“ durchgeführt. Die TU Bergakademie Freiberg hatte dazu Störkörper mit verschiedener Dichte (und somit verschiedener Ultraschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit) in den Spritzbeton eingespritzt und die Lage der Störkörper aufgemessen. Die Lokationen der eingebauten Störkörper waren bei den MIRA-Messungen nicht bekannt.

Durch die TUBAF wurden in 3 Tiefenebenen jeweils 4 Störkörper eingebaut. Die Ebene 1 war in 0,8 m Tiefe zwischen Schicht 1 und Schicht 2. Die Ebene 2 war in 0,48 m Tiefe zwischen Schicht 3 und Schicht 4. Die Ebene 3 war in 0,32 m Tiefe zwischen Schicht 4 und Schicht 5. In Abbildung 219 ist beispielhaft die Anordnung der Störkörper in der Ebene 1 dargestellt. Je

Ebene wurden ein Block aus Polystyrol ($\rho = 0,2 \text{ g/cm}^3$), aus Fermacell ($\rho = 1,3 \text{ g/cm}^3$) und ein luffertfüllter Kunststoffkasten eingebracht. Diese hatten jeweils Abmessungen (B x H x T) von 8 cm x 8 cm x 3 cm. Außerdem wurde eine Nut bzw. ein Riss mit einer Länge von ca. 10 cm und einer Öffnungsweite von 1 cm eingearbeitet. Die Störkörper wurden so positioniert, dass sich diese nicht überlagerten. In Abbildung 220 ist die Frontansicht des GSBV4 mit allen Störkörpern in den 3 verschiedenen Ebenen dargestellt. Die Störkörper waren nur in dem oberen Teil des BAM-Messfeldes eingebaut, sodass auch ein ungestörter Spritzbetonkörper mit Ultraschall untersucht werden konnte. In Abbildung 221 sind die Störkörper in der Ebene 1 in 80 cm Tiefe mit den eingemessenen Positionen dargestellt. In Abbildung 222 sind die Störkörper in der Ebene 2 in 48 cm Tiefe dargestellt. In Abbildung 223 sind die Störkörper in der Ebene 3 in 32 cm Tiefe dargestellt.

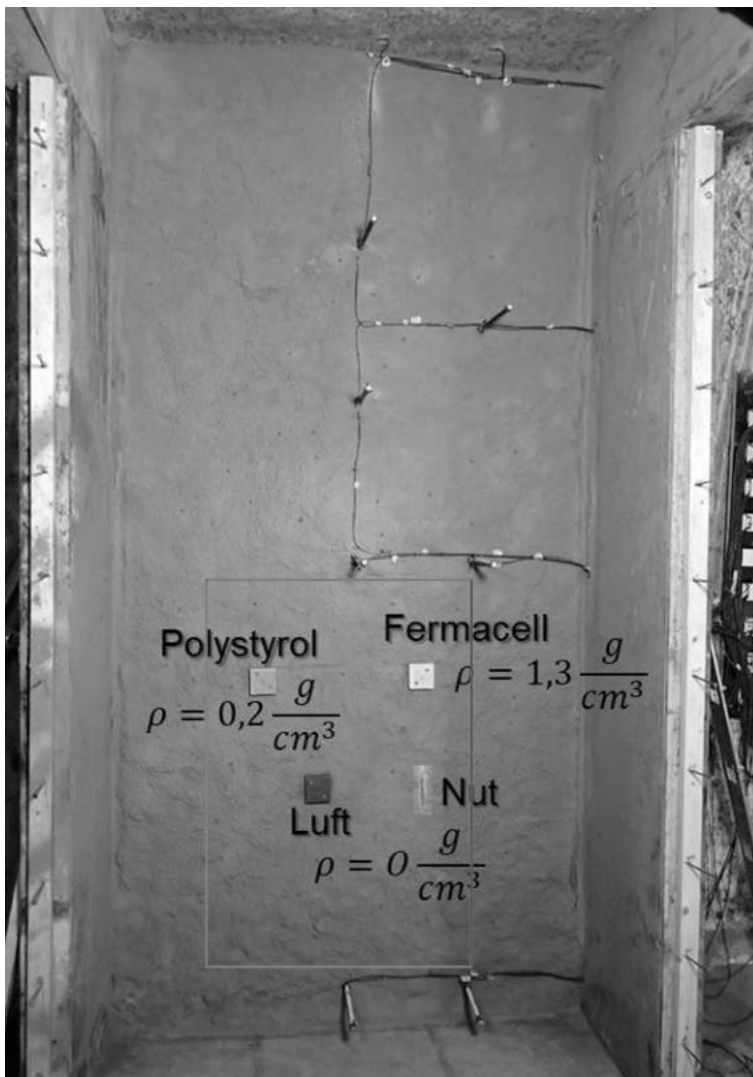


Abbildung 219: GSBV4 mit eingebauten Störkörpern in Ebene 1 (zwischen Schicht 1 und Schicht 2) in 0,8 m Tiefe; roter Rahmen entspricht dem BAM-Messfeld

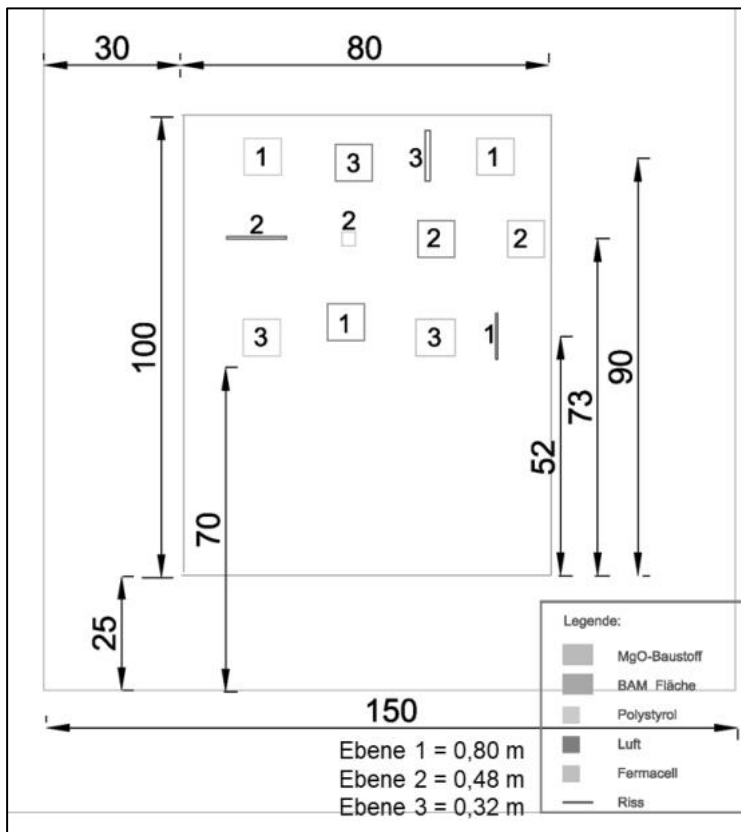


Abbildung 220: Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit allen eingebauten Störkörpern in den 3 Ebenen

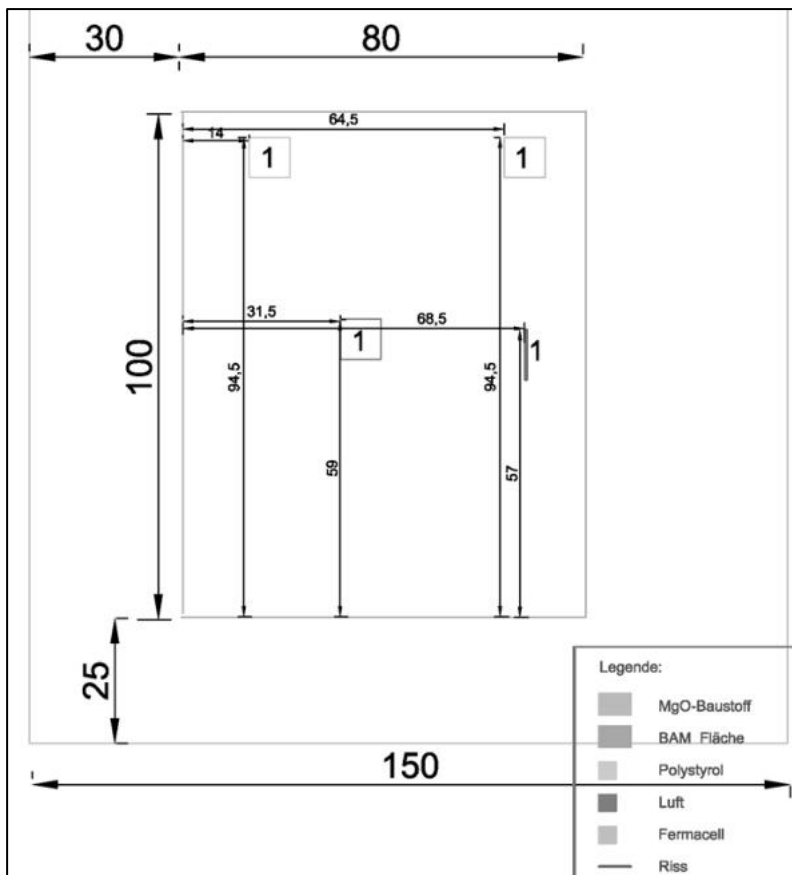


Abbildung 221: Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit den eingebauten Störkörpern in Ebene 1 in 80 cm Tiefe

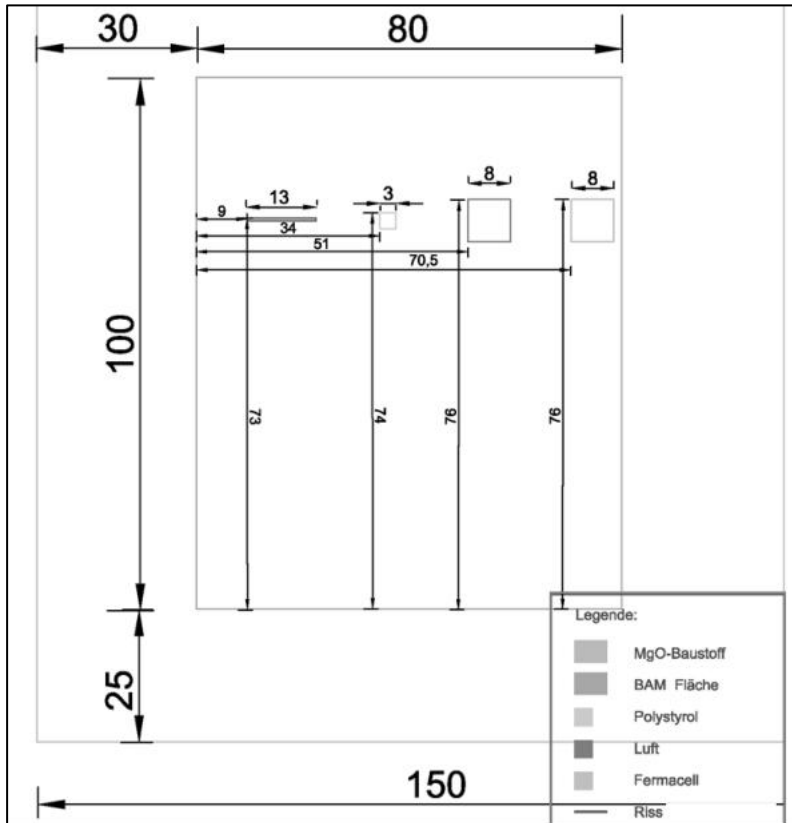


Abbildung 222: Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit den eingebauten Störkörpern in Ebene 2 in 48 cm Tiefe



Abbildung 223: Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit den eingebauten Störkörpern in Ebene 3 in 32 cm Tiefe

Auch bei diesem Versuch wurde in zwei Messanordnungen gemessen, horizontal und vertikal. Nachfolgend wird die horizontale Messausrichtung vorgestellt, bei der die Ultraschall-Wellen vertikal polarisiert sind. Weiterführende Ergebnisse werden in dem separaten Teil des BAM-Endberichtes [2] diskutiert.

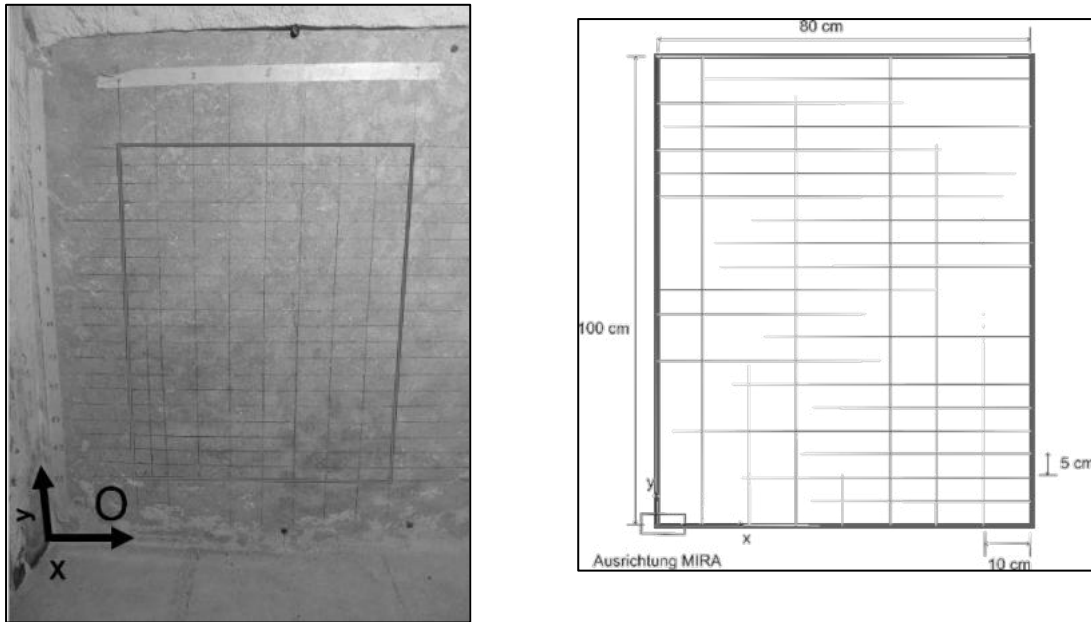


Abbildung 224: links: Messfeld des GSBV4, rechts: Ausrichtung des MIRA-Messgerätes horizontal

Wie in Abbildung 224 zu sehen ist, wurden 21 horizontale Messlinien in einem Abstand von 5 cm und 9 vertikale Messlinien mit einem Abstand von 10 cm angezeichnet. Der Koordinatenursprung liegt am unteren linken Rand (Abbildung 224 links), die untere linke Ecke der Messfläche (rot) liegt bei $x = 30$ cm und $y = 25$ cm.

Die SAFT-Rekonstruktionen für die MIRA-Messungen in horizontaler Richtung sind für den Tiefen-Schnitt in $z = -0,63$ m in Abbildung 225 dargestellt. In dieser Ebene ist ein Reflektor mit hoher Intensität erkennbar. Wenn darauf normiert wird, zeigen sich weitere Reflektoren mit einer geringeren Intensität in der Abbildung. Daher müssen bei der Auswertung die einzelnen Tiefenschnitte getrennt beurteilt werden. Hierfür sei auf den separaten Endbericht der BAM [2] hingewiesen.

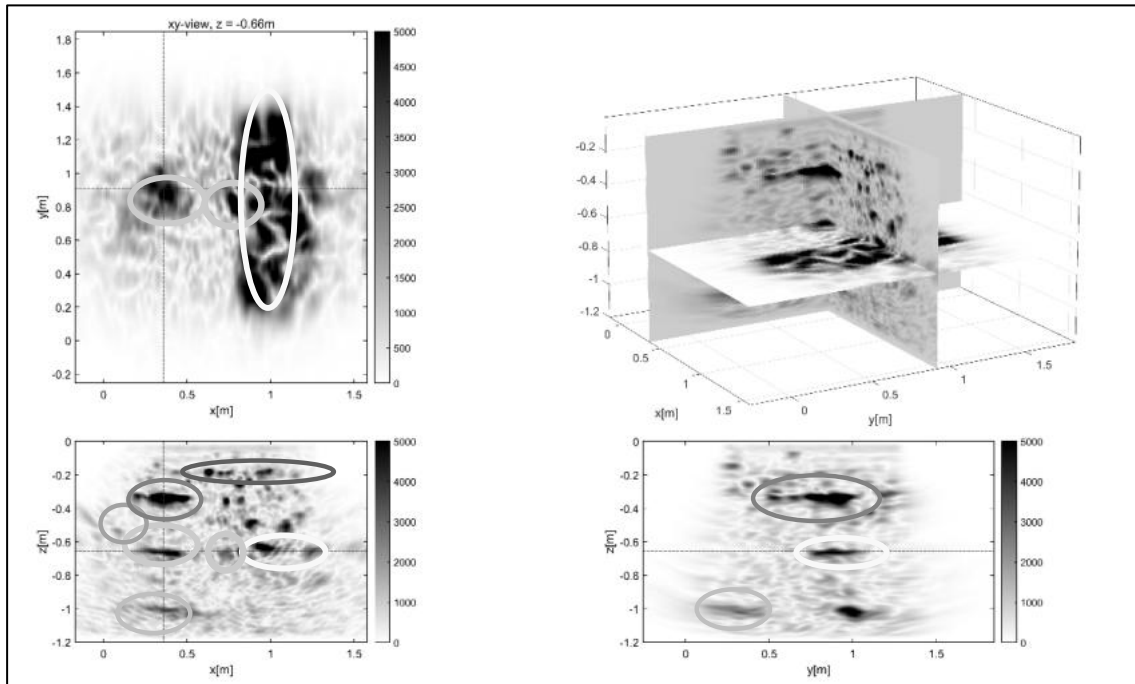


Abbildung 225: Rekonstruktion der Ultraschall-MIRA-Messungen bei $z=-0,63$ m, $x=0,45$ m, $y=0,98$ m.

In der horizontalen Ausrichtung konnten die in Tabelle 84 aufgeführten Reflektoren bestimmt werden.

Tabelle 84: Koordinaten der rekonstruierten Reflektoren bei horizontaler Messrichtung

Detektierte Reflektoren			Position der eingebauten Störkörper		
Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]
-0,18	0,73...0,77	1,12...1,19	-0,32	0,33...0,41	0,86...0,94
-0,19	0,3...0,35	0,78...0,89	-0,32	0,525...0,605	0,87...0,97
-0,19	0,6...0,64	0,84...0,95	-0,32	0,13...0,21	0,48...0,56
-0,33	0,22...0,47	0,7...0,98	-0,32	0,505...0,585	0,48...0,56
-0,34	0,58...0,61	0,95...1,0	-0,48	0,09...0,22	0,72...0,73
-0,34	1,03...1,07	1,01...1,06	-0,48	0,34...0,37	0,71...0,74
-0,5	0,28...0,34	0,7...0,88	-0,48	0,51...0,59	0,68...0,76
-0,5	1,04...1,13	0,90...0,98	-0,48	0,705...0,785	0,68...0,76
-0,63	0,77...1,19	0,18...1,29	-0,80	0,14...0,22	0,865...0,945
-0,66	0,66...0,72	0,65...0,74	-0,80	0,645...0,725	0,865...0,945
-1,0	0,23...0,42	0,93...1,03	-0,80	0,315...0,395	0,51...0,59
			-0,80	0,685...0,694	0,47...0,57

Die Materialien an den Reflektoren konnten nicht unterschieden werden. Hierfür müssten noch gesonderte Phasenauswertungen vorgenommen werden, damit zumindest die Unterscheidung in schallweich und schallhart vorgenommen werden kann. Die farblich unterlegten Werte stellen mit einer Messgenauigkeit von etwa ± 2 cm die Koordinaten der von der TUBF eingebauten Störkörper dar.

Weitere Schnitte aus dem rekonstruierten 3D Volumen sind beispielhaft in Abbildung 226 dargestellt. Nach der ersten Auswertung wurden die Positionen von der TUBAF der eingebauten

Störkörper an die BAM übergeben. Die tatsächlichen Störkörperpositionen sind zum leichteren Vergleich überlagert dargestellt. Dafür wird jeweils der nächstliegende Schnitt an den gezeigten Positionen genutzt. Die Farbkodierung für die verschiedenen Materialien wurde äquivalent übernommen. In den Tiefen- und Vertikalschnitten zeigt sich, dass zwar einige Reflektoren den eingebauten Störkörpern zugeordnet werden konnten (z. B. bei $x = 0,85$ m und $y = 0,75$ m im Tiefenschnitt oben links in Abbildung 225), dass aber zusätzlich weitere Reflektoren detektiert wurden. Dies erschwert die eindeutige Interpretation.

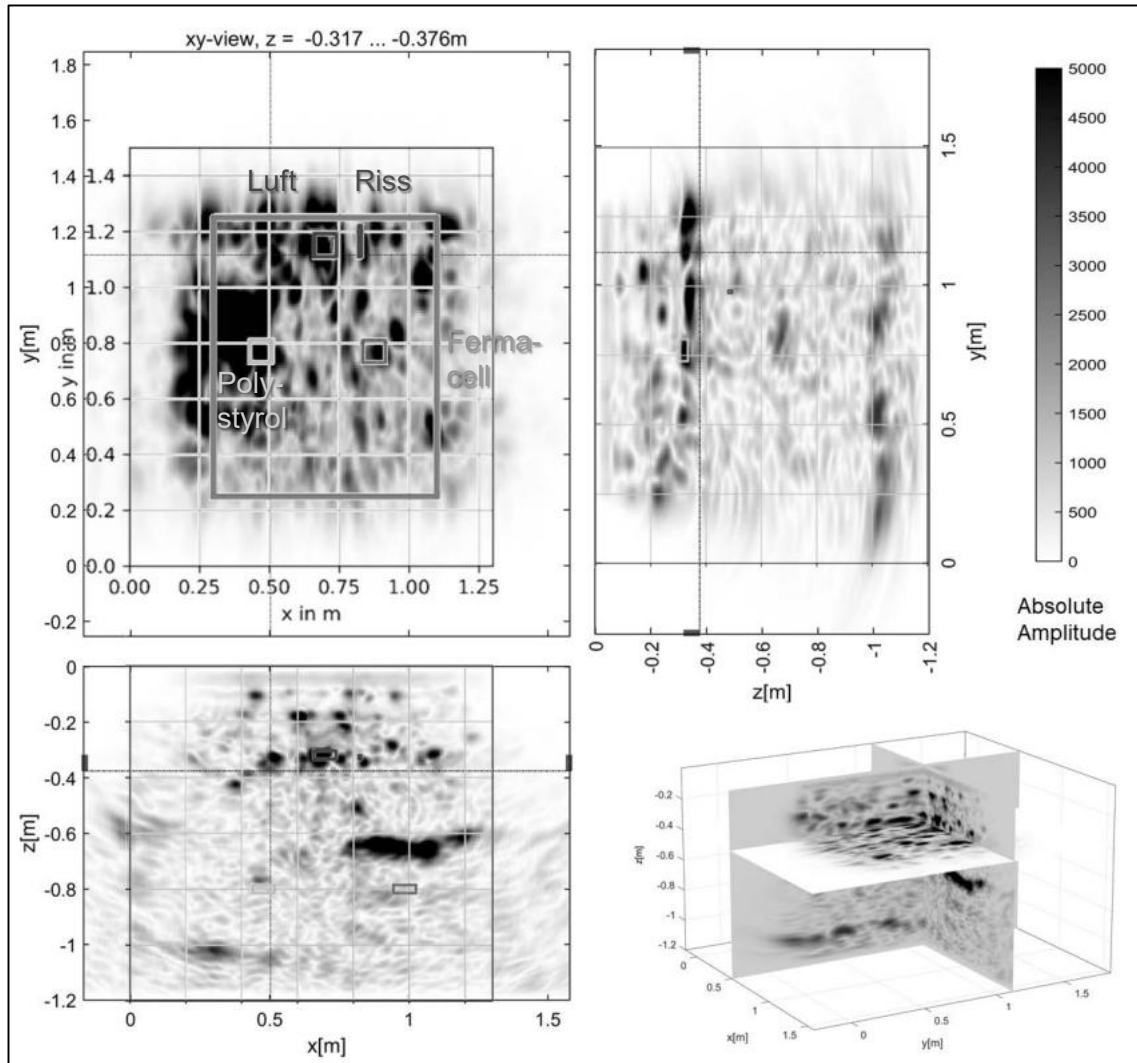


Abbildung 226: Die Rekonstruktion der Ultraschalldaten mit den Lokationen der eingebauten Störkörper überlagert. Die Ultraschall-Messfläche ist im Tiefenschnitt (oben links) rot markiert.

Vor allem wurde ein starker, großflächiger Reflektor bei $x = 0,7 \dots 1,1$ m und $z = -0,63$ m detektiert (Abbildung 225 oben links, gelbe Ellipsen). Durch nachträglich abgeteufte Bohrlöcher konnte eine entsprechende (ungeplante) Fehlstelle in Form einer Ablösung / Auflockerung des Materials als Ursache identifiziert werden. Darunter sind planmäßig eingebaute Fehlstellen in einer größeren Tiefe durch das Ultraschallmesssystem methodisch aufgrund der Signalabschattung nicht nachweisbar.

Insgesamt zeigt sich, dass am GSBV4 deutlich Reflektoren in den Ultraschall-Messungen zu erkennen sind. Für eine genauere Untersuchung der Materialbeschaffenheit beziehungsweise Trennung der verschiedenen Typen an Einbauteilen wäre zukünftig eine Phasenauswertung

notwendig, durch die sich eine Trennung in „schallweiche“ oder „schallharte“ Einbauteile vornehmen lässt. Großflächige Störstellen sind klar nachweisbar, die Übereinstimmung zwischen detektierten und eingebauten Probekörpern (8 cm x 8 cm x 3 cm) ist praktisch nicht vorhanden und bedarf aber weiterer Forschung. Mögliche Ursachen für die noch unzureichende Detektion bei kleineren Einbauteilen sind möglicherweise Geschwindigkeitsvariationen, die durch mögliche inhomogene Materialparameter des Spritzbetons verursacht werden und mit den hier angewendeten Standard-Auswerteverfahren nicht adäquat abgebildet werden können.

Abgleich der Ultraschallbefunde der BAM durch Bohrungen am GSBV4

Um den Befund der Ultraschalluntersuchung zu verifizieren, wurden am GSBV4 Kernbohrungen im Bereich des Ultraschallmessfeldes gestoßen. Es wurden insgesamt 3 Bohrungen von der Vorderseite des Bauwerks aus in Spritzrichtung bis in den Salzstoß ausgeführt. Die Anordnung der Bohrungen ist in Abbildung 227 gezeigt. Die Bohransatzpunkte sind so gewählt, dass die Bohrungen durch die Bereiche verlaufen, in denen besonders auffällige Ultraschallreflektoren festgestellt wurden.

Mit den Bohrungen B33 und B34 sollte die Ursache für den großflächigen Ultraschallreflektor im Bereich zwischen 59...70 cm Bauwerkstiefe (Schnitt A-A in Abbildung 227) festgestellt werden [51]. Im Schnitt A-A (Koordinaten xy) sind die Reflektoren in einer Tiefe von 67 cm ($z = -0,67$ m), einem sogenannten Tiefschnitt, dargestellt. Weitere Untersuchungen und Diskussionen der Ultraschallergebnisse sind im entsprechenden Bericht der BAM [2] enthalten.

Mit der Bohrung B35 sollten mehrere Bereiche im Beton geprüft werden, bei denen hintereinander liegende Ultraschallreflexe aufgetreten waren, bei 33 cm und bei 66 cm Tiefe (s. Schnitt B-B in Abbildung 227). Der Schnitt B-B zeigt Ultraschallreflektoren in 63 cm Höhe in der Ansicht von unten, wobei $z = 0$ m die Luftseite des Bauwerkes kennzeichnet und sich bei ca. $z = -1$ m der Übergang zwischen Beton zum Gebirge befindet. Nach späterer verbesserter Ultraschallauswertung wurde im Bereich der B35 bei ca. 33 cm Tiefe ein auffälliger Ultraschallreflex festgestellt, die tieferliegenden Reflektoren sind in der dann gewählten Darstellung weniger prägnant.

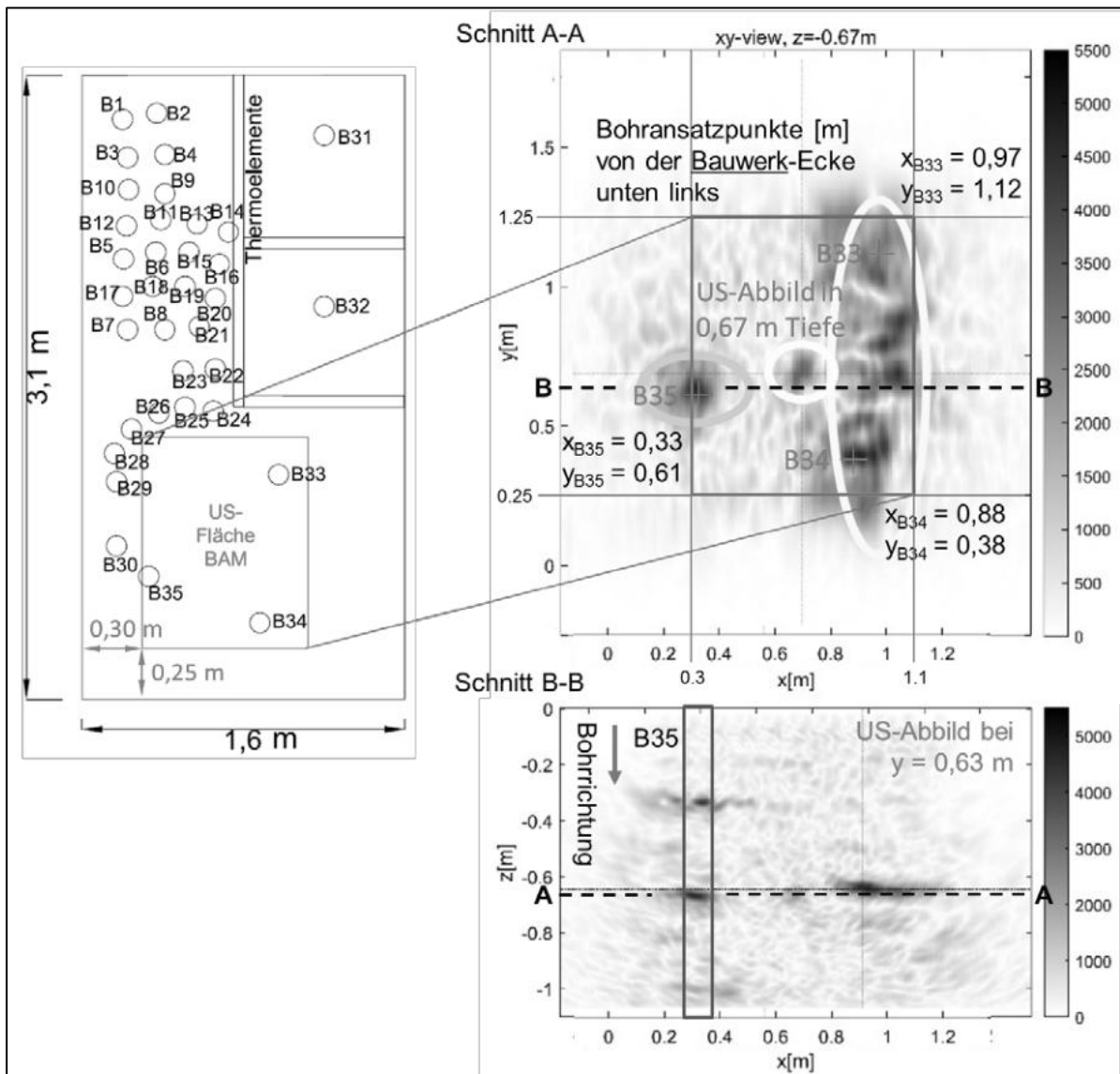


Abbildung 227: Lage der Bohrungen im Messfeld der BAM am GSBV4 mit initialer Ultraschallauswertung

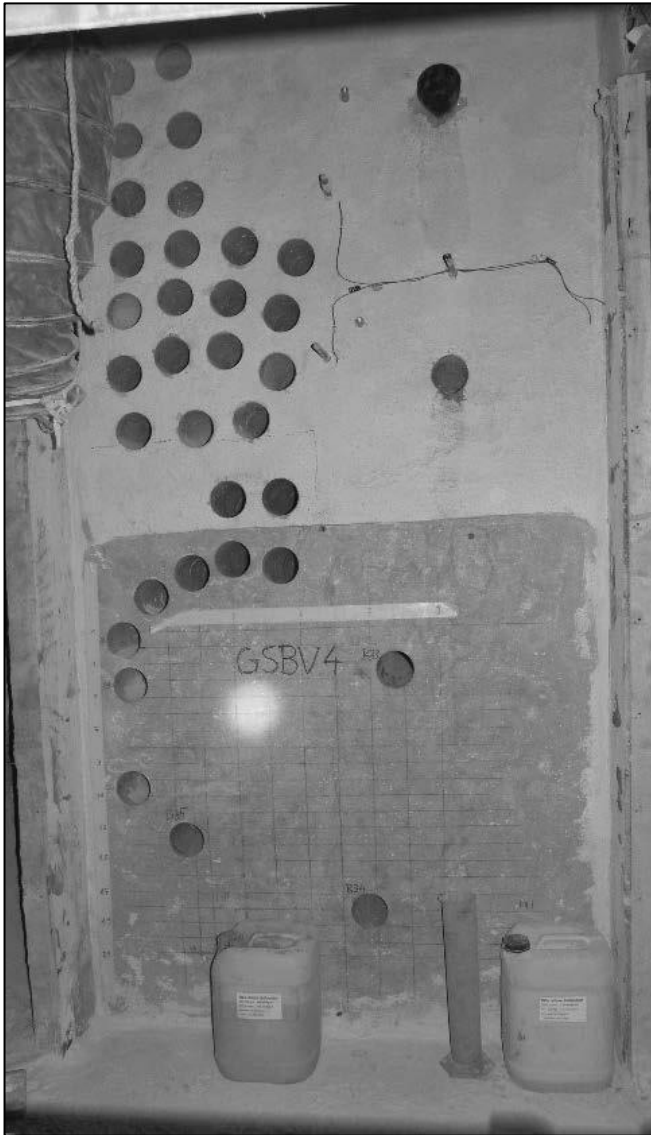


Abbildung 228: Versuchsbauwerk GSBV4 mit den Bohrungen im BAM-Messfeld



Abbildung 229: Kernmarsche der Bohrungen B33, B34, B35 am GSBV4

Die Kernbohrungen mit einem Durchmesser von 107 mm wurden am 01.02. und 02.02.2022 ausgeführt, 4 Monate nach dem Spritzen des GSBV4 und 3,5 Monate nachdem die Ultraschallmessungen durchgeführt wurden. Die am Kernmaterial sichtbaren Fehlstellen sind in den Tabellen in Anlage 6 aufgelistet. Dabei wurde eine Einteilung nach der sichtbaren Größe der Inhomogenität vorgenommen. Außerdem erfolgte eine Kamerabefahrung der Bohrlöcher, 2 Wochen nachdem die Bohrungen gestoßen wurden. Fehlstellen waren in der Regel in Bereichen mit auffällig heller Struktur senkrecht zur Spritz- und Bohrrichtung anzutreffen. Meistens wiesen die Fehlstellen in der Mitte des hellen Bereiches einen kleinen Spalt auf. Die Spaltweite lag meistens bei ca. 1 mm, oftmals auch < 1 mm, selten > 1 mm. Manche Fehlstellen waren nur teilweise geöffnet. Die an der Mantelfläche sichtbare Länge der Fehlstellen lag zwischen 1 cm und 6 cm.

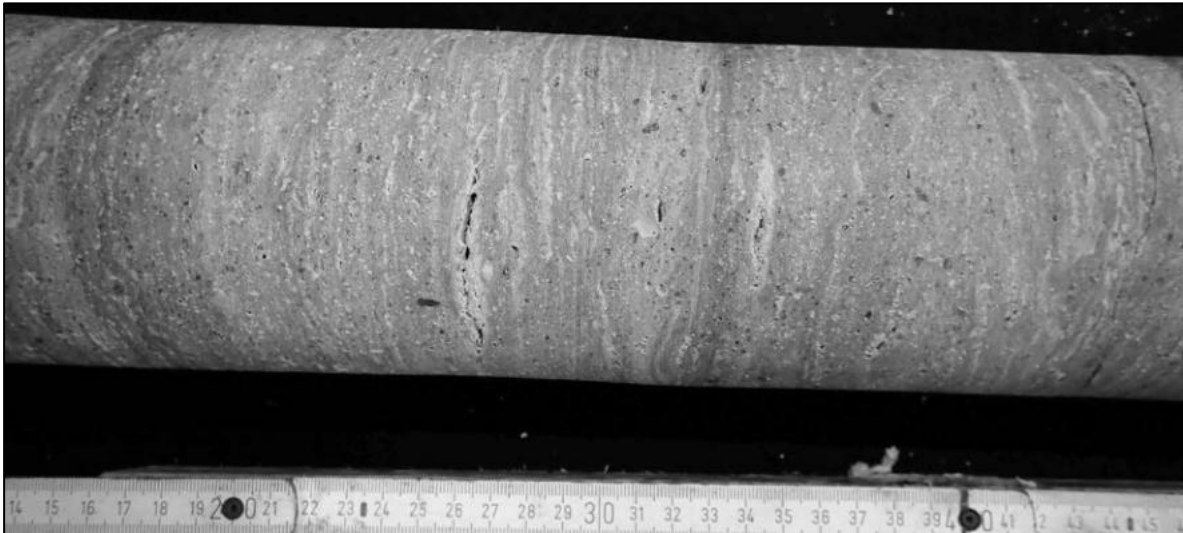


Abbildung 230: GSBV4 Bohrung B33, 6 cm lange Fehlstelle bei 27 cm Tiefe und kleine Fehlstelle bei 34 cm

Bei der Bohrung **B33** kam es zu einer Ablösung des 2. Kernstücks in 63 cm Tiefe. Der Kern befand sich beim Herausfahren der Bohrkronen aus dem Bohrloch lose in der Bohrkronen. Die Kamerabefahrung zeigte in dem Bereich von 63 cm Tiefe eine Inhomogenität nahezu umlaufend über den gesamten Kreisquerschnitt. Der auffällige Bereich an der Bohrlochwandung ist in Abbildung 228 zu sehen.

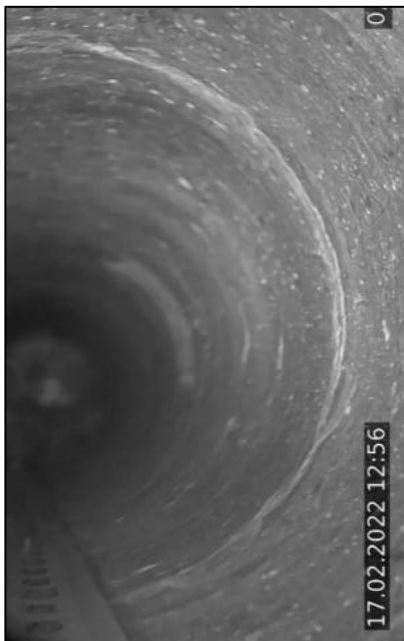


Abbildung 231: Bohrung B33 im GSBV4, Inhomogenität bei 63 cm Tiefe



Abbildung 232: Bohrung B33 im GSBV4, Fläche im Bereich der Inhomogenität bei 63...64 cm, ohne Verbund bei der Bohrkernentnahme

Die festgestellte Inhomogenität kann ziemlich sicher dem großflächigen Reflektor zugeordnet werden. Im Bereich der Bohrung **B34** war allerdings keine so deutliche Auffälligkeit im Bereich zwischen 59...70 cm Tiefe feststellbar, wie bei der Bohrung B33. An der rechten Bohrlochwandung war bei ca. 61 cm Bohrlochtiefe ein hellerer schmaler Streifen zu erkennen (s. Abbildung 230). In diesem Bereich war der Kern auch gebrochen oder schon vor dem Bohren

ohne Verbund zum dahinter liegenden Bereich. Eventuell kann diese Stelle dem großflächigen Reflektor zugeordnet werden. Im Inneren des Kerns ist bei 67 cm Tiefe ein Luftspalt festgestellt worden, der aber nur lokal an einer begrenzten Fläche im Kern eingeschlossen ist (s. Abbildung 234). Die Mantelfläche des Kernstücks erschien im Bereich zwischen 61...68 cm Tiefe unauffällig.

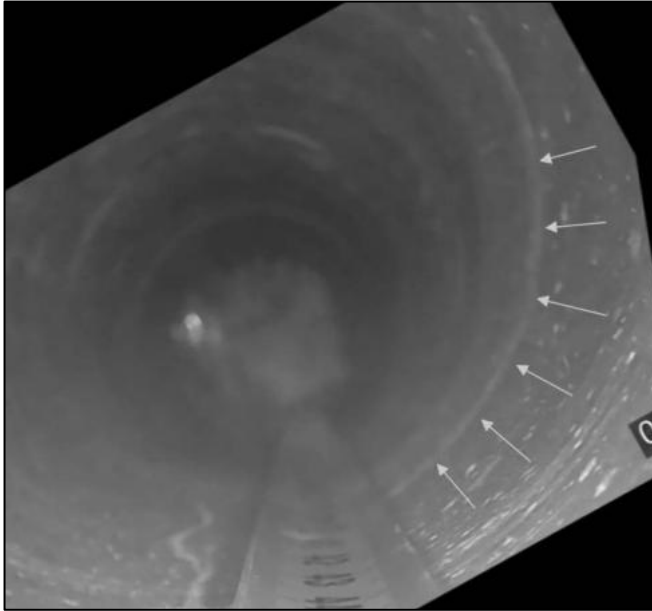


Abbildung 233: Bohrung B34 im GSBV4, sichtbare Inhomogenität bei 60...61 cm Tiefe



Abbildung 234: Bohrung B34 im GSBV4, lokaler Spalt bei 67 cm Tiefe

An der Bohrung **B35** wurde in ca. 31 cm ein mittelgroßer inhomogener Bereich im Beton festgestellt, wie in Abbildung 235 zu sehen ist. In diesem Bereich war der Kern gebrochen. Es gilt als sicher, dass der Ultraschallreflektor bei 33 cm dieser Inhomogenität zuzuordnen ist.

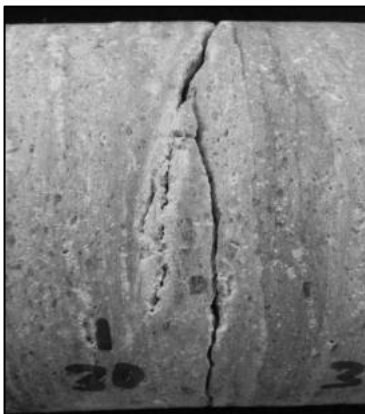


Abbildung 235: Bohrung B35 im GSBV4, Fehlstelle bei 31 cm Tiefe



Abbildung 236: Bohrung B35 im GSBV4, Bruchfläche in 32 cm Tiefe

In 65 cm Tiefe ist am Kernmaterial der Bohrung B35 ein heller schmaler Streifen zu erkennen (s. Abbildung 237). Der Beton im Bereich dieses Streifens zeigt allerdings keinen offenen Spalt und ist in diesem Bereich ansonsten unauffällig. Ob der Ultraschallreflektor in 66 cm Tiefe diesem Streifen zugeordnet werden kann, ist unsicher.

Für die Ultraschallwellen sind luftgefüllte und/ oder offene Spalte Bereiche, die zu einer Totalreflexion der Ultraschallwellen beitragen, was in der Rekonstruktion als Reflektor abgebildet wird. Somit können auch kleinere parallel zur Oberfläche liegende Spalte zu Anzeigen im rekonstruierten Datenbild führen. Bestehen allerdings wie bei teilweise offenen Spalten Schallbrücken, ist keine deutliche Reflexion zu erwarten. Zusätzlich ist die Sensitivität größer, wenn sich die Reflektoren senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls befinden und starke Reflexionen hervorrufen, wie es bei B33 der Fall ist. Generell ist bei der Darstellung der Reflektoren zu beachten, dass das Auflösungsvermögen maximal etwa 2 bis 4 cm beträgt.



Abbildung 237: Bohrung B35 im GSBV4, weißer Streifen in der Betonstruktur in 65 cm Tiefe

Neben den senkrecht zur Spritz- und Bohrrichtung verlaufenden Fehlstellen wurde in den Bohrungen B34 und B35 jeweils ein vertikal verlaufender Längsriss in Spritzrichtung festgestellt. Bei beiden Bohrungen begann der Riss an der Schichtgrenze von der 5. zur 4. Spritzschicht bei 33 cm bzw. 32 cm Tiefe. Bei Bohrung B34 reicht der Riss bis in eine Tiefe von 87 cm. Bei der Bohrung B35 endet der Riss an der Schichtgrenze von der 2. zur 1. Spritzschicht in ca. 80 cm Tiefe. Die SAFT-Rekonstruktion der Ultraschall-Daten ist für Artefakte in Ausbreitungsrichtung des Schalls unempfindlich, weshalb der Längsriss nicht dargestellt werden kann.

Die anderen gefundenen Fehlstellen in den Bohrkernen konnten keinen Ultraschallreflektoren zugeordnet werden.

Generell ist eine eindeutige Zuordnung zwischen allen individuellen Fehlstellen und Ultraschallreflektoren nicht möglich aufgrund der Komplexität der zu Grunde liegenden 3D Reflexionen im Ultraschall sowie zusätzlichen Inhomogenitäten des Spritzbetons, die die Wellenausbreitung beeinflussen. Großflächigere Strukturen wie die Ablösung in B33 sind dagegen eindeutig individuellen Ultraschallreflektoren zuordenbar.

7.7.3 Fazit

Insgesamt zeigt sich, dass auch das kommerzielle MIRA-Messsystem für die zerstörungsfreie Prüfung von MgO-Spritzbeton für den möglichen Einsatz an Abdichtbauwerken grundsätzlich geeignet ist. Größere Reflektoren/ Ablösungen sind sicher nachweisbar, wie am Beispiel der unerwarteten Ablösung bei $z = -0,63$ cm in GSBV4 zu sehen ist. Somit zeigt sich, dass Ultraschallmessungen als ein Teil der Qualitätssicherungskonzepte hilfreiche Informationen liefern können, die nicht äquivalent durch andere (zerstörungsfreie) Verfahren ermittelbar sind. Die im Experiment eingebrachten Störkörper ($8 \times 8 \times 3$ cm³) konnten nicht ausreichend detektiert werden. Deshalb sollte sowohl die Mess- als auch die Auswerte-Technik weiterentwickelt werden, so dass auch Einbauteile geringerer Ausdehnung sicher nachgewiesen werden können.

7.8 Ableitung der optimalen Schichtmächtigkeit der MgO-Spritzbetonschicht in Abhängigkeit von der zulässigen Maximaltemperatur und vom Temperaturgradient im Spritzbeton

7.8.1 Problemstellung

Da mit zunehmender Schichtmächtigkeit des MgO-Spritzbetons die durch die Abbindereaktion resultierende Temperatur in der Spritzschicht ansteigt, muss der Zusammenhang zwischen der Schichtmächtigkeit und der Maximaltemperatur im MgO-Spritzbeton in Abhängigkeit der sonstigen Randbedingungen geklärt werden. Die durchgeführten in situ-Spritzversuche (siehe Abschnitt 6.5) mit Quarzzuschlag (GSBV1, GSBV2) und Salzzuschlag (SGBV3, GSBV4) haben gezeigt, dass durch die Verbesserung der Klebrigkeit relativ hohe Schichtmächtigkeiten von > 20 cm erreicht werden können. Allerdings hat sich in den Versuchen auch gezeigt, dass mit zunehmender Schichtmächtigkeit eine Temperatur erreicht wird, die nicht mehr akzeptabel ist, wie im Folgenden erläutert wird.

Im Versuch GV2 betrug bei einer Schichtmächtigkeit von 9,5 cm die Maximaltemperatur im Kern der Spritzschicht (Sensoren B, D und E in Abbildung 238) bei zwei aufeinander folgenden Spritzschichten nur 42,9 °C. Das Bauwerk GV2 wurde im Carnallit errichtet. Eine Zielstellung war hier, eine niedrige Temperatur (< 40 °C) an der empfindlichen Salzkontur einzuhalten.

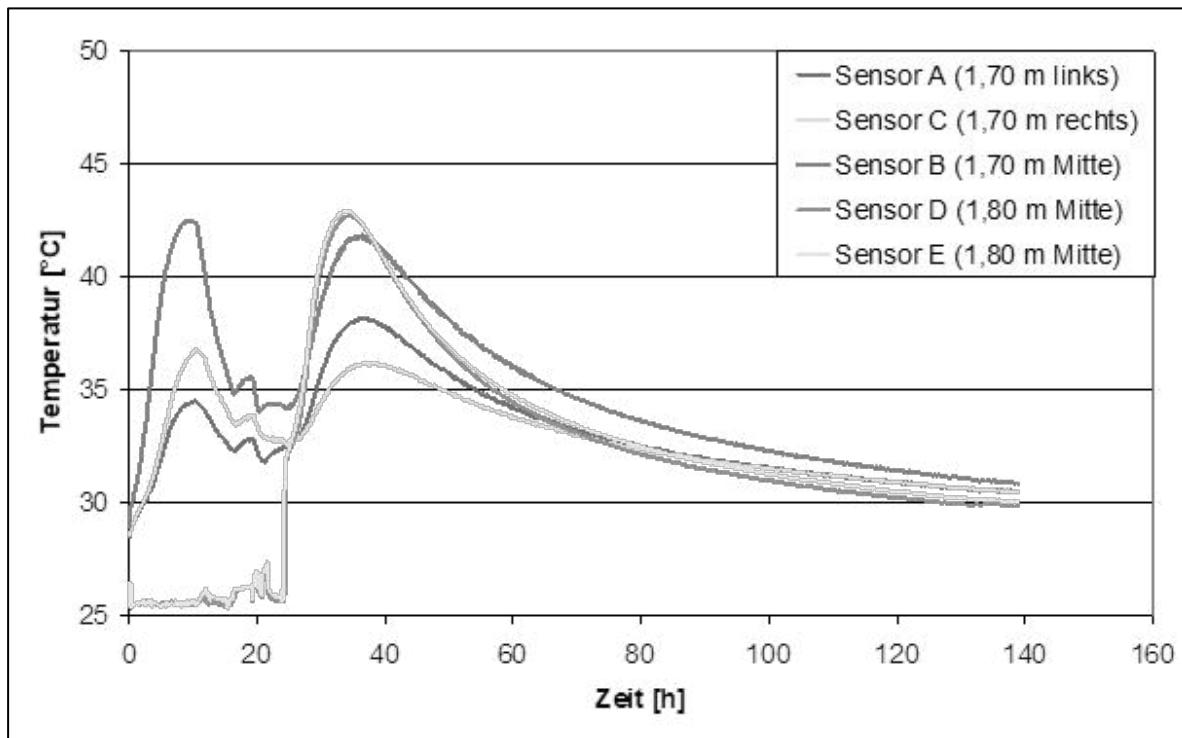


Abbildung 238: Ergebnisse der Temperaturmessung am in situ Bauwerk GV2 vom 18.03.2008 bis 25.03.2008 bei einer Bauwerkslänge von 1,64 m bis 1,83 m [38]

Im Steinsalz gilt diese Begrenzung für die Temperatur an der Gebirgskontur nicht. Für den MgO-Spritzbeton erscheint aber eine Begrenzung der Temperatur sinnvoll. Aufgrund fehlender Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen dem Temperaturgradienten und der sich dadurch ergebenden Zug- und Schubspannungen in der Spritzschicht und fehlender Kenntnisse zur Zugfestigkeit des MgO-Spritzbetons im Frühstadium ist es schwierig, eine maximal zulässige Temperatur im Spritzbeton festzulegen. Im vorliegenden Fall soll im Kern (Mitte der Spritzschicht) die Temperatur auf weniger als 50 °C begrenzt werden und eine Temperatur von 60°C nicht überschritten werden.

Ausgehend von diesen Erfahrungen wurden mit dem bereits vorhandenen und in das Programmsystem FLAC implementierten Hydratationsmodell [39] entsprechende Modellrechnungen durchgeführt. Dazu wurden die erforderlichen Modellparameter (maximale Wärmemenge, Aktivierungsenergie, Wärmekapazität, Startpunkt der Hydratation, kinetische Parameter) experimentell durch kalorimetrische Messungen bestimmt.

Die kalorimetrischen Messungen wurden vom Institut für physikalische Chemie der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt und ausgewertet. Die notwendigen Eingangsparameter wurden für 2 Rezepturen ermittelt – für die klassische Rezeptur mit Hartgesteinszuschlag (Referenz GV2, GSBV1, GSBV2) und für die Vorzugsrezeptur mit Salzzuschlag (Referenz GSBV3, GSBV4). Dabei wurden zwei MgO-Chargen untersucht – G10/16 mit 81,9 % MgO und einem ZTW von 200 s und G10/74 mit 84,8 % MgO und mit einem ZTW von 350 s (siehe Abschnitt 6.2). Die Wärmeleitfähigkeit des MgO-Spritzbetons wurde an Proben aus den in situ-Spritzbetonversuchen (GSBV1 bis GSBV4) am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg gemessen. Die Ergebnisse zu allen Eingangsgrößen zeigt Tabelle 85.

Tabelle 85: Eingangsparameter für die Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung

Parameter	SB-D4K (Quarzzuschlag)	SB-D4S (Salzzuschlag)
Masseverhältnis Lösung/MgO-Lieferware	0,74	0,86
Masseverhältnis Zuschlag/MgO-Lieferware	4,68	4,0
Zuschlag im Spritzbeton [Ma.%]	72,9	68,3
MgO-Lieferware [Ma.%]	15,6	17,0
MgCl ₂ -Lösung [Ma.%]	11,5	14,7
Binderanteil im Spitzbeton [Ma.%]	27,1	31,7
Dichte [g/cm ³]	2,16	1,93
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	3,03	2,95
Spezifische Wärmekapazität c _p [J/(kg·K)]	1010	1070
Maximale Wärmemenge Binder Q _{BM,max} [kJ/kg]	300 bis 348	300 bis 351
Aktivierungsenergie E _A [kJ/mol]	35 bis 50	41 bis 50
Kinetischer Parameter b [-]	-1,0	-1,1 bis -1,3
Startpunkt der Hydratation t ₁ [h]	2,0 bis 2,175	2,0 bis 2,175
Maximale Wärmemenge Spritzbeton Q _{Beton,max} [kJ/kg]	81,3 bis 94,3	95,2 bis 111,4
Maximal mögliche Temperaturerhöhung unter adiabatischen Bedingungen dT _{max} [K]	80 bis 93	89 bis 104

Bei den Einzelversuchen der kalorimetrischen Messungen schwankte bei den Messungen die maximale Wärmemenge, die Aktivierungsenergie, der kinetische Parameter b und der Startpunkt der Hydratation. Die maximale Wärmemenge wurde in den meisten Versuchen mit dem Bindersystem (MgO + MgCl₂-Lösung, ohne Zuschlag) gemessen. Aus der maximalen Wärmemenge Q_{BM,max} für den Binder kann über den Binderanteil die maximale Wärmemenge für den Spritzbeton errechnet werden, die für die Modellierung maßgebend ist.

Unter adiabatischen Bedingungen kann aus der Wärmemenge und der Wärmekapazität die maximale Temperaturerhöhung im Spritzbeton bestimmt werden (letzte Zeile in Tabelle 85). In Einzelversuchen wurde die maximale Wärmemenge Spritzbeton Q_{Beton,max} auch direkt gemessen. Hierbei waren jedoch die gemessenen Temperaturerhöhungen nicht identisch mit den berechneten Werten.

Aus diesem Grunde wurden die Modellrechnungen mit unterschiedlichen Parametersätzen durchgeführt. Mit dieser Parametervariation wurde das Modell an den Ergebnissen des in situ-Spritzbetonversuches GSBV4 kalibriert. Hierbei wurden auch die Randbedingungen (Holzschalung, Luftspalt zur Ortsbrust) des Versuches GSBV4 beachtet, da diese nicht den Randbedingungen an einem realen Verschlussbauwerk entsprechen.

7.8.2 Modellgrundlagen

Stoffmodelle und Parameter

Die Auswirkungen des Hydratationsprozesses lassen sich in verschiedene physikalische Komponenten unterteilen, wobei die thermischen und mechanischen am wichtigsten sind. Die Implementierung von Hydratationsmodellen in FLAC3D folgt dieser Trennung [39]:

- die Hydratationswärmeerzeugung und der Wärmetransport werden in thermischen Modellen behandelt,

- die Materialverfestigung und Festigkeitsentwicklung werden als Stoffmodelle des mechanischen Verhaltens implementiert.

Das zugrundeliegende Stoffmodell geht auf [40] zurück.

Die Kopplungsparameter zwischen den verschiedenen Teilen des Stoffmodells sind der Hydratationsgrad α [-] und das Betonalter t_e [s]. Der Hydratationsgrad ist definiert als

$$\alpha(t_e) = \frac{Q(t_e)}{Q_{\max}} \quad (4)$$

wobei $Q(t_e)$ die akkumulierte Hydratationswärme bis zum aktuellen Zeitpunkt t_e , Q_{\max} die endgültige Hydratationswärme nach vollständiger Beendigung der Hydratation und t_e das Betonalter sind. Das Betonalter berücksichtigt die Temperaturabhängigkeit des Abbindeprozesses mittels eines Arrhenius-Faktors

$$t_e(t) = \int_0^t e^{\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T(\tau)} \right)} d\tau \quad (5)$$

Hier ist E_A die Aktivierungsenergie, R die allgemeine Gaskonstante und T_{ref} eine Referenztemperatur.

Für den Hydratationsgrad wird eine funktionale Abhängigkeit vom Betonalter angesetzt, das über die sogenannten Jonasson-Parameter t_1 und b angepasst werden kann,

$$\alpha(t_e) = e^{-\left[\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right) \right]^b} \quad (6)$$

Zur Simulation des Hydratationsprozesses im Beton wurden hier zwei Stoffmodelle verwendet, die in FLAC3D implementiert sind:

- ein thermisches Hydratationsmodell wie oben beschrieben und
- ein modifiziertes Drucker-Prager-Modell als mechanisches Stoffmodell.

Im mechanischen Modell werden Parameter wie Steifigkeiten und Festigkeit als Funktion des Hydratationsgrades beschrieben. Da dazu nicht ausreichend Daten vorlagen, wurden eine geringe Festigkeit und eine geringere Steifigkeit angenommen, die ab einem Hydratationsgrad von 0,2 wirksam werden.

Zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften des Steinsalzes bzw. des Altbetons im Versuchsbauwerk werden folgende zwei Stoffmodelle verwendet:

- ein isotropes thermisches Stoffmodell, bei dem konstante Werte für die thermische Leitfähigkeit, die spezifische Wärme und den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten vorgegeben werden sowie
- ein elastisches Stoffmodell, bei dem die Dichte, der Kompressionsmodul und der Schubmodul vorgegeben werden.

Für die Nachrechnung des GSBV4 wurden die Parameter des Hydratationsmodelles, die anhand der kalorimetrischen Versuche des Instituts für physikalische Chemie bestimmt wurden (siehe Tabelle 85), als Eingangswerte verwendet. In Anpassungsrechnungen wurden die thermischen Parameter des Hydratationsmodelles variiert, bis eine gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Messungen erzielt werden konnte. Der in situ-Versuch erfordert eine Anpassung der Eingangswerte, da das Gesamtverhalten des Bauwerkes von der Wechselwirkung von Wärmefreisetzung durch die Hydratation in Abhängigkeit der Temperatur, der Wärmekapazität und der Wärmeleitung in Beton und Gebirge bestimmt wird. Die resultierenden Werte sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt.

Tabelle 86: Verwendete Parameter im thermischen Hydratationsmodell (FLAC3D) für MgO-Spritzbeton. Die Zahlenwerte ergeben sich aus der Anpassung an den In-Situ-Versuch GSBV4

Parameter	Einheit	Zahlenwert
Dichte des bindenden Materials, c	10^6 kg/m^3	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Maximale Hydrationswärme bis Ende Verschluss, $Q_{Ce, \max}$	10^{-6} kJ/kg	$3 \cdot 10^8$
Spezifische Wärmekapazität, c_p	$10^{-6} \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	10^6
Thermische Leitfähigkeit, λ	$\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0,003
Wärmeausdehnungskoeffizient, α_t	1/K	10^{-5}
Aktivierungsenergie, E_A	kJ/mol	50
Universelle Gaskonstante, R	$\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$8,314 \cdot 10^{-3}$
Referenz-Temperatur, T_{Ref}	K	293,15
Jonasson-Parameter für Zeit, t_1	s	187920
Jonasson-Materialparameter, b	–	-1,1
Maximaler Hydratationsgrad für Wärmefreisetzung, $\alpha_{\max, q}$	–	1

Tabelle 87: Verwendete Parameter im mechanischen Stoffmodell für Hydratation (modifiziertes Drucker-Prager-Modell)

Parameter	Einheit	Zahlenwert
Mindesthydrationsgrad, α_0	–	0,2
Minimale Differenz zwischen Hydrationsgrad und Mindesthydrationsgrad, $(\alpha - \alpha_0)_{\min}$	–	10^{-4}
Dichte	10^6 kg/m^3	0,002
Referenz-Kompressionsmodul für $\alpha = 1$, K_{cte}	MPa	$1 \cdot 10^3$
Referenz-Schubmodul für $\alpha = 1$, G_{cte}	MPa	$0,7 \cdot 10^3$
Materialparameter für elastische Moduln als Funktion vom Hydrationsgrad α , Exponent a	–	0
Materialparameter für einaxiale Druckfestigkeit, c	–	1
Referenzparameter für einaxiale Zugfestigkeit nach Ende Hydratation, f_{cte}	MPa	2

Tabelle 88: Verwendete thermische und mechanische Parameter für Steinsalz (isotropes thermisches bzw. elastisches Stoffmodell)

Parameter	Einheit	Zahlenwert
Spezifische Wärmekapazität c_p	$10^{-6} \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$8,54 \cdot 10^5$
Thermische Leitfähigkeit	$\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$5 \cdot 10^{-3}$
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K	10^{-4}
Dichte	10^6 kg/m^3	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Kompressionsmodul	MPa	$18,12 \cdot 10^3$
Schubmodul	MPa	$9,84 \cdot 10^3$

Tabelle 89: Verwendete thermische und mechanische Parameter für Altbeton (isotropes thermisches bzw. elastisches Stoffmodell)

Parameter	Einheit	Zahlenwert
Spezifische Wärmekapazität c_p	$10^{-6} \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	10^6
Thermische Leitfähigkeit	$\text{kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$2,9\cdot 10^{-3}$
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K	10^{-5}
Dichte	$10^6 \text{ kg}/\text{m}^3$	$2\cdot 10^{-3}$
Kompressionsmodul	MPa	$1\cdot 10^3$
Schubmodul	MPa	$0,7\cdot 10^3$

Modellaufbau in FLAC3D

Zunächst wurde der Aufbau des in situ-Versuchs GSBV4 in FLAC3D nachgebildet. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen das in FLAC3D aufgebaute Modell.

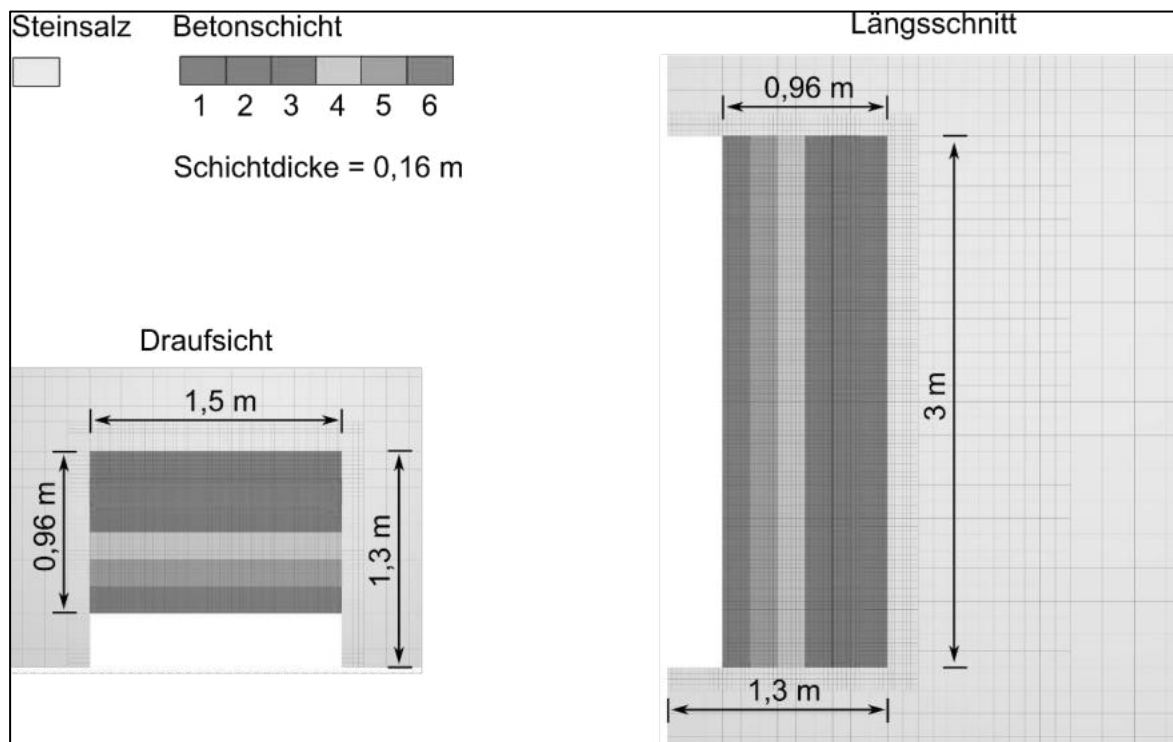


Abbildung 239: Schnittbilder (von Ausschnitten) aus dem in FLAC3D aufgebauten Modell für die Vergleichsrechnung zum in situ-Versuch GSBV4 zur Anpassung der Parameter. Links: Blick von oben auf einen Querschnitt. Rechts: Blick von der Seite auf einen Längsschnitt

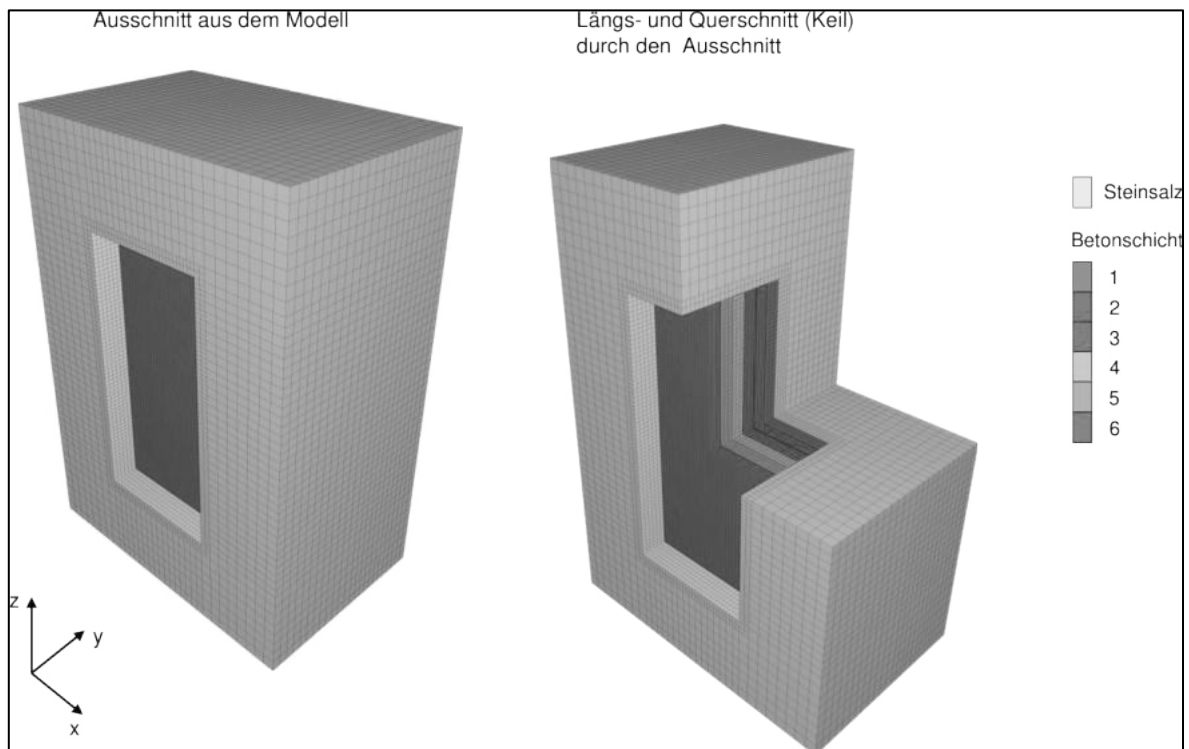


Abbildung 240: Perspektivische Sicht durch das FLAC3D-Modell. Die FLAC3D-Zonen (Elemente) sind in Gruppen für den Homogenbereich Steinsalz und die Betonschichten 1 bis 6 zusammengefasst.

Das Modell ist aus Quadern, die in FLAC3D als grafische Grundelemente verfügbar sind, aufgebaut. Dem in situ-Versuch GSBV4 entsprechend sind im FLAC3D-Modell sechs Betonschichten angelegt. Diese sind zu Beginn der Rechnung inaktiv, indem ihnen das sogenannte Null-Modell (kein Stoffmodell) zugewiesen ist. In der Rechnung werden die Betonschichten 1 bis 6 nacheinander aktiviert, um zu simulieren, wie im in situ-Versuch die Betonschichten nacheinander aufgetragen (gespritzt) werden. Die Aktivierung einer Betonschicht geschieht dadurch, dass sie das thermische und elastische Stoffmodell für die Hydratation zugewiesen bekommt.

Als Anfangsbedingung wurde das Modell mit der Temperatur von 300 K = 26,85 °C initialisiert. Diese Anfangsbedingung gilt auch für aktivierte Betonschichten.

An die freie Oberfläche einer Betonschicht wurde eine Konvektions-Randbedingung angelegt mit einer Wärmeübergangszahl für Luft von $h_{\text{Luft}} = 0,01 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Das Modell ist in seinen äußeren Bereichen mit Steinsalz umschlossen. Die entsprechenden Ränder des Modells sind in der Rechnung thermisch isoliert, d.h. adiabatische Randbedingungen sind angelegt. Dies ist möglich, da das Modell hinreichend groß ist. Bei Testrechnungen, in denen stattdessen Konvektions-Randbedingungen am Steinsalz angelegt wurden, zeigten sich keine Abweichungen. Als mechanische Randbedingung wird die Normalkomponente der Verschiebung an den Modellrändern zu Null gesetzt (Roller Boundary Conditions).

Die Betonschichten sind am feinsten vernetzt. Die kleinsten Zonen (Netzelemente) befinden sich in den Betonschichten und haben eine Zonenlänge von einem Sechstel der Schichtdicke, d.h. $16/6 \text{ cm} \approx 2,67 \text{ cm}$.

Weiterhin wurde ein FLAC3D-Modell erstellt, das ein geplantes in situ-Versuchsbauwerk für einen Streckenschluss nachbildet. Dieses ist ähnlich aufgebaut und weiter unten im Abschnitt 7.8.4 „Prognoseberechnungen für ein zukünftiges in situ-Bauwerk mit Ableitung der optimalen Schichtmächtigkeit“ dargelegt.

7.8.3 Vergleichsrechnung zum in situ-Versuch GSBV4 zur Anpassung der Parameter

In der Rechnung wurde die Temperatur an sechs History-Punkten B1 bis B6, die sich jeweils in der Mitte einer Betonschicht befinden, aufgezeichnet (siehe Abbildung 241).

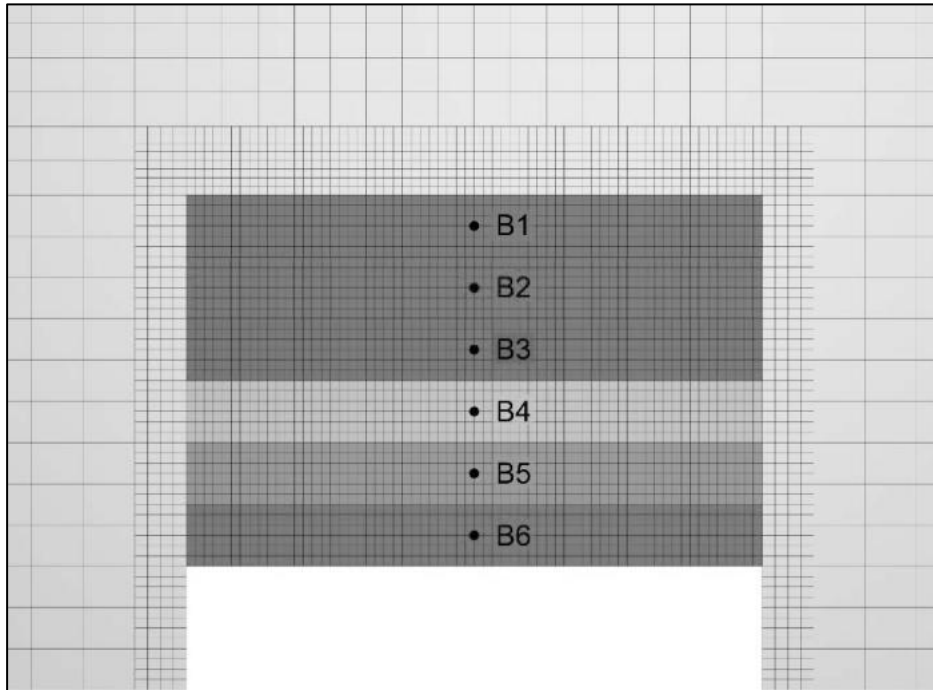


Abbildung 241: Lage der History-Punkte für die Vergleichsrechnung. Draufsicht auf einen Querschnitt des Modells

Diese History-Punkte entsprechen den Geberpositionen A-1-m, A-2-m, ..., A-6-m von Thermoelementen zur Temperaturmessung beim GSBV4.

Beim Bohren der Kerne aus dem GSBV4 wurde festgestellt, dass sich der Beton vom Steinsalz abgelöst hatte. Daher wurde ein Luftspalt zwischen dem Spritzbeton und dem Steinsalz berücksichtigt. Hierzu wurde einem Zonenbereich zwischen dem Spritzbeton und dem Steinsalz eine relativ geringe thermische Leitfähigkeit von 0,024 W/(m K) zugewiesen. Dieser Bereich hat eine Ausdehnung von zwei (kleinsten) Zonenlängen, also ca. 5,34 cm, siehe Abbildung 242. Im Modell besteht dieser Luftspalt von Anfang an, da nicht bekannt ist, wann die Ablösung in situ stattfand.

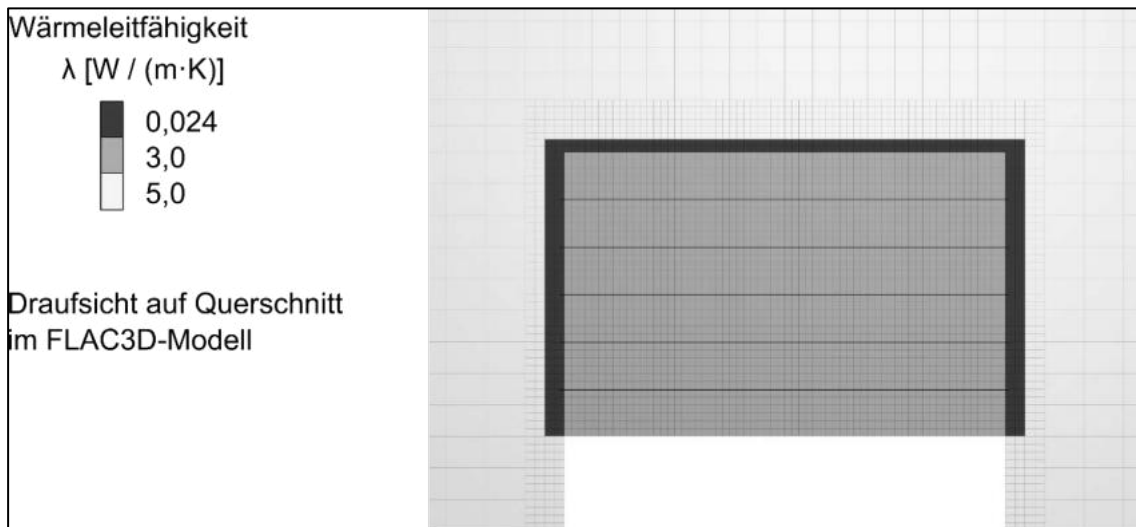


Abbildung 242: Zur Simulation eines Luftspalts erhält ein Bereich zwischen dem Spritzbeton und dem Steinsalz eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Ausdehnung des Luftspaltbereichs ist 5,34 cm.

Um den zeitlichen Ablauf nachzubilden, wurde das Aufspritzen einer jeweiligen Betonschicht in zwei Schritten simuliert:

- Zunächst wurde die erste Hälfte der Betonschicht aktiviert und dann 2 Stunden gerechnet.
- Dann wurde die zweite Hälfte der Betonschicht aktiviert und weiter gerechnet bis zur Simulationszeit von 24 Stunden (1 Tag).
- Dann wurde die erste Hälfte der nächsten Betonschicht aktiviert und der Vorgang wiederholt.

In Abbildung 243 ist das schematisch dargestellt.

Abbildung 244 zeigt zusammenfassend das Ergebnis der Nachrechnung (unten) und zum Vergleich die in situ-Messungen (oben). Die Temperaturkurven werden in ihrer Höhe und im zeitlichen Verlauf zufriedenstellend reproduziert, so dass die verwendeten Parameter für die Prognoserechnung verwendet werden können.

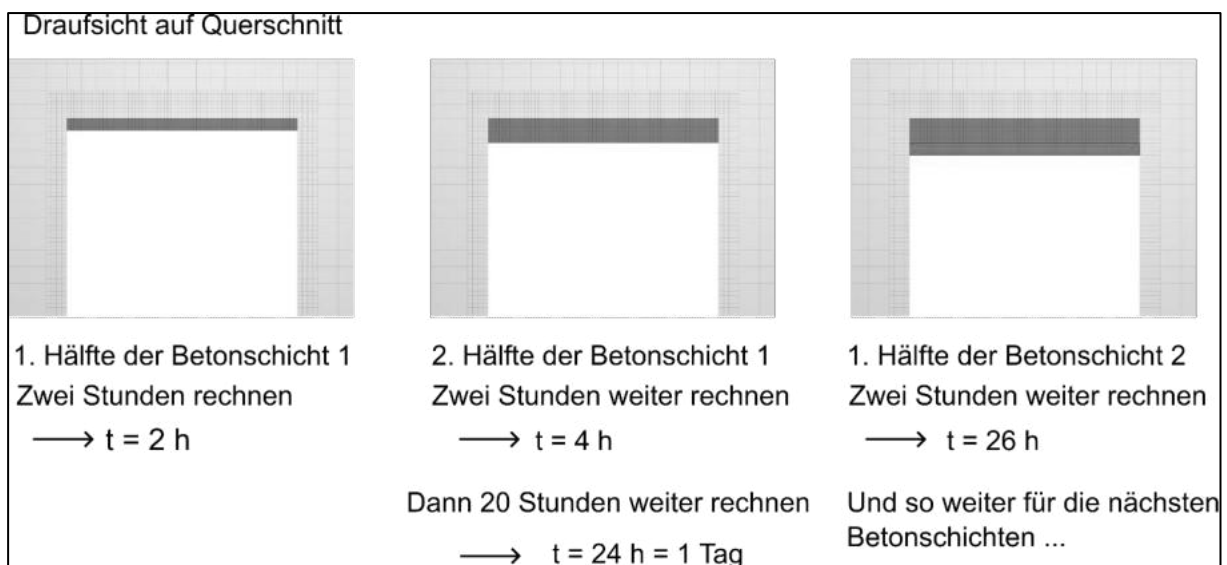


Abbildung 243: Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Vergleichsrechnung

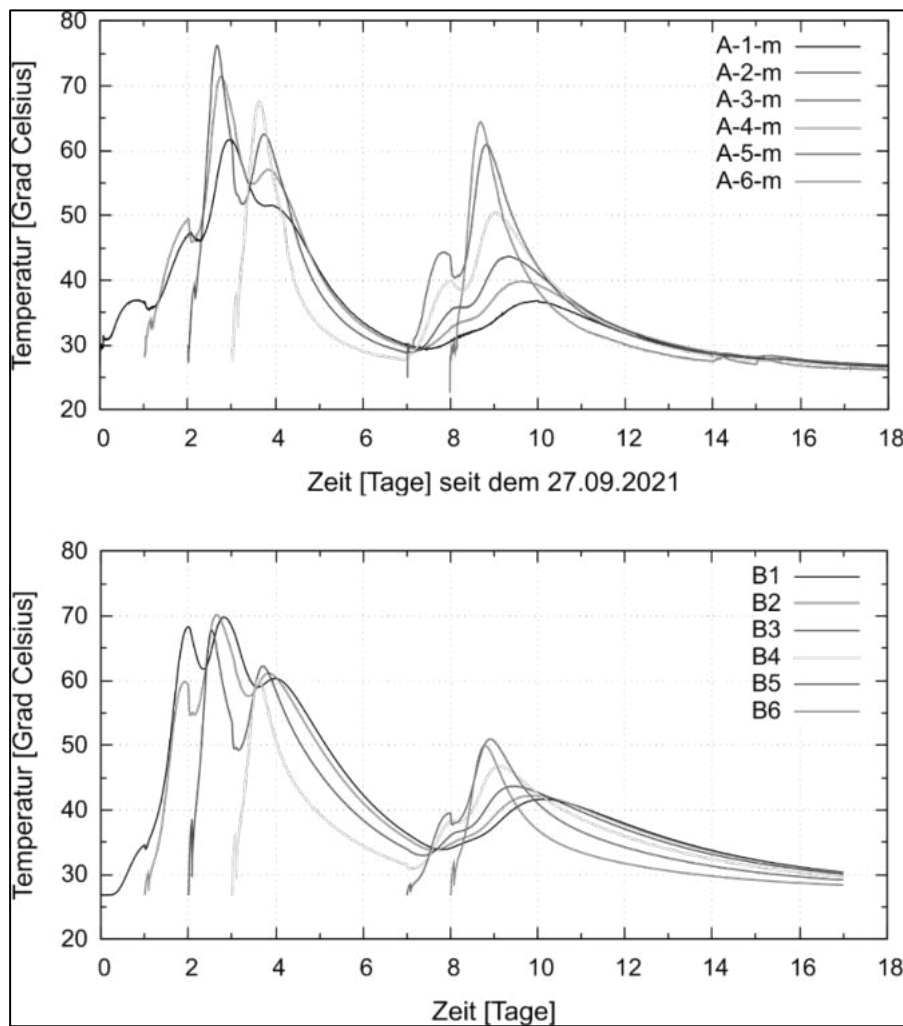


Abbildung 244: Vergleich von Temperaturkurven aus dem in situ-Versuch GSBV4 (oben) mit den nachgerechneten Temperaturkurven (unten)

7.8.4 Prognoseberechnungen für ein zukünftiges in situ-Bauwerk mit Ableitung der optimalen Schichtmächtigkeit

Basierend auf dem oben vorgestellten Modell des GSBV4 wurde ein modifiziertes Modell erstellt, mit dem die Temperaturentwicklung in einem zukünftigen in situ-Bauwerk – zunächst als Einzelscheibe – prognostiziert werden kann.

Das Modell (siehe Abbildung 245 und Abbildung 246) ist dem GSBV4 prinzipiell sehr ähnlich aufgebaut. Der Hauptunterschied besteht darin, dass nur eine Spritzbetonschicht betrachtet wird, die auf einen schon in einem Streckenstummel vorhandenen Betonkörper aufgebracht wird. Dieser Altbeton wird im Modell als vollständig abgebunden und im thermischen Gleichgewicht mit dem Gebirge stehend angesetzt (siehe Abbildung 247 für die Abmessungen der Modellelemente).

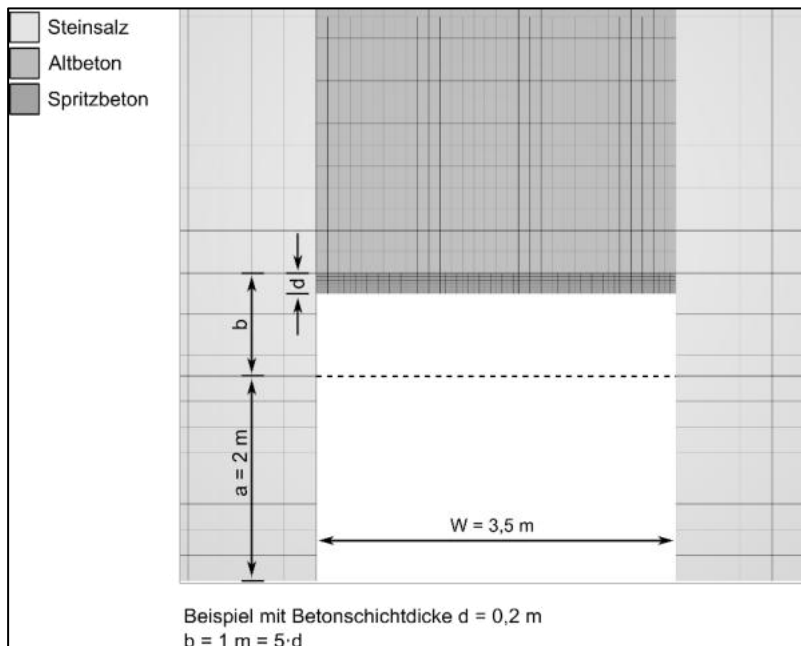


Abbildung 245: Draufsicht auf einen Querschnitt (von einem Ausschnitt) des FLAC3D-Modells des geplanten Versuchsbauwerks

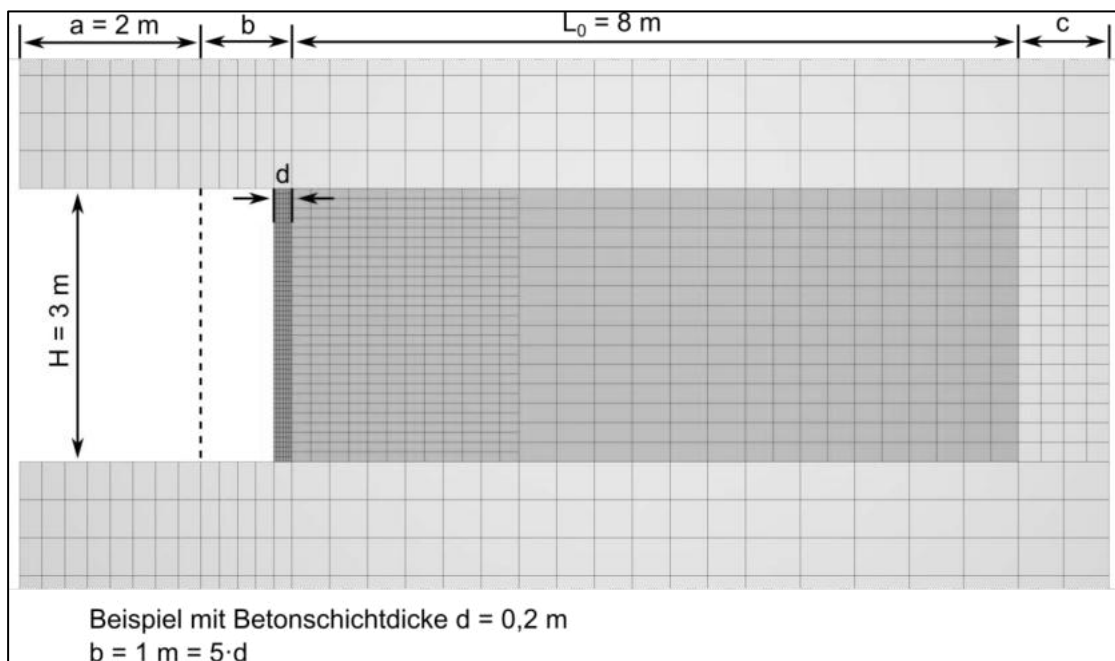


Abbildung 246: Längsschnitt durch das Modell für das geplante Versuchsbauwerk

Ziel der Prognoserechnung war primär, die Temperaturentwicklung in einer neu aufgetragenen Spritzbetonschicht in Abhängigkeit der Schichtdicke zu eruiieren. Dazu wurde die Schicht wie in Abbildung 247 gezeigt entlang der Dicke in sechs Zonen diskretisiert. An den gezeigten Punkten T1 bis T6 wurden die Temperaturkurven aufgezeichnet. Analog wurden in den unmittelbar angrenzenden Zonen z1 bis z6 (siehe Abbildung 264) die Hauptspannungen aufgenommen. (Beachte: In FLAC3D sind Größen wie Temperatur oder Verschiebung an den Gitterpunkten definiert, während Spannungen oder Verzerrungen Zonenvariablen sind.)

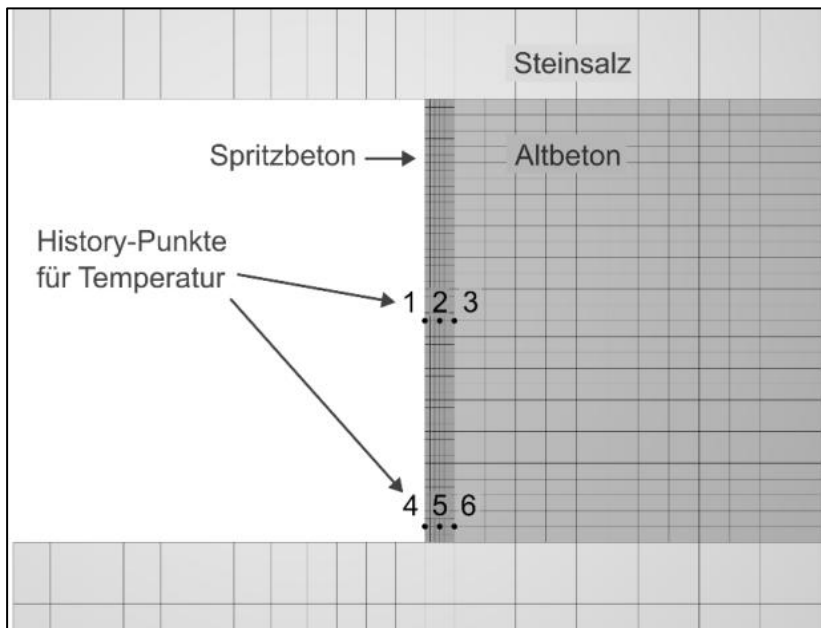


Abbildung 247: Lage der History-Punkte im Modell für das Versuchsbauwerk (Längsschnitt). In der Mitte der Betonschicht: History-Punkte 1 bis 3. Unten: History-Punkte 4 bis 6

Temperaturkurven an den History-Punkten 1 bis 3

Zur Ableitung der optimalen Schichtdicke wurde die Dicke d der Betonschicht im Modell mit 10 cm, 16 cm, 20 cm und 25 cm angesetzt. Nachfolgend werden die Temperatur und die Spannung an den Historypunkten T1 bis T3 bzw. z1 bis z3 in der Mitte der Schicht betrachtet. Die Kurven an den Punkten T4 bis T6 (Abbildung 256 bis Abbildung 263) verlaufen qualitativ sehr ähnlich, jedoch mit geringerer Amplitude.

In dieser Berechnung wurde, im Unterschied zum Modell des GSBV4, kein Luftspalt zwischen Spritzbeton und Salz eingefügt, sodass die Hydratationswärme besser abgeleitet werden kann.

Die Temperaturverläufe sind aus Abbildung 248 bis Abbildung 251 ersichtlich. Erwartungsgemäß sind die Temperaturen für dickere Schichten deutlich höher (Maximalwerte von ca. 56 °C bis 34 °C). Der qualitative Verlauf ist jedoch in allen Fällen sehr ähnlich: Das Temperaturmaximum wird für das vorliegende MgO (geringe Reaktivität) nach etwa 1,2 Tagen erreicht, und zunächst ist die Temperatur im Kern der Schicht (T2, rot) am höchsten und am Altbeton (T3, blau) am niedrigsten; im weiteren Verlauf ändert sich die Reihenfolge, und T3 wird nach etwa zwei Tagen zum wärmsten Punkt.

Die Bedingung, dass die Kerntemperatur unter 60 °C bleibt, ist also auch für die mächtigste Schicht (25 cm) erfüllt. Damit gehen jedoch hohe Temperaturgradienten, berechnet als $(T_2 - T_1)/d_{12}$ etc., einher, die in Abbildung 252 bis Abbildung 255 dargestellt sind. Für eine Schichtmächtigkeit von $d = 25$ cm bildet sich im Maximum ein Gradient von $0,8 \frac{\text{K}}{\text{cm}} = 80 \frac{\text{K}}{\text{m}}$ zwischen T2 und T3 (Schichtkern und Kontakt zum Altbeton) aus. Für geringere Schichtmächtigkeiten verringern sich die Gradienten entsprechend. Die größten Gradienten bestehen stets zwischen den Punkten T2 und T3. (Bei Aufbringen einer neuen Spritzbetonschicht auf eine noch nicht vollständig abgebundene und abgekühlte Vorgängerschichten erhöht sich plausiblerweise die Temperatur am Punkt T3, sodass der Temperaturgradient geringer ausfallen könnte.)

Entsprechend der Temperatur entwickeln sich auch Zugspannungen im Spritzbeton (Abbildung 265 bis Abbildung 272). Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die thermisch induzierten Spannungen von den Steifigkeiten und Festigkeiten des Materials abhängen. Die Steifigkeit und die Festigkeit wächst im Laufe des Abbindeprozesses an. Für

beide Parameter lagen keine Kalibrierungsdaten vor. Daher wurden Standardwerte angenommen; die Entwicklung der Spannungen ist dahingehend als illustrativ zu betrachten. Im Zeitraum der höchsten Temperaturen, also von ca. einem bis 1,7 Tagen, zeigen sich für eine Mächtigkeit von 25 cm und 20 cm Fluktuationen in der maximalen Hauptspannung, die auf plastische Verformung, also Zugversagen hindeuten. Auf lange Sicht, also nach Entwicklung einer ausreichenden Festigkeit, bilden sich in der Spritzbetonschicht stets Zugspannungen auf, die je nach Schichtdicke im Bereich von 0,3 MPa bis 0,1 MPa liegen. Der konkrete Spannungsverlauf ist jedoch von der angenommenen Entwicklung der Festigkeit beeinflusst.

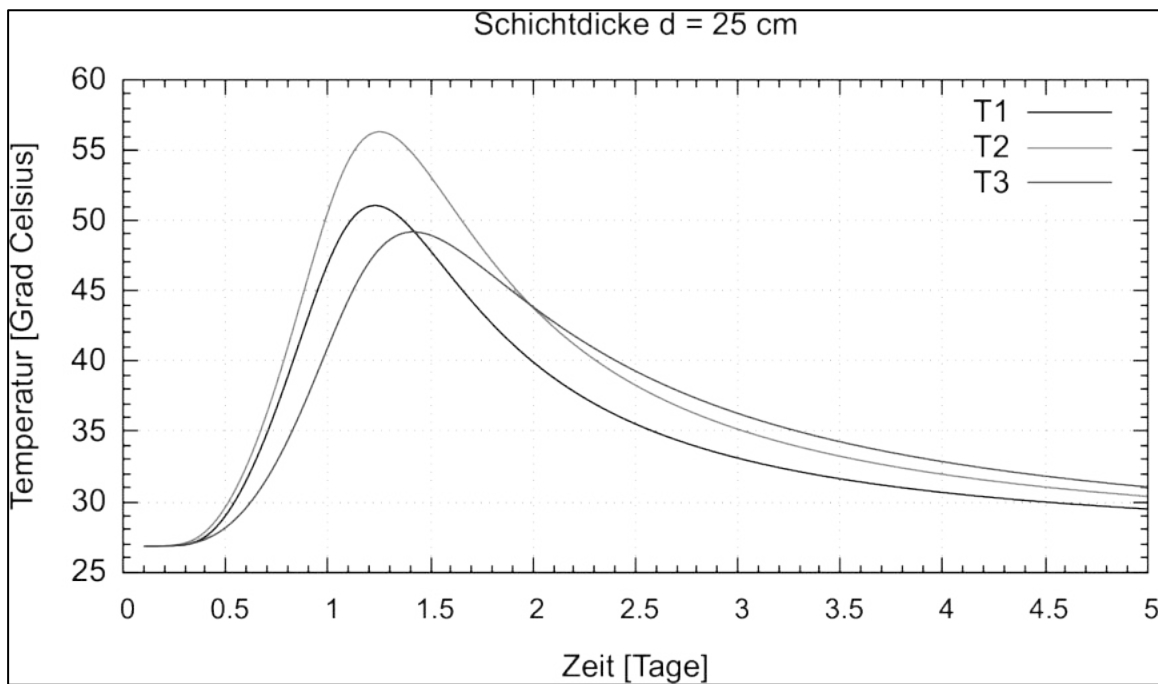


Abbildung 248: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 25 cm

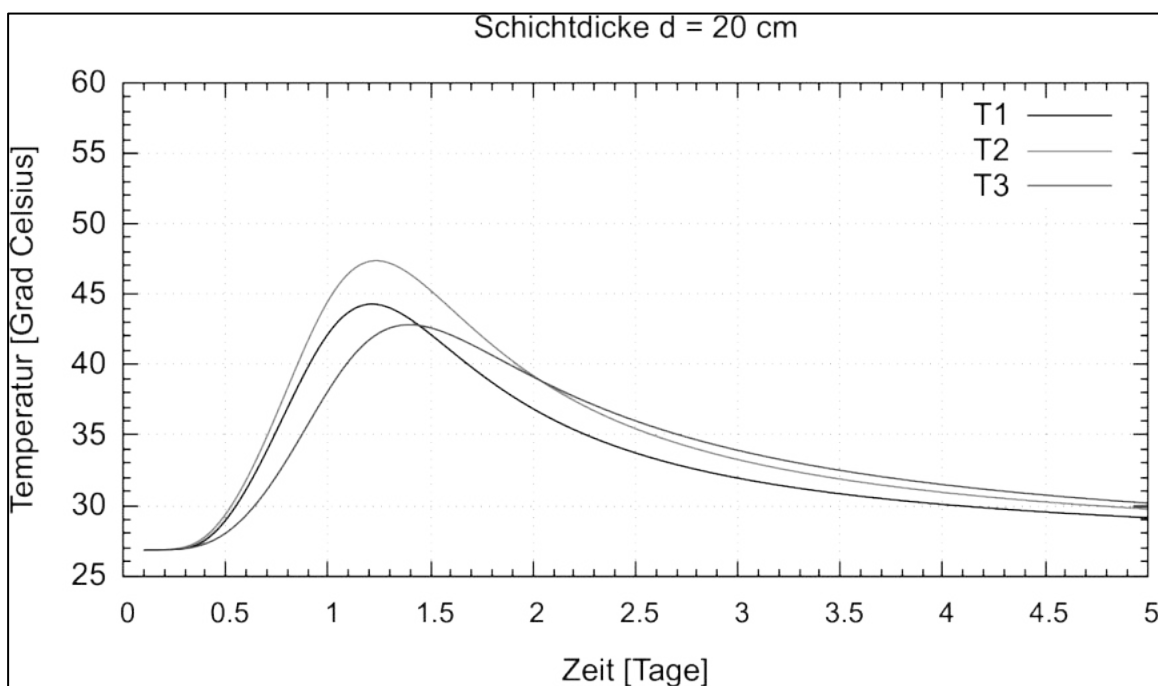


Abbildung 249: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 20 cm

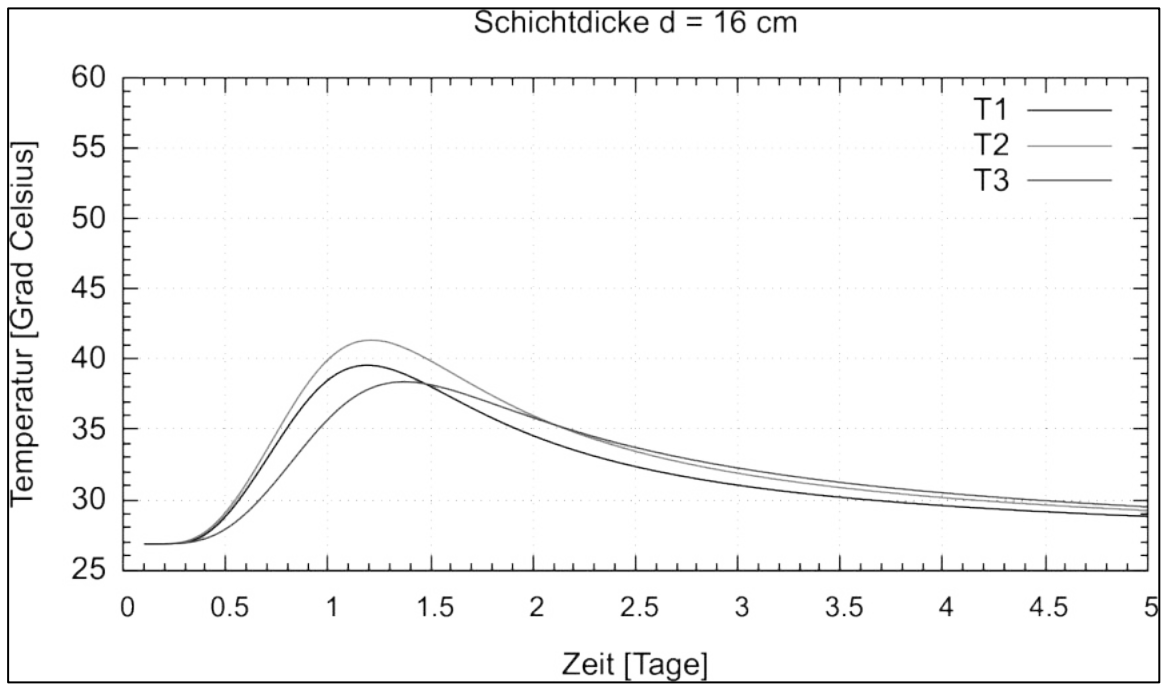


Abbildung 250: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 16 cm

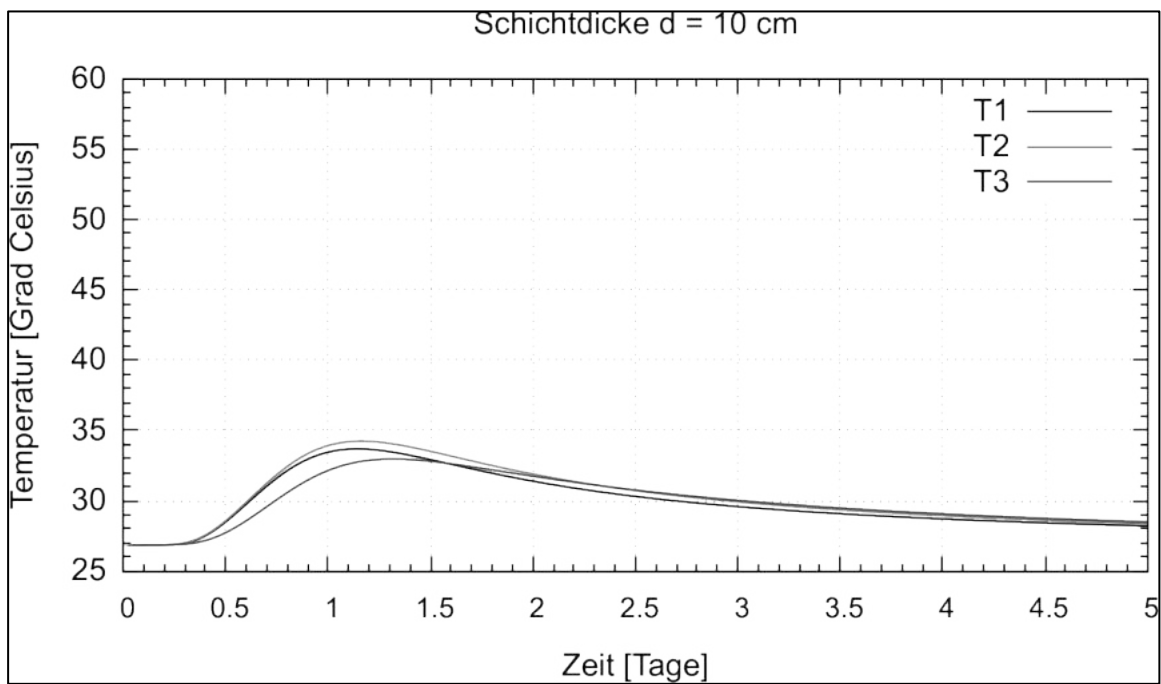


Abbildung 251: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 10 cm

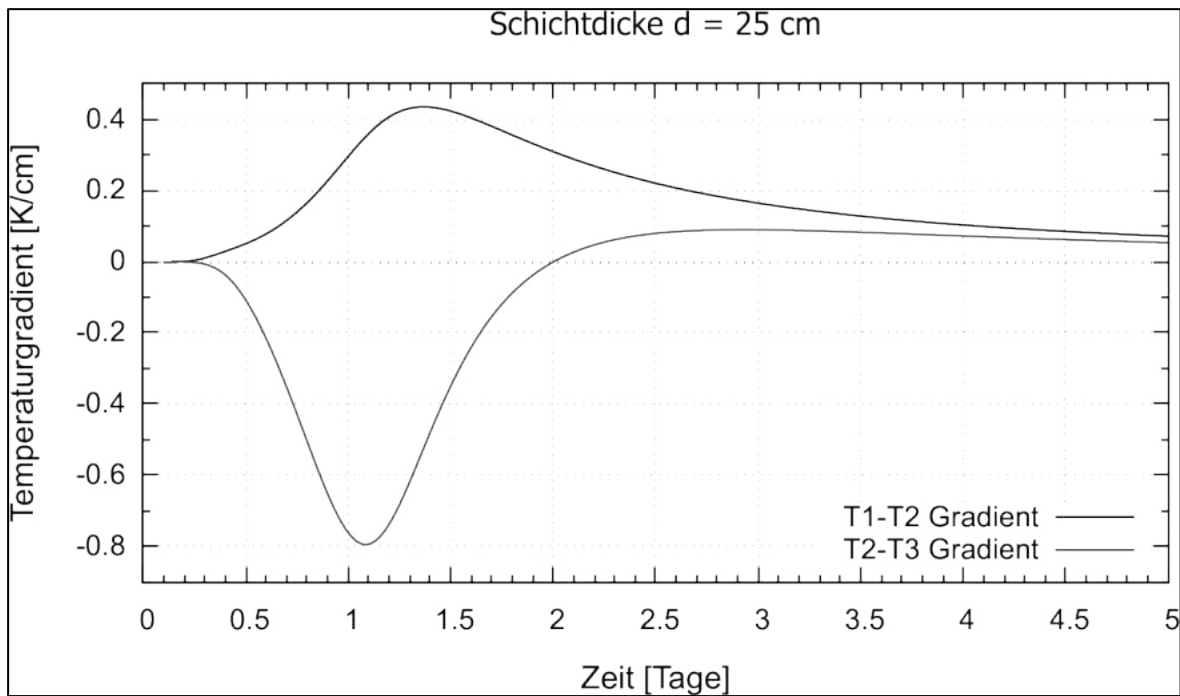
Temperaturgradienten an den History-Punkten 1 bis 3

Abbildung 252: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke $d = 25$ cm

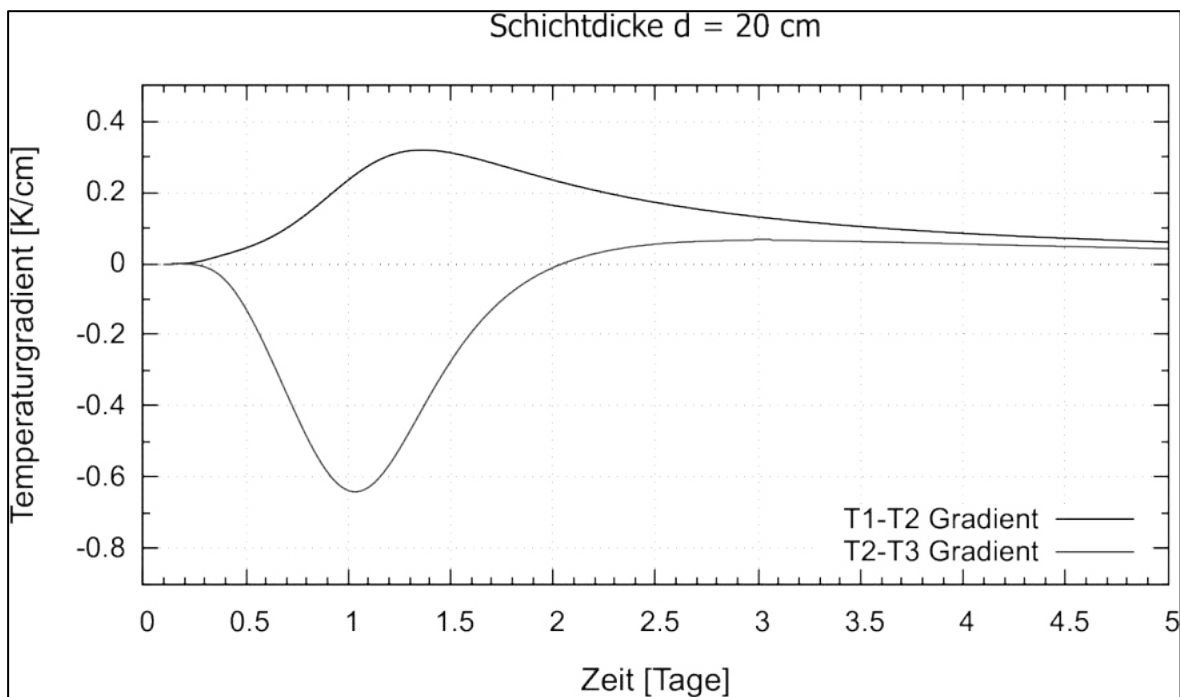


Abbildung 253: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke $d = 20$ cm

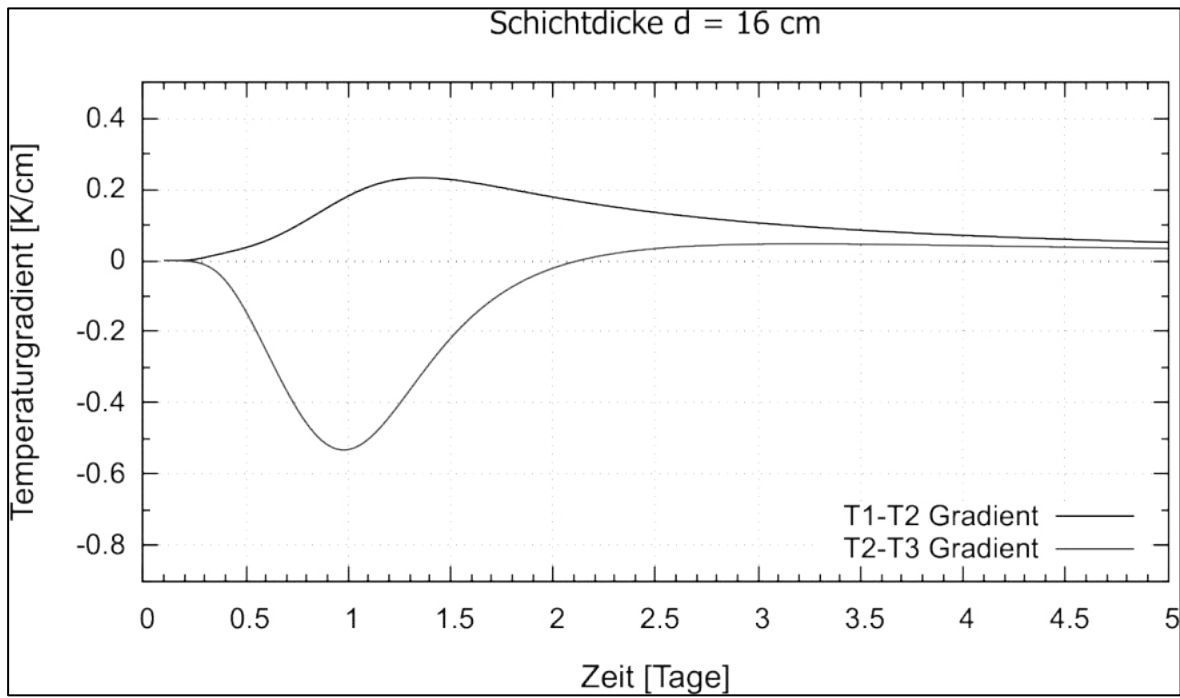


Abbildung 254: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke $d = 16$ cm

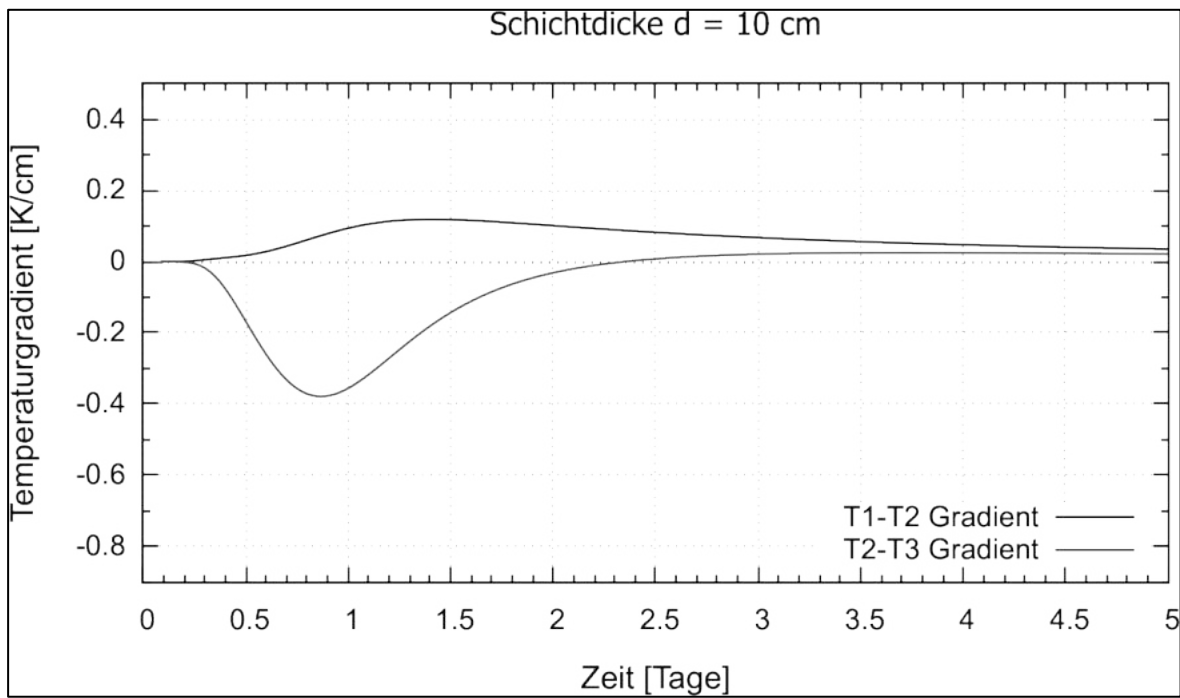


Abbildung 255: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke $d = 10$ cm

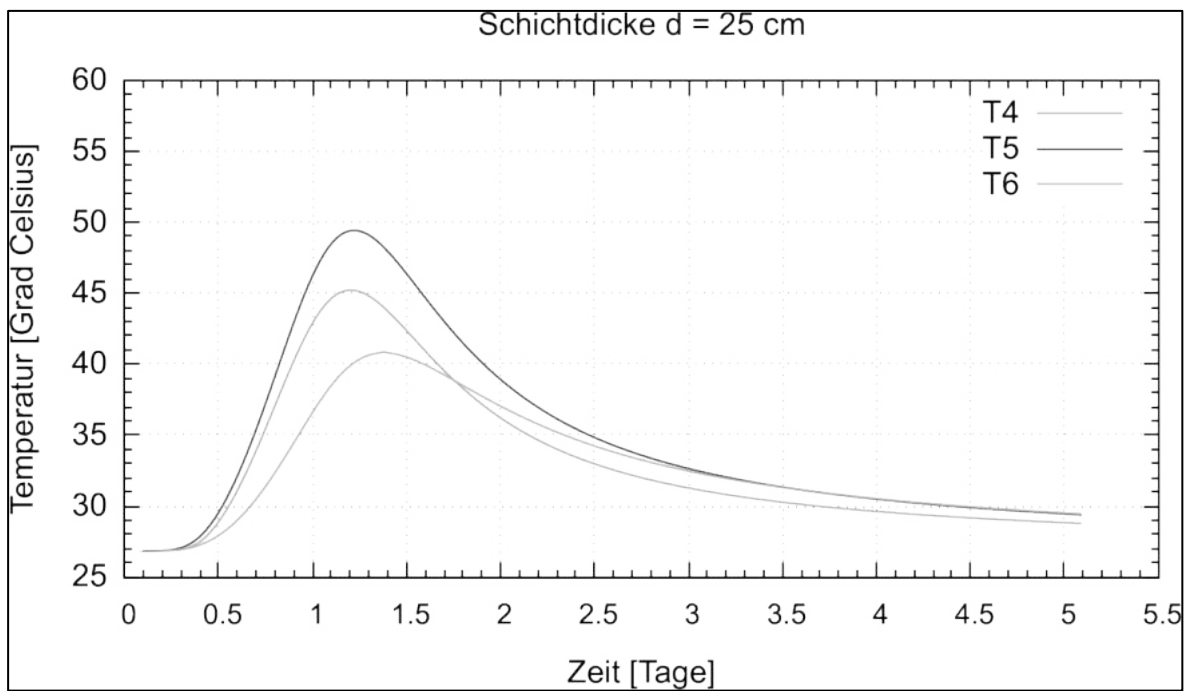
Temperaturkurven an den History-Punkten 4 bis 6 (unten)

Abbildung 256: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke $d = 25$ cm

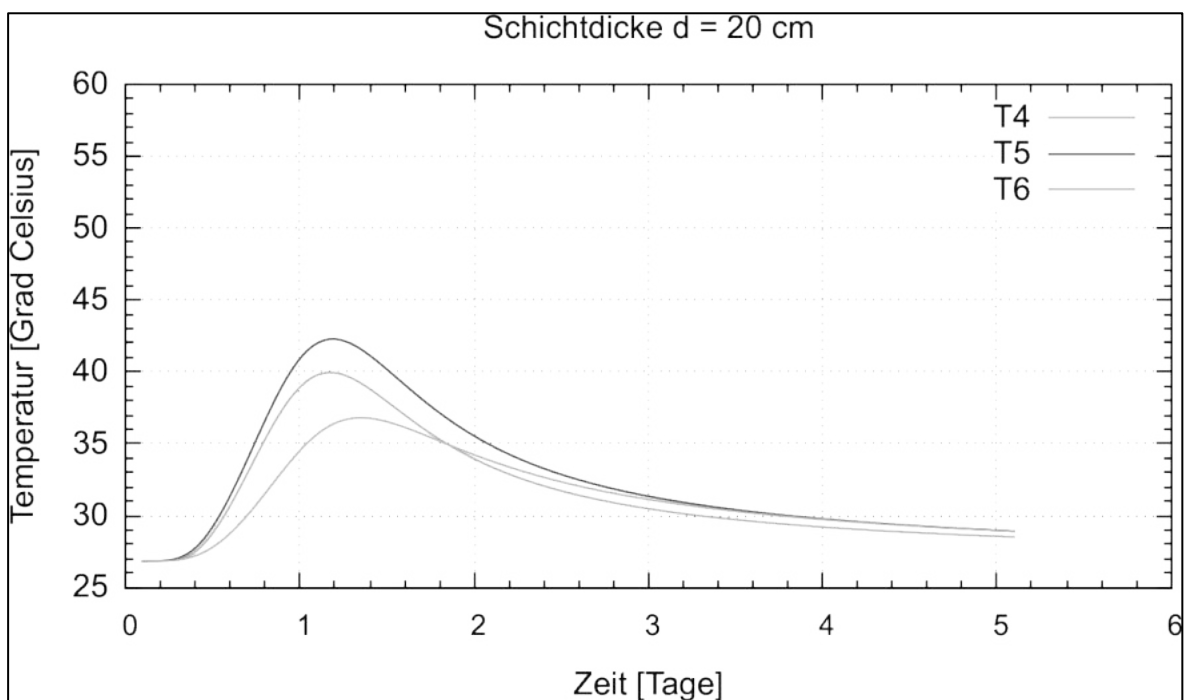


Abbildung 257: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke $d = 20$ cm

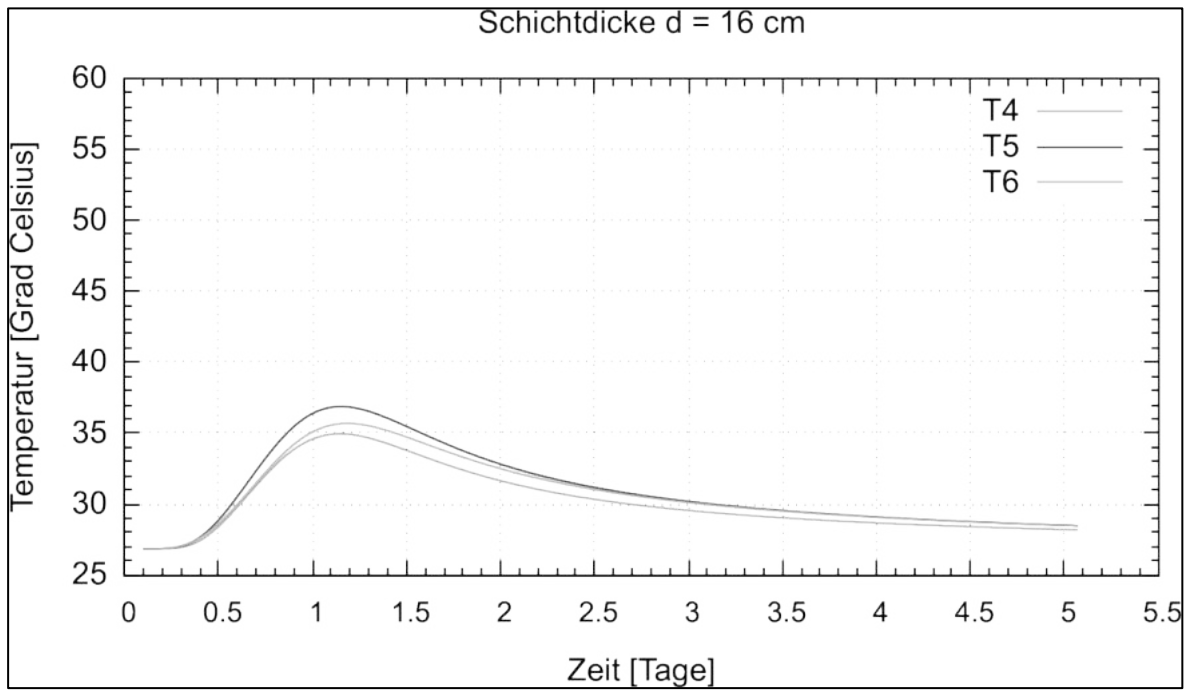


Abbildung 258: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke d = 16 cm

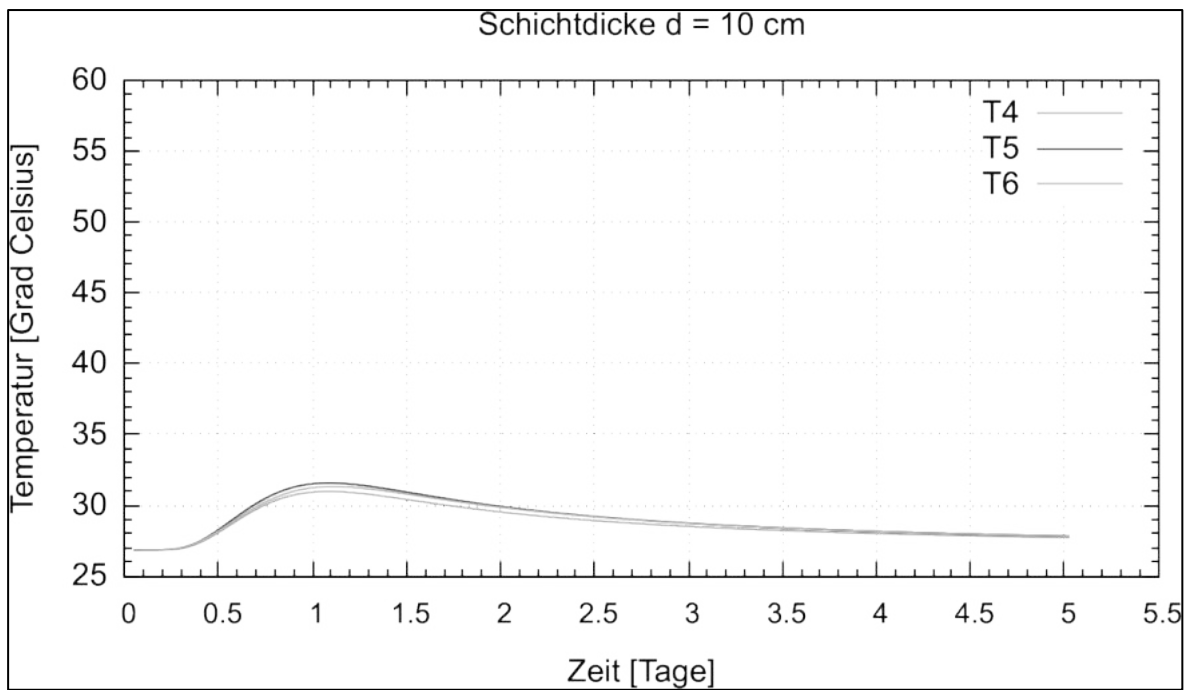


Abbildung 259: History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke d = 10 cm

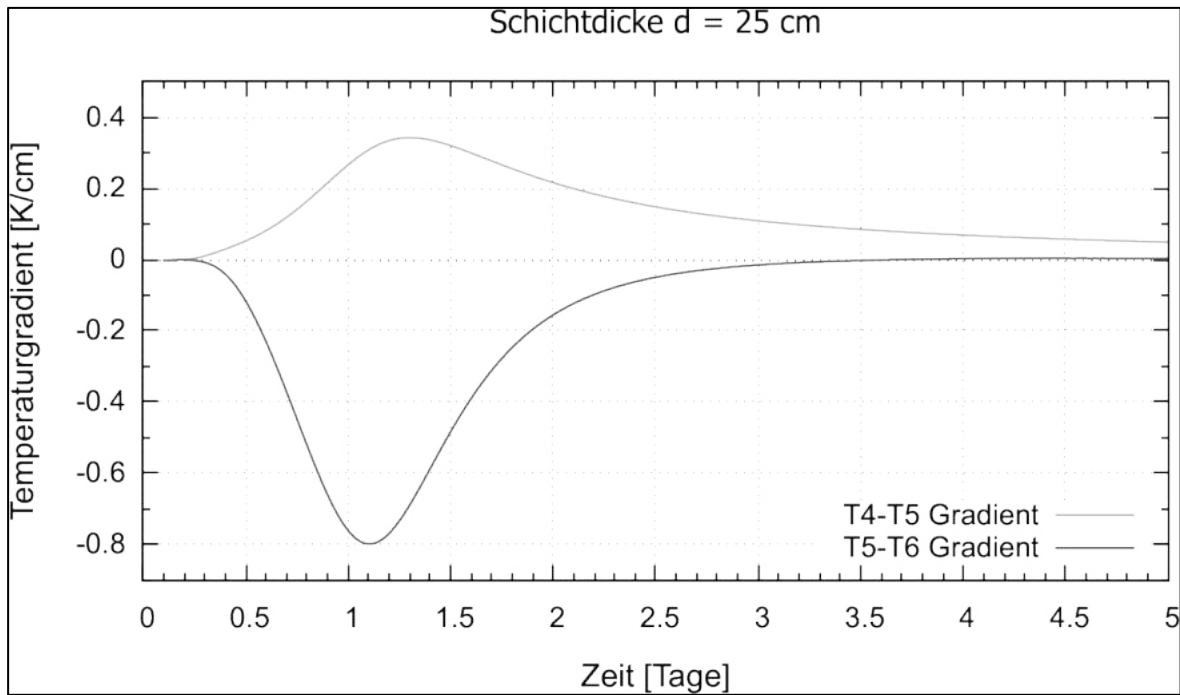
Temperaturgradienten an den History-Punkten 4 bis 6

Abbildung 260: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke $d = 25$ cm

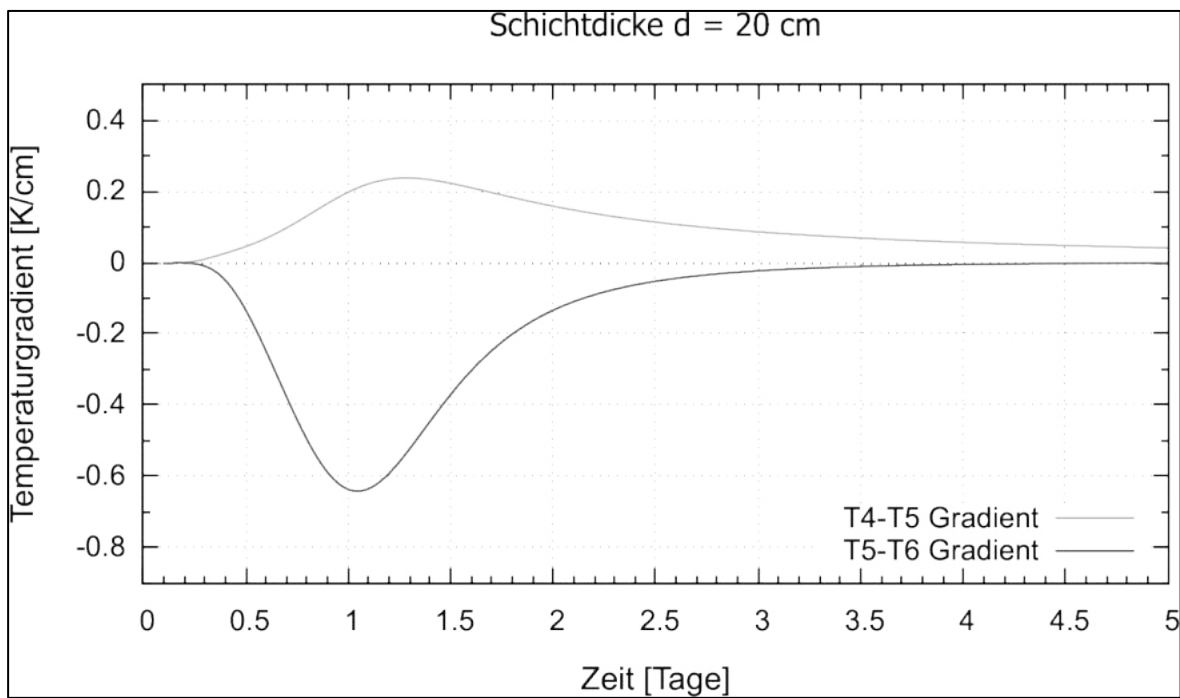


Abbildung 261: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke $d = 20$ cm

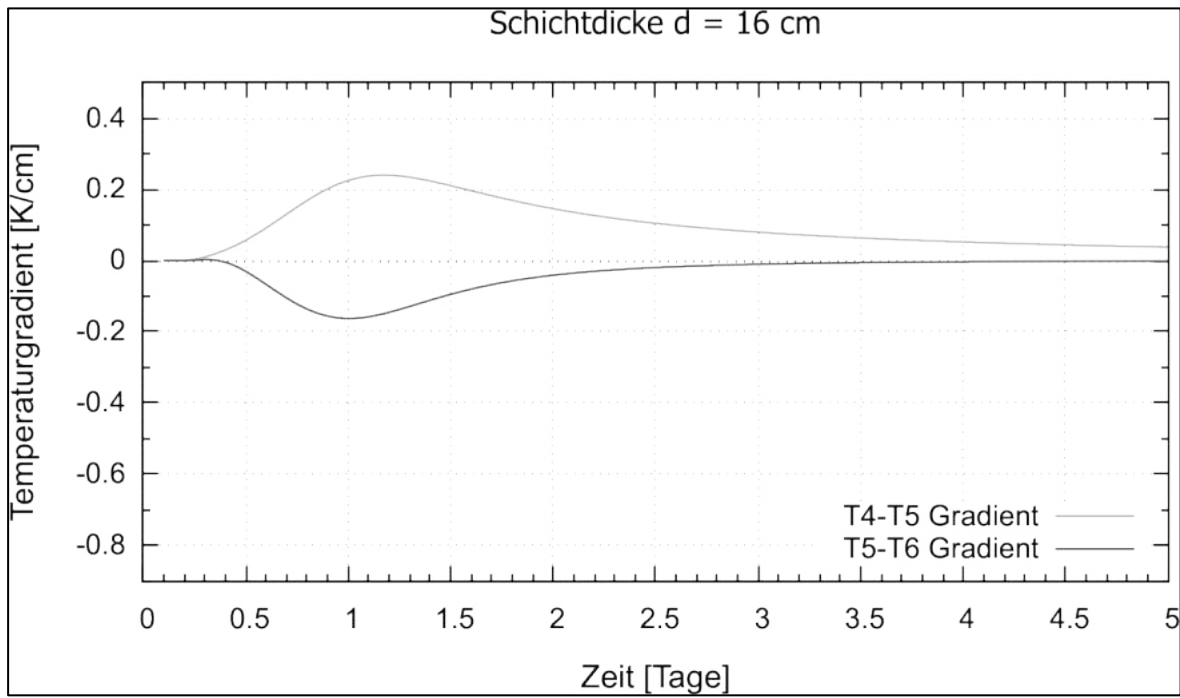


Abbildung 262: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke d = 16 cm

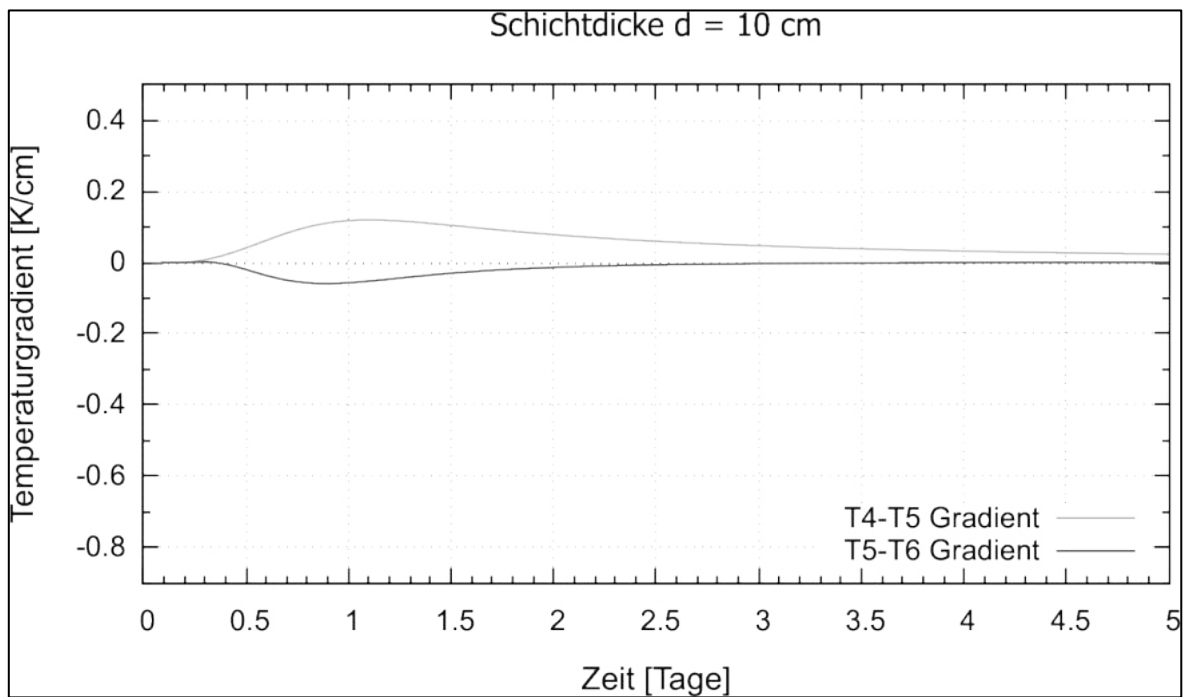


Abbildung 263: Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke d = 10 cm

Minimale Hauptspannung an 6 History-Zonen)

Berechnung der minimalen Hauptspannung an 6 Zonen z1, ..., z6
(Lage entspricht ungefähr den Knotenpunkten T1, ..., T6)

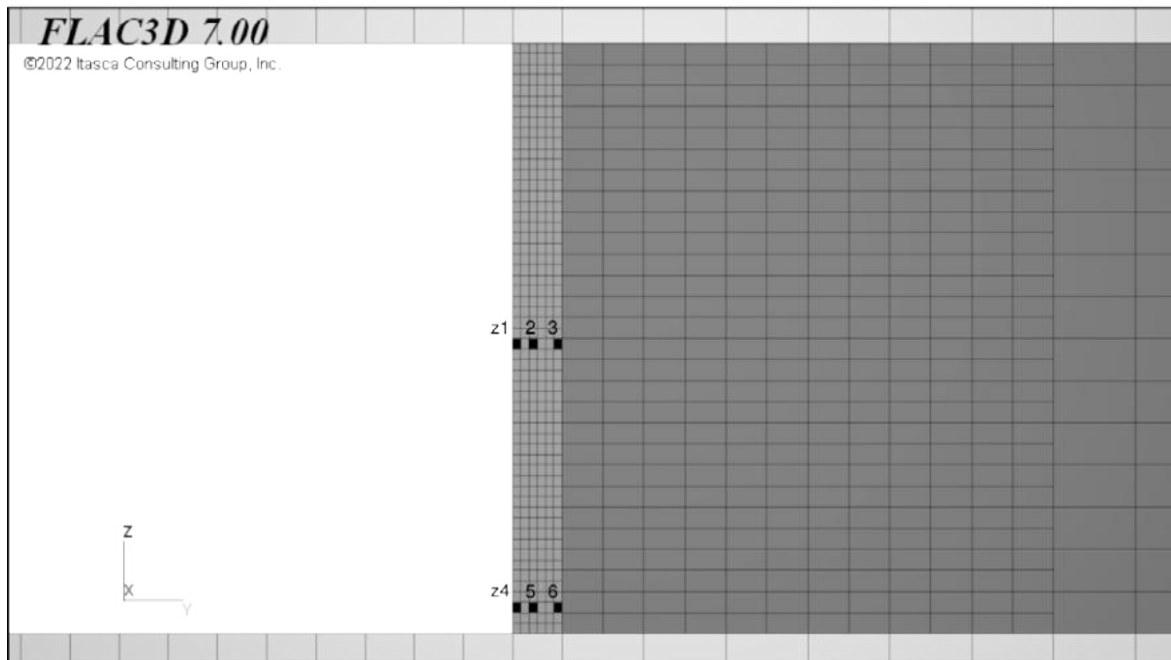


Abbildung 264: Lage der 6 Zonen, an denen History-Kurven der minimalen Hauptspannung aufgezeichnet werden

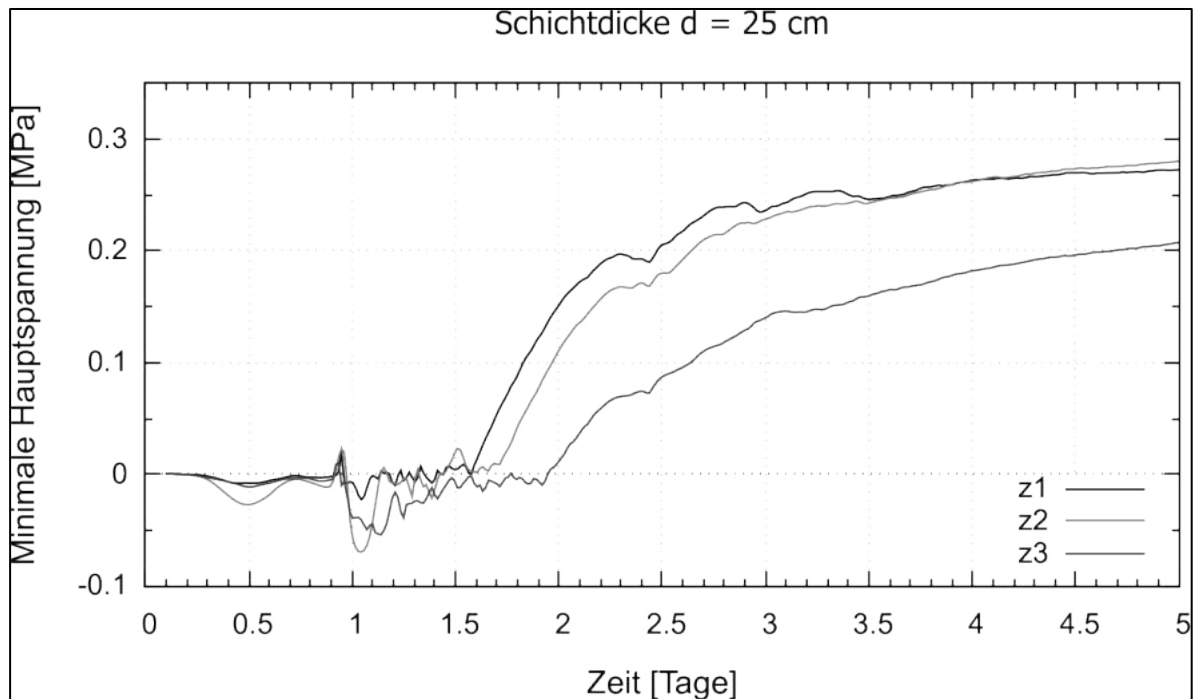
Minimale Hauptspannung an Zonen z1, z2, z3

Abbildung 265: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 25 cm

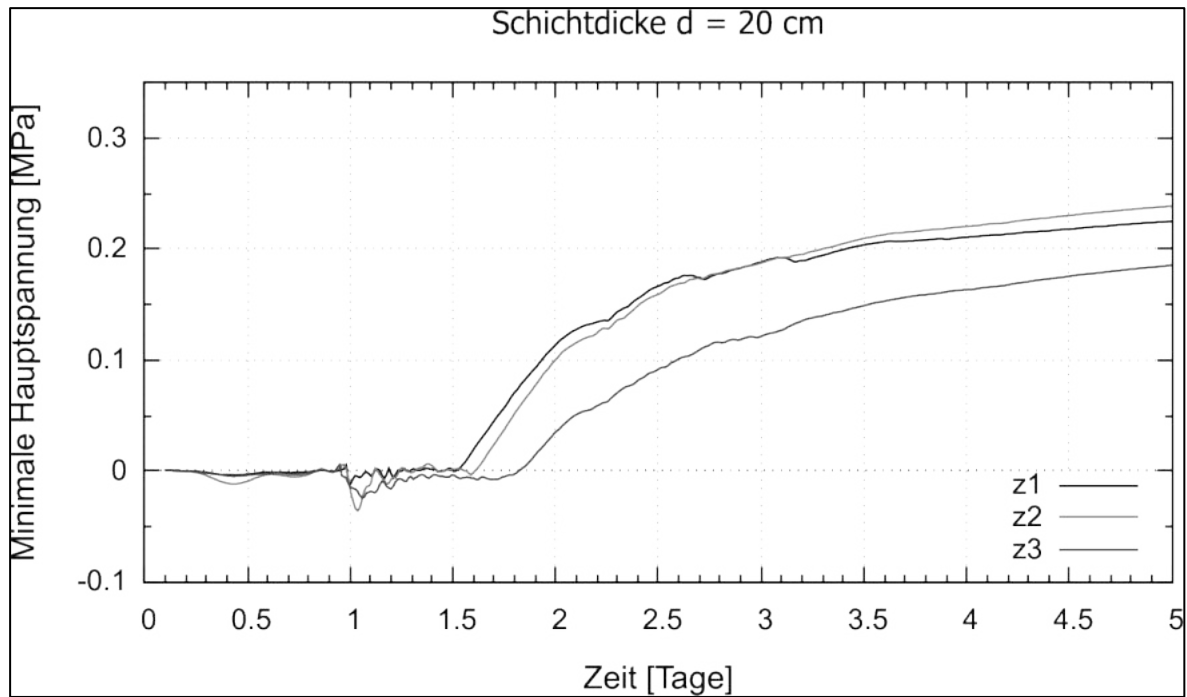


Abbildung 266: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 20 cm

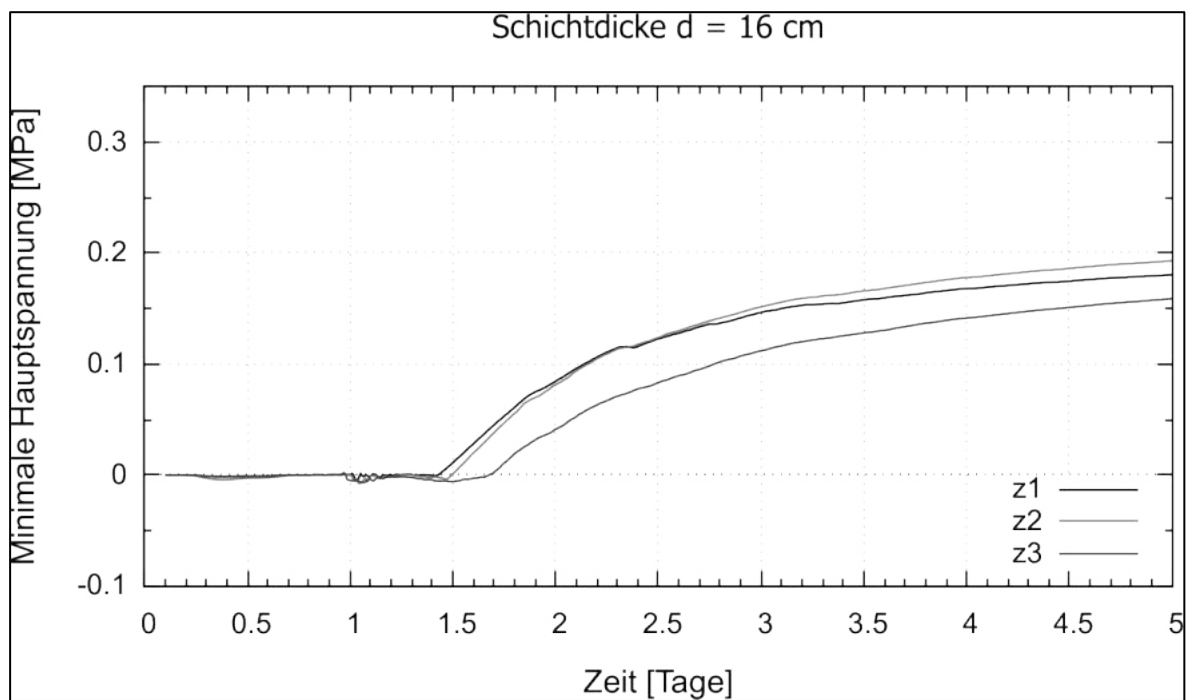


Abbildung 267: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 16 cm

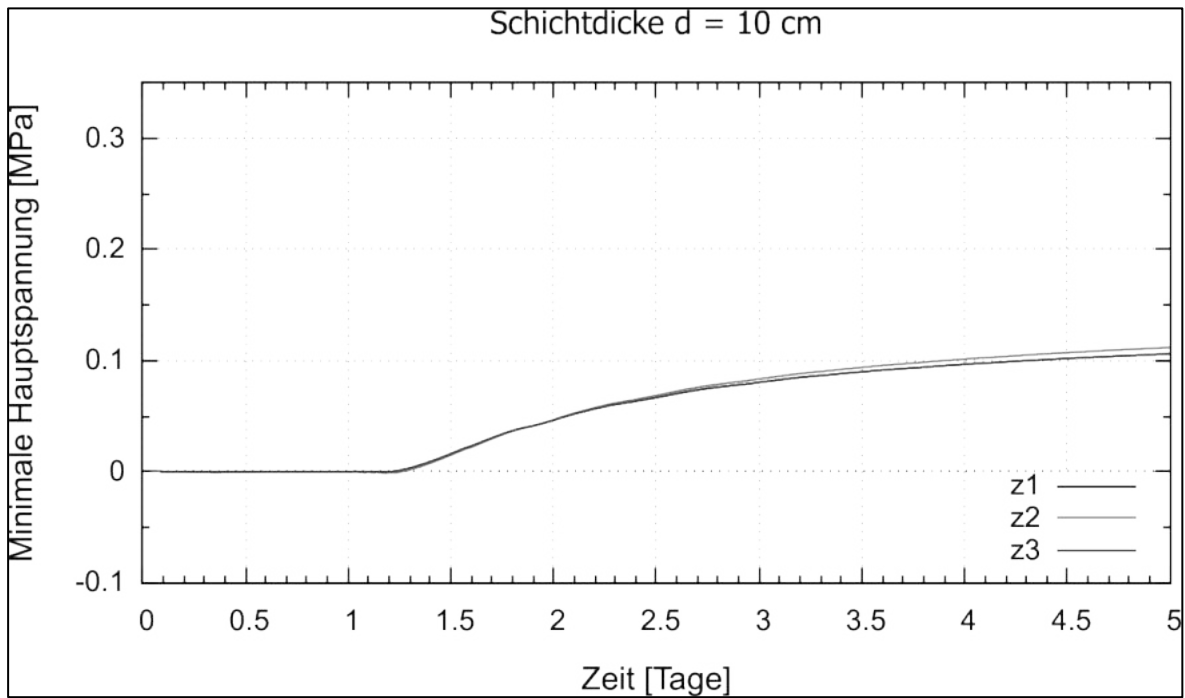


Abbildung 268: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 10 cm

Minimale Hauptspannung an Zonen z4, z5, z6

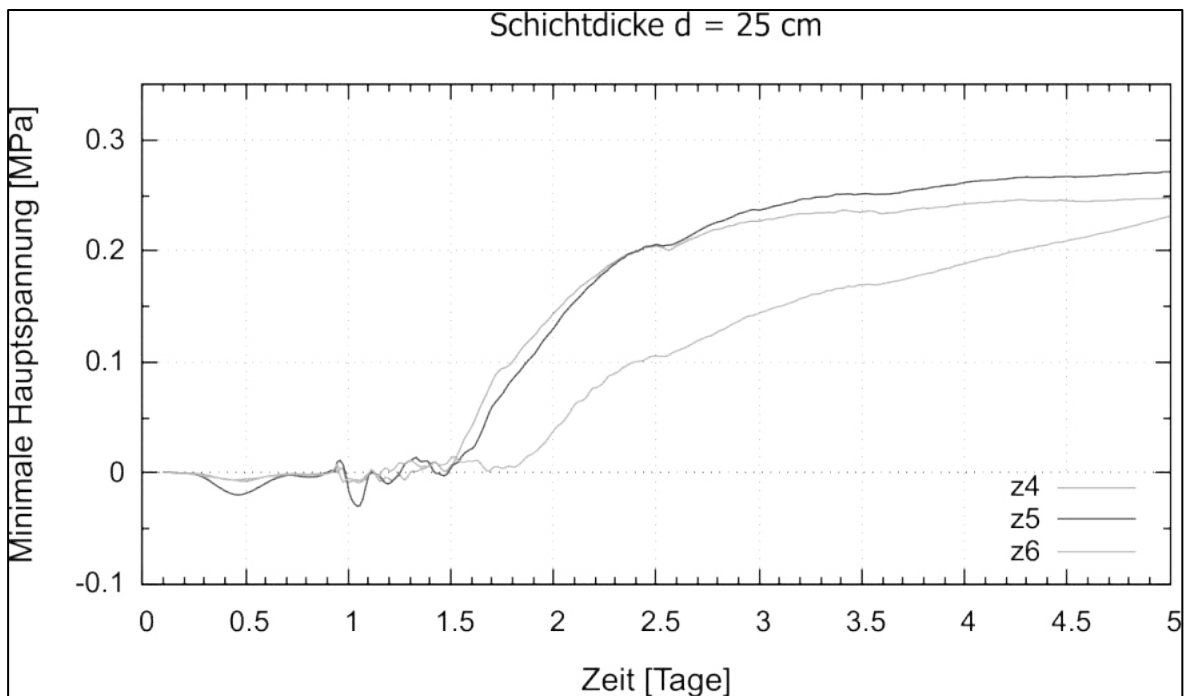


Abbildung 269: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 25 cm

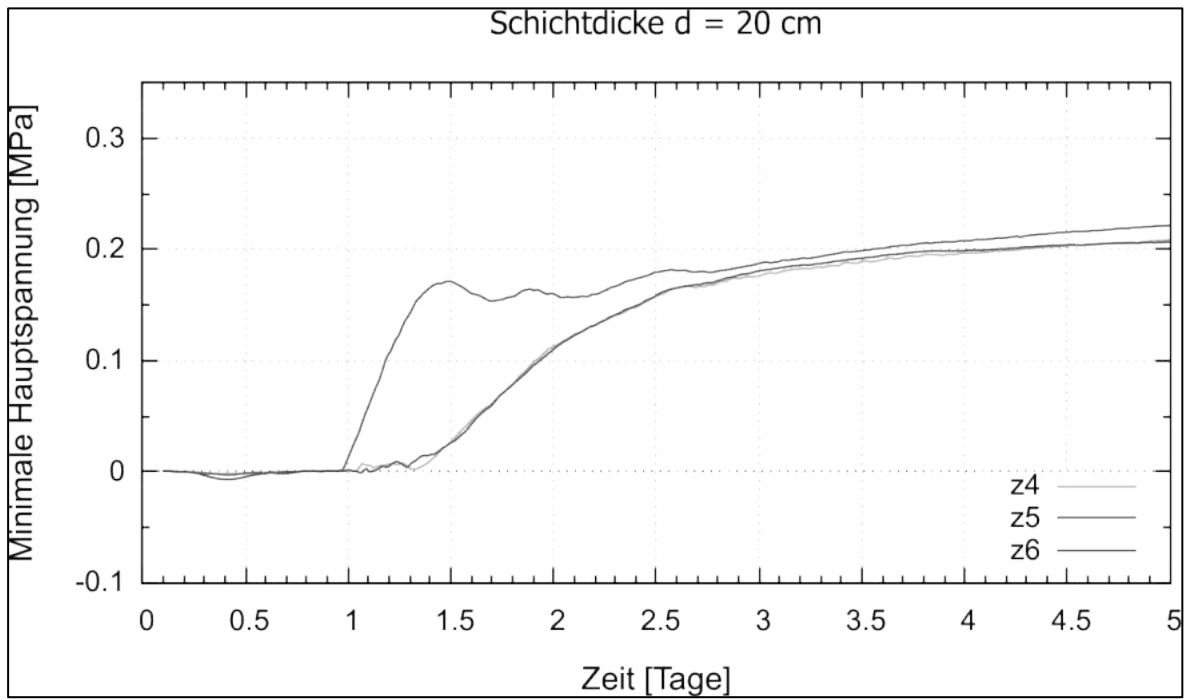


Abbildung 270: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 20 cm

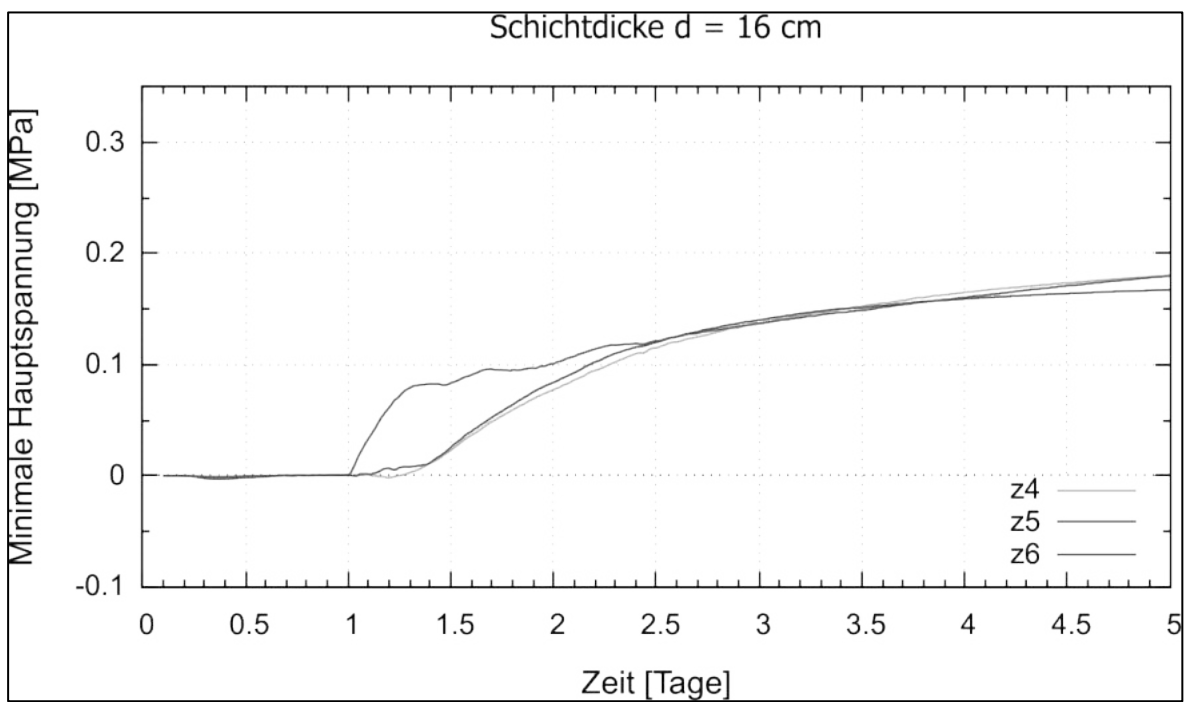


Abbildung 271: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 16 cm

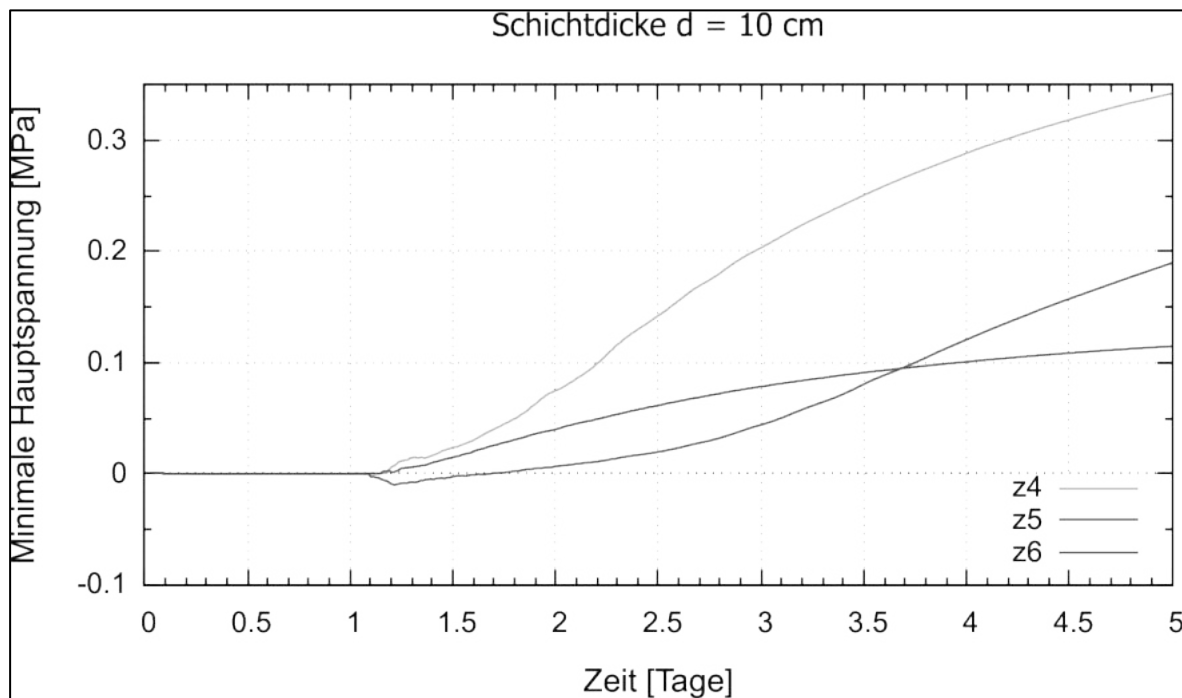


Abbildung 272: Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 16 cm

Einfluss der Reaktivität des MgO auf den Temperaturverlauf

Erst relativ spät – bei der detaillierten Auswertung des Versuches GSBV4 – wurde ein Zusammenhang zwischen der Reaktivität der MgO-Lieferware (ZT-Wert) und der Zeitspanne bis zum Erreichen des Temperaturmaximums im MgO-Spritzbeton erkannt. Es hat sich herausgestellt, dass die Reaktivität der MgO-Lieferware einen entscheidenden Einfluss auf die Dauer der Wärmeentwicklung hat.

Im GSBV4 wurde die Charge G10/74 verwendet, die einen ZTW = 350 s hat. Auffällig war, dass hier das Maximum der Temperaturentwicklung relativ spät war – im Mittel 20 Stunden nach Beginn der Betonage. Die MgO-Lieferware mit niedrigerer Reaktivität führte zu einer relativ späten Wärmefreisetzung. Im GSBV3 wurde die Charge G10/54 mit einem ZTW = 186 s verwendet. Im GSBV1 wurde die Charge G10/16 mit ZTW = 200 s eingesetzt.

Stellt man die Zeitdauer vom Beginn der Betonage bis zum Temperaturmaximum in Abhängigkeit des ZT-Wertes der eingesetzten MgO-Lieferware (eigene Messungen des Institutes für Anorganische Chemie) dar, ergibt sich folgendes Bild in Abbildung 273.

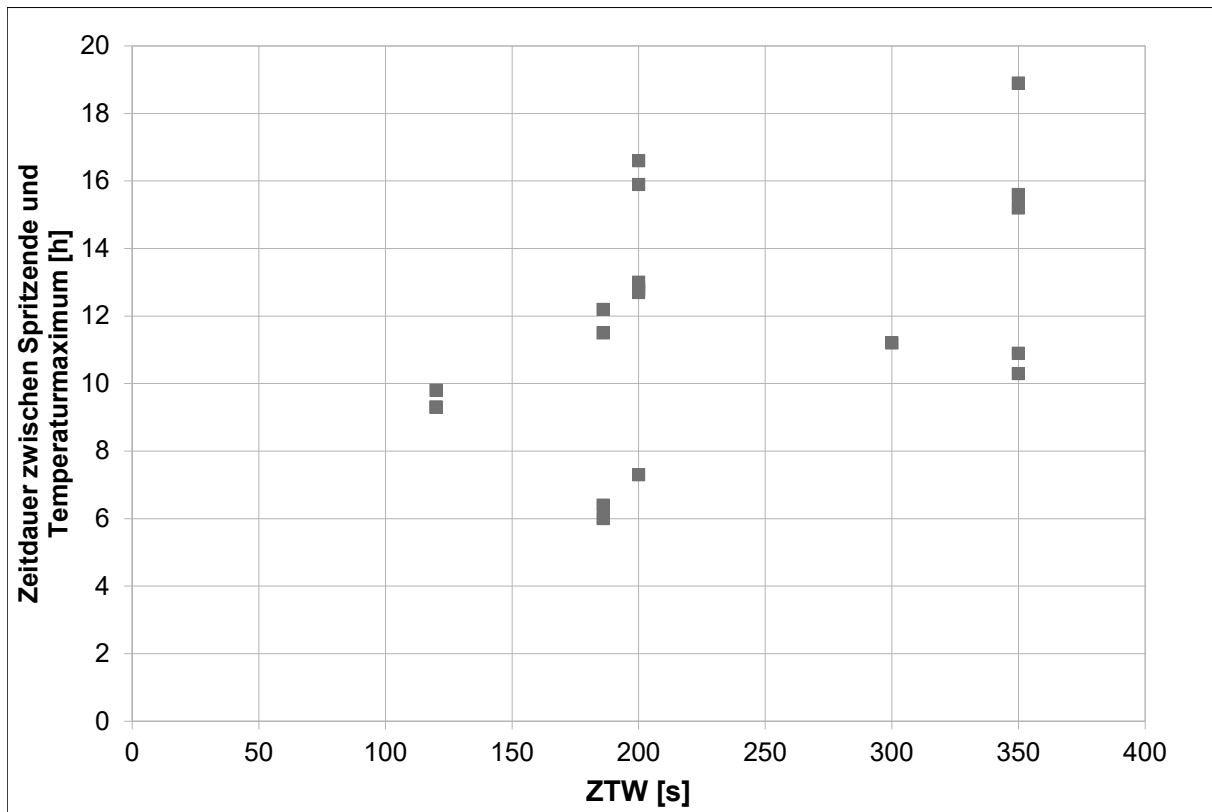


Abbildung 273: Abhängigkeit der Zeitdauer Spritzende bis zum primären Temperaturmaximum in der Spritzbetonschicht vom ZTW

Bei der Identifizierung des Temperaturmaximums ist im Temperaturverlauf das erste Maximum zu wählen. Bei den in situ Spritzversuchen sind in einer Schicht weitere Maxima (sekundäre, tertiäre) beobachtet worden, deren Temperatur höher sein kann als beim primären Maximum. Nachfolgende Maxima können beispielsweise in der 1. Schicht auftreten, wenn diese noch nicht vollständig abgekühlt ist und in der 1. Schicht die Wärmemenge aus der nachfolgenden 2. Schicht (sekundäres Maximum) und nachfolgend die Wärmemenge aus der darauf folgenden 3. Schicht (tertiäres Maximum) beobachtet werden kann. Diesen Sachverhalt zeigt Abbildung 274. Man sieht, dass aufgrund der kumulativen Wärmemengen die Temperatur in der 1. Spritzschicht beim sekundären Maximum (infolge der benachbarten 2. Schicht) und beim tertiären Maximum (infolge der darauf folgenden 3. Schicht) wesentlich höher ist als beim primären Maximum. Die in den in situ Versuchen in den Spritzschichten gemessenen Maximaltemperaturen kommen also durch solche Überlagerungen zu Stande.

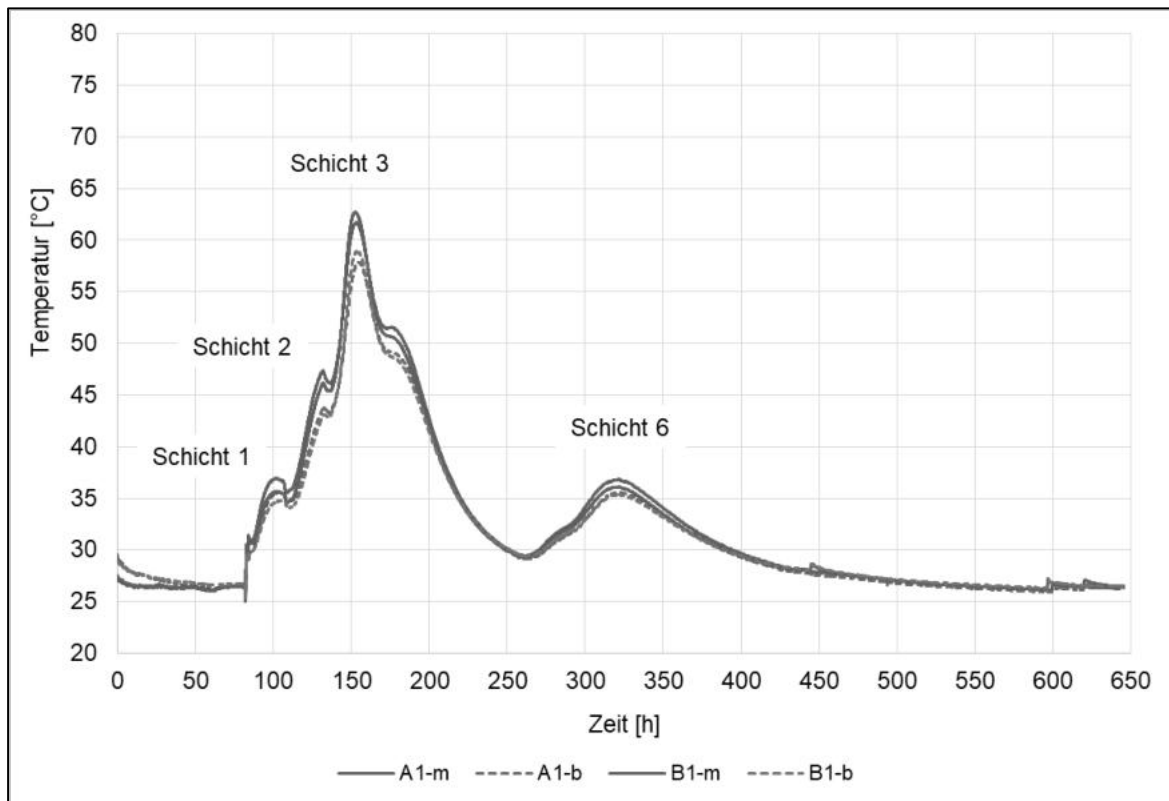


Abbildung 274: Abhängigkeit der beim Spritzversuch GSBV4 in der ersten Spritzschicht von 4 Thermoelementen A1-m, A1-b, B1-m, B1-b im Verlauf der gesamten Versuchszeit gemessenen Temperatur

Obwohl die in Abbildung 273 dargestellten Ergebnisse hinsichtlich der Zeitdauer vom Beginn der Betonage bis zum primären Temperaturmaximum großen Schwankungen unterliegen, erscheint es sicher, dass mit Zunahme des ZT-Wertes (Abnahme der Reaktivität) sich die Zeitdauer vom Beginn der Betonage bis zum primären Temperaturmaximum erhöht. Sicher ist, dass beim GV2 die Zeitdauer vom Beginn der Betonage bis zum primären Temperaturmaximum mit den Einzelwerten 9,3 h; 9,8 h und 9,3 h einem mittleren ZTW = 120 s entsprachen. In aktuellen Wiederholungsmessungen des ZT-Wertes der aus dem Jahre 2008 stammenden Rückstellprobe lagen die Einzelwerte zwischen 115 s und 125 s. Es handelte sich um ein relativ aktives MgO der Sorte G75.

Im ungünstigen Fall einer weniger reaktiven MgO-Charge (hoher ZT-Wert) verschiebt sich das Temperaturmaximum nach hinten, so dass bei der nächsten Spritzschicht der "alte" MgO-Spritzbeton noch nicht abgekühlt ist. Dies führt zu einer Überlagerung der Wärmefreisetzung und somit zu einer ansteigenden Temperatur, wie in Abbildung 274 als Beispiel dargestellt. Damit die Spritzschicht bis zur nächsten Arbeitsschicht abkühlen kann, sind kleine Zeitspannen < 10 Stunden erforderlich. Dazu muss der ZT-Wert der MgO-Lieferware wahrscheinlich im Bereich zwischen 100 s und 150 s liegen (Referenz GV2 – siehe Abbildung 238). In diesem Fall sind Überlagerungen mit Mehrfachtemperaturmaxima weniger wahrscheinlich.

Diese Anforderung führt zu einer Einschränkung bei der Beschaffung des MgO-Bindemittels. Die Alternative – längere Wartezeiten zwischen dem Spritzen bzw. kleinere Spritzmächtigkeiten – sollten auch in die Betrachtung einbezogen werden. Für die Festlegung der Schichtdicke am konkreten Verschlussbauwerk sollten also sowohl technische Belange als auch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen berücksichtigt werden.

8 Synthese/ Wissenschaftliches Programm für ein in situ-Verschlussbauwerk aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz (AP4)

8.1 Synthese des Kenntnisstandes zu MgO-Spritzbeton

8.1.1 Bewertung der Eignung von MgO-Spritzbeton für ein HAW-Endlager im Steinsalz aus geochemischer Sicht im Zusammenhang mit den Veränderungen infolge Phasenumwandlung bei Lösungszutritt

Bei einem HAW-Endlager im Steinsalz müssen an den Baustoff von geotechnischen Barrieren spezielle Anforderungen gestellt werden. Der Baustoff muss

- a) eine ausreichende mechanische Festigkeit aufweisen,
- b) eine möglichst geringe Permeabilität aufweisen,
- c) geochemisch Langzeitbeständigkeit sein,
- d) technologisch „einfach“ herstellbar sein, so dass die Schwankungsbreite seiner Eigenschaften möglichst gering ist.

Die genannten vier Punkte sind die wesentlichen Anforderungen. Ein Magnesiabaustoff kann nach verschiedenen „Rezepturen“ hergestellt werden. Die in diesem Forschungsvorhaben untersuchte Spritzbetonrezeptur mit 5-1-8 Bindemittelphase erfüllt diese Voraussetzungen bzw. sie kann die Voraussetzungen erfüllen, wenn der 5-1-8-Spritzbeton qualitativ entsprechend hergestellt ist.

Der Magnesiabaustoff mit 5-1-8-Phase ist gegenüber Salz und salzhaltigen Lösungen langzeitbeständig, **wenn er bei Lösungszutritt eingespannt ist, d.h. eine Volumenexpansion bei Lösungszutritt weitestgehend verhindert wird.**

Der Nachweis der Langzeitbeständigkeit des Magnesiabaustoffes wird über das thermodynamische Löslichkeitsgleichgewicht der 3-1-8-Bindemittelphase (einschließlich inerter Zuschläge) in NaCl-gesättigten Salzlösungen ab 0,5 molalen MgCl₂-Konzentrationen geführt. Das schließt auch IP21-, IP22-, Q- oder auch R-Lösungen ein [28].

Im abgebundenen MgO-Spritzbeton ist die 5-1-8-Bindemittelphase ausgebildet. Der Nachweis der Langzeitbeständigkeit bei Lösungszutritt ist dann über den Integritätserhalt des Bauwerkes einschließlich des thermodynamischen Löslichkeitsgleichgewichtes zu führen. Es ist dabei nachzuweisen, dass bei Lösungskontakt die Umwandlung der 5-1-8- in die 3-1-8-Bindemittelphase zu keiner Volumenvergrößerung des Spritzbetons führt, wodurch sich die Permeabilität erhöhen würde und die Festigkeit erheblich sinken würde. Um eine Volumenvergrößerung zu verhindern, muss der Spritzbeton bei Lösungszutritt möglichst unverschieblich eingespannt sein. Wie für MgO-Spritzbeton (an Kernproben sowie dem Bauwerk GV2 selbst) nachgewiesen, kommt es bei Lösungszutritt nur im Lösungskontaktbereich lokal zu Gefügeveränderungen. Diese Gefügeveränderungen können die hydraulischen Eigenschaften des Spritzbetons sogar noch verbessern (die Permeabilität sinkt), wenn der Spritzbeton im Wirtsgestein vollständig eingespannt ist. Hintergrund ist der mit der Bindemittelphasen-Umbildung verbundene Festphasenzuwachs im Porenraum des Bauwerkes. Damit verringert sich die Lösungsporeabilität so stark, dass das Bauwerkgefüge als lösungsundurchlässig angesehen werden kann. Mit der dann letztendlich durch den Lösungskontakt gebildeten 3-1-8-Phase hat sich dann wiederum ein thermodynamisches Löslichkeitsgleichgewicht eingestellt. Der MgO-Spritzbeton ist damit insbesondere zur Errichtung von lösungszutrittsverhindernden geotechnischen Barrieren in einem HAW-Endlager geeignet. Er kann aufgrund seiner hohen Festigkeit auch eine Widerlagerfunktion einnehmen.

8.1.2 Weiterentwicklung des geomechanischen Kenntnisstandes für den Integritätsnachweis von MgO-Spritzbeton-Abdichtungen im Steinsalz

Ein wesentliches Untersuchungsziel des Vorhabens war die Erweiterung der Datenbasis für die hydro-mechanischen Integritätsnachweise für Abdichtungen im Steinsalz aus MgO-Spritzbeton, wie sie in einem Endlager-Genehmigungsverfahren erforderlich sind.

Für die mittels numerischer Verfahren durchzuführenden Nachweisrechnungen sind zunächst allgemein die Festigkeitseigenschaften des MgO-Spritzbetons relevant, der als kompakte Matrix sowie mit den Bau-spezifischen Betonierübergängen vorliegt. Letztere können potenzielle Schwächeflächen darstellen, weshalb sie explizit zu untersuchen sind. Weiterhin bildet die Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge eine wichtige hydraulische Wegsamkeit und/oder hydro-mechanische Versagensfläche. In der zeitlichen Entwicklung des Bauwerks bilden sich, zunächst unabhängig vom verwendeten Baustoff und der Einbringtechnologie, aufgrund der wirkenden Konvergenz des Salzgebirges prinzipiell nachfolgend genannte unterschiedliche Spannungszustände aus. Diese müssen bzgl. potenzieller Schädigungsprozesse oder Wegsamkeiten in geomechanischen Simulationsrechnungen bewertet werden, wofür jeweils Parameter benötigt werden:

- (1) **kleine Spannungsdeviatoren in der Mitte eines Dammbauwerks:** diese resultieren aus dem viskoplastischen Kriechen des umgebenden Salzgesteins, wenn das Bauwerk dreidimensional mit einem resultierenden, nahezu isostatischen Spannungszustand eingespannt wird.
 - a) Zur Eignungsbewertung eines Baustoffs werden zunächst die ein- und triaxiale Druckfestigkeit herangezogen, die (im Vergleich zu den Festigkeitseigenschaften des umgebenden Salzgesteins) eine Einordnung in steife oder weichere Dicht- oder Widerlagerelemente erlaubt.
 - b) Infolge des Aufkriechens des Salzgebirges auf den Dammkörper kommt es gleichzeitig zu einer Erhöhung der Normalspannung auf die Kontaktfuge, die in Verbindung mit der angrenzenden Auflockerungszone im Gebirge als hydraulische Schwächezone wirkt.
Dies wurde auch für den GV2 im Ergebnis einer mehr als 10-jährigen Messreihe untersucht (vgl. Abschnitt 5.1.6), wobei allerdings der gemessene Spannungszustand im Dammbauwerk sowie auf der Kontaktfuge kleiner war, als im Ergebnis der ursprüngliche Prognoserechnungen erwartet worden war¹⁹ [3].
Die Spannungsentwicklung auf der Kontaktfuge hängt wesentlich von der Steifigkeit des Baustoffs und dessen zeitabhängigen Kompaktionskriechen ab, was hier auf Basis von Relaxationstests untersucht wurde.
- (2) möglicherweise **etwas größere Spannungsdeviatoren im Bereich der Dammstirnflächen:** hier können signifikante Zugspannungen auftreten, die zu Abschalungen führen können, wenn als Sicherungsmaßnahme nicht zusätzlich noch Versatz gegen die Ortsbrust gestapelt wird. Der Versatz muss eine dem MgO-Beton vergleichbare Steifigkeit besitzen, um die Ausbildung von Zugspannungen im MgO-Beton zu verhindern.
Hier ist vor allem die interne Haftzugfestigkeit der einzelnen Spritzbetonabschnitte von Relevanz, weil sie als potenzielle Schwächeflächen in axialer Richtung die Festigkeit herabsetzen können. Dabei wird allgemein das Szenario eines senkrecht geschichteten Kartenstapels herangezogen, der schichtartig versagen könnte.
Für die Bewertung dieser Prozesse ist die Kenntnis (a) der Haftzugfestigkeit von Betonierabschnittsgrenzen sowie (b) deren Scherfestigkeit von Relevanz.

¹⁹ Ursache für dieses gegenüber dem Steinsalzgebirge abweichende Verhalten ist, wie in [35] ausgeführt, das Vorliegen einer Verwitterungszone (VWZ) in der extrem löse-empfindlichen Teutschenthaler Carnallit-Kontur, die sich beim Aufkriechen sehr weich verhält und somit keinen Widerstand bietet.

- (3) **Spannungsentwicklung in der Kontaktfuge** bzw. der angrenzenden ALZ: Mit dem Aufkriechen des Salzgebirges auf den Baustoffkörper bildet sich im Bereich der Kontaktfuge und der angrenzenden Auflockerungszone eine Normalspannung aus, die zu einer Rückbildung dieser Schwächezone führt.
Für den hydraulischen Integritätsnachweis auf Basis des Minimalspannungskriteriums ist neben der Matrixsteifigkeit (s. Relaxationsverhalten oben) das Anbindeverhalten (Kohäsion) zwischen Baustoff und dem Salzgebirge relevant, weil es als zusätzliche Haftzugfestigkeit einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn gegen ein hydraulisches Versagen liefert. Für die Untersuchung wurden spezielle Prüfkörper (Sandwichproben mit axialem Kontakt von Baustoff und Steinsalz) hergestellt und im direkten Zugversuch geprüft.
- (4) Entwicklung von **Scherspannungen im Übergang Salzgebirge/Baustoff**: Sie entstehen, wenn das Bauwerk unter Lösungsdruck kommt und es damit über eine axiale Kraftkomponente hydraulisch beansprucht wird. An Proben, die analog zu den unter (3) genannten Proben hergestellt wurden, wurden direkte Scheruntersuchungen an orientierten Sandwich-Proben durchgeführt.

Im Ergebnis der verschiedenen Belastungsregime müssen unterschiedliche Materialeigenschaften der untersuchten MgO-Baustoffe bekannt sein, die jeweils anforderungsspezifisch im Rahmen des Vorhabens untersucht und bezüglich ihrer Repräsentativität und Eignung für die Integritätsanalyse eingeschätzt wurden. Damit lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

Zu (1): Festigkeit des MgO-Spritzbetons (vgl. Abschnitt 6.7)

- a) Zur Bestimmung der Festigkeit von MgO-Spritzbeton mit Silikatzuschlag liegen Daten von neu gewonnenen Kernproben aus dem Bauwerk GV2 und dem ersten Großspritzbetonversuch GSBV1 vor; sowie bei Verwendung von Salzgrus als Zuschlag aus dem GSBV3 und 4. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede:
- Die einaxiale Druckfestigkeit der Proben aus dem GV2-Damm mit der 5-1-8-Variante sind entsprechend den früheren Ergebnissen erwartungsgemäß extrem hoch, d.h. die aus den Mehrstufen-Festigkeitstests extrapolierte, uniaxiale Festigkeit $\sigma_{1\text{-uniaxial}}$ ist größer als 70 MPa. Gleichzeitig verhält sich das Material extrem spröde und auch die Reibungswinkel sind als Folge des Kieszuschlages gegenüber den anderen Chargen deutlich größer.
 - Die einaxiale Druckfestigkeit mit der neuen Spritzbetonrezeptur mit Salzzuschlag (GSBV3 und 4) ist niedriger als die der D4-Rezeptur (GV2), obwohl es sich ebenfalls um eine 5-1-8-Baustoffrezeptur handelt. Die für das entsprechende Variationsfeld der neuen Spritzbeton-Rezeptur mit Salzzuschlag abgeschätzte einaxiale Festigkeit σ_1 liegt zwischen 30 MPa und 65 MPa (abgesehen von kleinen Qualitätsunterschieden zwischen beiden Großversuchen). Sie entspricht damit vom Festigkeitsspektrum her dem Festigkeitsspektrum der als eher „gering fest“ eingestuften 3-1-8-MgO-Beton-Baustoffvariante.
 - **Insgesamt ist die Festigkeit der neuen 5-1-8-Rezeptur mit Salzzuschlag niedriger als die Festigkeit des GV2-Spritzbetons, bei dem Silikatzuschlag verwendet wurde.** Dies würde die frühere Annahme widerlegen, dass ausschließlich die Bindemittelzusammensetzung (hier dominierend die 5-1-8-Phase) für die Festigkeit entscheidend ist. Bei dem neuen MgO-Spritzbeton der Versuche GSBV3 und GSBV4 dominiert offenbar das plastische Verformungsverhalten des mittelkörnigen Salzzuschlages, was den Effekt der Bindemittelmatrix überlagert.
➔ Diese Beobachtungen und Einschätzungen sind zunächst vorläufig und müssen noch durch weitere Untersuchungen abgesichert werden.

- b) Das Relaxationsverhalten von Proben aus dem GV2 sowie den neuen Ansätzen aus dem GSBV3 und GSBV4 unterscheidet sich (in Analogie zum Festigkeitsverhalten, s. oben) deutlich. Während das Material aus dem GV2 nur sehr gering relaxiert (hier bis auf ca. 75 % des Spannungsausgangswertes), wird zeitabhängig bei den Spritzbetonproben mit Salzzuschlag eine deutliche Abnahme auf mehr als die Hälfte des Spannungsausgangswertes beobachtet. Allerdings relaxiert das Material nicht auf 0, wie viele MgO-Betonproben auf Basis der 3-1-8-Rezeptur.

Insgesamt ist MgO-Spritzbeton mit Salzzuschlag weniger fest und relaxiert stärker als ein MgO-Beton mit Silikatzuschlag. Damit sind die mechanischen Eigenschaften des neuen Baustoffs den Eigenschaften des Salzgebirges ähnlicher, als wenn ein Silikatzuschlag verwendet würde. In der Konsequenz folgt, dass mit einem MgO-Spritzbeton mit Salzzuschlag kein steifer Einschluss als Dammkörper im Salzgebirge vorliegen würde, der zu ungünstigen Spannungskonzentrationen führen könnte.

➔ Eine abschließende Einschätzung, inwieweit die „modifizierte Spritzbeton-Rezeptur mit Salzzuschlag“ konzeptionelle Sicherheitsvorteile bietet, lässt sich nur auf Basis von Simulationsrechnungen führen, bei denen auch unterschiedliche Standortsituationen (z.B. Teufenlage, Konvergenzverhalten) des umgebenden Salzgebirges mit einbezogen werden.

Zu (2): Haftzugfestigkeit von Betonierabschnittsgrenzen (BAG) (s. Abschnitt 6.7.2):

Für die Bewertung der Haftzugfestigkeit von BAG in Spritzbeton-Dämmen liegen Ergebnisse an neuen Bohrkernen aus dem GV2-Damm sowie aus den jeweiligen Großspritzbetonversuchen vor:

- Die Ergebnisse von direkten Haftzugversuchen aus dem GV2 können unterschiedlichen Festigkeitsklassen zugeordnet werden, wobei Ergebnisse von beim Bohren vorgeschädigten Proben nicht repräsentativ sind. Ergebnisse für die Haftzugfestigkeit, die für zukünftige Modellrechnungen herangezogen werden können sind:
 - intakte BAG (mutmaßlich nur geringe lokale Fehlstellen) oder Matrix: ca. 2 MPa < σ_T < 4,2 MPa
 - kompakte Spritzbetonmatrix: σ_T : > 4,2 MPa (kleinster Messwert), Maximalwerte bis ca. 6,7 MPa
Anzumerken ist noch, dass die Ergebnisse von konventionellen Spaltzugversuchen (Brasilientest) nicht repräsentativ für die Haftzugfestigkeit von BAG sind, weil wegen der ungünstigen Spannungsgeometrie damit nicht die Eigenschaften der Schwächefläche bestimmt werden.
- Die Ergebnisse zur gemessenen Haftzugfestigkeit an Proben aus den Großspritzbetonversuchen GSBV1, 3 und 4 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:
 - An Proben aus dem GSBV1 wurde mit einem Medianwert von 0,45 MPa die relativ niedrigste Haftzugfestigkeit gemessen. Offenbar sind hier die Abbindereaktionen des Baustoffs noch nicht abgeschlossen, weshalb die hier erreichte Festigkeit deutlich niedriger als bei den Proben aus dem GV2 ist.
 - Beim GSBV3 und GSBV4 wurde eine Rezeptur mit Salzzuschlag eingesetzt. Im GSBV4 wurde die Spritzbeton-Technologie optimiert; infolgedessen war die mittlere Festigkeit höher als im GSBV3. Die Haftzugfestigkeit lag meist zwischen 1,9 MPa und 2,6 MPa. Möglicherweise fanden hier auch noch Abbindereaktionen statt, die festigkeitserhöhend wirkten.
 - Als Sonderfall für den GSBV1 (Schicht 5) wurde auch untersucht, wie sich Chlorarnit auf die Festigkeit auswirkt (vgl. Abschnitt 7.4.1). Dabei zeigte sich, dass die Festigkeit im Vergleich zu den angrenzenden Spritzbeton-Chargen signifikant abgemindert war ➔ hier besteht somit noch Untersuchungsbedarf.

Insgesamt können BAG die Matrixfestigkeit im Dammkörper lokal herabsetzen, d.h. die Zugfestigkeit und die Scherfestigkeit an den entsprechenden Grenzflächen zwischen den verschiedenen Spritzbetonschichten kann gegenüber MgO-Beton ohne BAG reduziert sein. Insgesamt ist die gemessene Zugfestigkeit jedoch noch ausreichend hoch und entspricht in ihrer Bandbreite annähernd der Zugfestigkeit von Steinsalz, die zwischen 0,5 MPa und ca. 2,5 MPa variieren kann (abhängig von der Vorschädigung, vgl. [33]).

→ Für eine abschließende Bewertung der Relevanz von Betonierabschnittsgrenzen sind weitergehende numerische Modellrechnungen erforderlich, die auf Basis der hier vorliegenden Daten realistische Belastungssituationen simulieren.

Zu (3): Haftzugfestigkeit von MgO-Spritzbeton auf Steinsalz (vgl. Abschnitt 6.7.2):

Für die Untersuchung der Haftzugfestigkeit vom MgO-Spritzbeton auf Steinsalz wurden vor Ort im Rahmen der Großspritzversuche jeweils Sandwichproben (Aufspritzen von MgO-Beton auf gebrochene Steinsalzkerne) verwendet. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Die Ergebnisse der Haftzugversuche zeigen nur eine geringe Streuung. Die Haftzugfestigkeit der beim GSBV3 und GSBV4 hergestellten Sandwichproben unterscheidet sich kaum. Es gibt Hinweise, dass mit zunehmender Standzeit die Haftfestigkeit noch zunimmt.

→ Untersuchungsgegenstand für Folgevorhaben

- **Die Anbindung von MgO-Beton an Steinsalz ist generell gut, was durch Haftfestigkeit, die in der Größenordnung der Zugfestigkeit von aufgelockerten Salzproben liegt, belegt wird.**

- Allerdings weist die Spritzbetonrezeptur mit Salzzuschlag eine geringere Haftzugfestigkeit auf. Sie liegt etwa bei 40 % der Haftzugfestigkeit der GV2-Rezeptur auf Steinsalz. Mögliche Ursachen sind möglicherweise geringere Anlöseeffekte auf der Steinsalzoberfläche.

→ Untersuchungsgegenstand für Folgevorhaben

Auffällig ist, dass beim Zugversuch der Spritzbeton teilweise auch innerhalb des Spritzbetons versagte (also nicht an der Grenze Spritzbeton-Steinsalz), was auf eine etwas geringere Festigkeit des Baustoffs hindeutet (s. oben).

Zu (4): Scherfestigkeit von MgO-Spritzbeton auf Steinsalz (vgl. Abschnitt 7.3.3):

Für die Untersuchung der Scherfestigkeit vom MgO-Spritzbeton auf Steinsalz wurden ebenfalls Sandwichproben verwendet (s. oben). Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Über eine Regressionsanalyse wurden aus den Einzelwerten der Scherversuche die Mohr-Coulomb-Festigkeitsparameter der Trennfläche zwischen Steinsalz und MgO-Spritzbeton wie folgt berechnet:

$$\text{Peakfestigkeit: } \varphi_{\text{Trennfläche}} = 50^\circ \quad c_{\text{Trennfläche}} = 1,45 \text{ MPa}$$

$$\text{Restfestigkeit: } \varphi_{\text{Trennfläche}} = 35^\circ \quad c_{\text{Trennfläche}} = 0 \text{ MPa}$$

- Die hier bestimmte Scherfestigkeit für MgO-Spritzbeton auf Salzgestein entspricht (größenordnungsmäßig) früheren Ergebnissen von MgO-Beton auf Carnallit- oder Steinsalz-Oberflächen. Bei den aktuellen Spritzbeton / Steinsalz-Schertests lag die Versagensfläche direkt an der Kontaktfläche zum Baustoff, während in den Scherversuchen am Carnallit (Vorhaben CARLA [3]) die Versagensfläche zumeist im Carnallit lag.

Die festgestellte Kohäsion von ca. 1,45 MPa ist ein hoher Wert, wobei offenbar auch die etwas geringere Matrixfestigkeit der modifizierten Spritzbeton-Rezeptur (Salzzuschlag) zu beachten ist. → hier besteht noch Untersuchungsbedarf.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass für die Durchführung von orientierenden Nachweisrechnungen für MgO-Spritzbetonbauwerke ausreichende Kenndaten zur Verfügung stehen. Die vorliegende Datenbasis muss allerdings für einen konkreten Endlagerstandort spezifisch erweitert werden.

8.1.3 Bewertung der hydro-mechanischen Eigenschaften von BAG bei einem MgO-Spritzbetonstreckenverschluss

Mit in situ Gas- und Lösungspemeabilitätsuntersuchungen im GV2 und in den Spritzbetonkörpern GSBV1 bis GSBV4 wurden die Betonierabschnittsgrenzen charakterisiert.

Die Bohrungen B45 und B46 am GV2 wurden im Bereich der BAG in 1,26 m und 2,30 m Teufe von der Ortsbrust parallel zum Verlauf der BAG in das Bauwerk GV2 gestoßen. Über den Bohrlochverlauf bis in eine Tiefe von 2,30 m wurde eine in situ Gaspermeabilität von $2,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $2,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ermittelt. In der Bohrung B45 wurde in einem Versuch mit konstanter Druckbeaufschlagung über einen Zeitraum von 1750 Stunden (73 Tage) eine Lösungspemeabilität $< 1,0 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ gemessen. Über den Versuchsverlauf hat sich die Permeabilität reduziert. Das zeitabhängige Verhalten wird auf das Einsetzen sekundärer Kristallisationsprozesse der Bindemittelmatrix im Kontakt zur Salzlösung zurückgeführt (siehe Anlage 1.5).

Zur Beurteilung der strömungstechnischen Eigenschaften wurden die in situ hergestellten Spritzbetonkörper des GSBV1, GSBV3 und GSBV4 hinsichtlich der Gas- und Lösungspemeabilität untersucht. Die Ergebnisse der Gaspermeabilitätsuntersuchungen zeigen eine räumlich differenzierte Permeabilität in den Spritzbetonkörpern. Innerhalb der Betonierschichten ist von einer geringen Permeabilität entsprechend den Erfahrungen für MgO-Baustoffe auszugehen. Einzelne Betonierabschnittsgrenzen weisen eine höhere Permeabilität auf. Im Ergebnis wurde aus den in situ-Untersuchungen mit Gas längs und quer zur Spritzrichtung eine Permeabilität von $9,6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bis $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ ermittelt.

Im Ergebnis von Lösungspemeabilitätsuntersuchungen in situ im GSBV4 reduzierte sich die Permeabilität des Spritzbetonkörpers von $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ für Gas auf $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ für Salzlösung. Die Reduzierung der Permeabilität wird auf die sekundären Kristallisationsprozesse im Kontakt zwischen der Testlösung und der Bindemittelmatrix zurückgeführt.

In Laboruntersuchungen an Kernmaterial aus dem GV2 und den Spritzbetonkörpern GSBV3 und GSBV4 wurden folgende Ergebnisse zur strömungstechnischen Charakterisierung der BAG im Spritzbeton ermittelt:

- An 2 Probekörpern aus der Bohrung B 48 in die Ortsbrust des Spritzbetonbauwerkes GV2 wurden für die Betonierabschnittsgrenzen eine effektive Gaspermeabilität von $1,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $2,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ermittelt.
- An 2 Probekörpern aus den Spritzbetonversuch GSBV3 (B36) wurde für die Betonierabschnittsgrenzen eine effektive Gaspermeabilität von $4,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ und $4,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ ermittelt. An den beiden Probekörpern wurde in Langzeitversuchen mit NaCl gesättigter, MgCl₂-haltiger Lösung eine deutliche Reduzierung der initial hohen effektiven Gaspermeabilität auf $< 1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ gemessen.
- An 3 Probekörpern aus dem Spritzbetonversuch GSBV4 (B31) wurden entlang von Betonierabschnittsgrenzen eine effektive Gaspermeabilität von $4,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bis $8,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ermittelt. Aufgrund der geringen Permeabilität im Vergleich zu den Proben des GSBV3 wurde an diesen Proben die Lösungspemeabilität nicht weiter untersucht.
- An jeweils einem Probekörper aus 2 weiteren Bohrungen in den Spritzbetonversuch GSBV4 (B17, B19) wurde im Ergebnis von CT-Aufnahmen im Bereich der BAG erkennbare Wegsamkeiten vermutet. An präparierten Probekörpern aus diesen Bereichen wurde

jedoch eine effektive Gaspermeabilität von $3,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ und $5,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ und damit wiederum eine relativ geringe Permeabilität ermittelt.

- Quecksilberporosimetrieuntersuchungen zur Identifikation der Porosität im Bereich der Betonierabschnittsgrenzen im Projekt MgO-SEAL [4] ergaben keine Erhöhung der Porosität im Bereich der Betonierabschnittsgrenzen. Hinweise für eine Veränderung der Porosität im Bereich der Betonierabschnittsgrenzen wurden nur im Ergebnis der CT-Untersuchungen an den Probekörpern aus den Bohrungen B17 und B19 aus dem GSBV4 beobachtet. Diese könnten einen Hinweis auf eine abweichende Feststoffzusammensetzung und lokal höhere Porosität in den Betonierabschnittsgrenzen geben, die jedoch in Permeabilitätsuntersuchungen so nicht festgestellt wurde.

Aus den in situ und laborativen Untersuchungen im Bereich von Betonierabschnittsgrenzen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die effektive Gaspermeabilität der Betonierabschnittsgrenzen wurde im Bereich von $3,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bis $4,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ ermittelt. Damit ist von einer großen Streuung der Gaspermeabilität an den Betonierabschnittsgrenzen auszugehen. (Bei Lösungspermeabilitätsuntersuchungen wurde diese große Streuung nicht festgestellt.)
- Kombinierte CT- und Permeabilitätsuntersuchungen zeigen, dass im CT nachweisbare Wegsamkeiten in den Betonierabschnittsgrenzen nicht zwingend zu einer höheren Permeabilität führen. Die Kenntnisse aus den Porositäts- und Permeabilitätsuntersuchungen lassen darauf schließen, dass die Permeabilität der Betonierabschnittsgrenzen von zufällig verteilten, vernetzten Makroporen in den Betonierabschnittsgrenzen bestimmt wird.
- Im Kontakt mit NaCl gesättigter, MgCl_2 -haltiger Salzlösung kommt es für alle Untersuchungen (in situ und laborativ) und für alle Permeabilitätsniveaus zu einer signifikanten Reduzierung der Permeabilität des Spritzbetons. Dies wird auf die einsetzenden Kristallisationsprozesse (Reaktion von Rest-MgO, Umkristallisation 5-1-8-Phase in die 3-1-8-Phase) zwischen der Bindemittelmatrix und der Salzlösung zurückgeführt.

8.2 Versuchsziele und Messgrößen für die Planung eines MgO-Spritzbetonstreckenverschlusses

Für eine Umsetzung und Verifizierung der in AP1 bis AP3 gewonnenen Erkenntnisse für Streckenverschlüsse für zukünftige Endlager im Salinar ist ein in situ errichtetes Bauwerk als aktuelles Referenzbauwerk erforderlich. Das Bauwerk GV2 in der Grube Teutschenthal wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens 02C0942 [3] mit einer anderen Zielstellung (Abdichtung von Strecken im leichtlöslichen Gebirge) erstmals aus MgO-Spritzbeton im Carnallit errichtet.

Für den Nachweis der qualitätsgerechten Realisierbarkeit eines Streckenverschlusselementes aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz soll ein solches Versuchsbauwerk in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben erstmals im Steinsalz errichtet und getestet werden. Die Versuchsziele und Messgrößen für den Nachweis der Funktionstüchtigkeit durch eine Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung werden nachfolgend beschrieben. Dies entspricht den wissenschaftlichen Grundlagen für eine spätere Planung eines Versuchsbauwerkes aus MgO-Spritzbeton.

Weiterhin sollen im zukünftigen in situ Versuch die Erkenntnisse aus dem AP3.8 "Ableitung der optimalen Schichtmächtigkeit der MgO-Spritzbetonschicht in Abhängigkeit von der zulässigen Maximaltemperatur und vom Temperaturgradient im Spritzbeton" (Abschnitt 7.8) umgesetzt werden. Damit die Ergebnisse der Modellierung mit den Ergebnissen im späteren in situ Versuch verglichen werden können, muss die Modellgeometrie in AP3.8 mit der Geometrie des zukünftigen in situ Spritzversuchs im Steinsalz übereinstimmen. Weiterhin sollen die in der Modellierung verwendeten History-Punkte beim in-situ-Bauwerk mit Temperaturfühlern ausgestattet werden.

Die Randbedingungen des zukünftigen in situ Versuches sind:

- Versuch im Steinsalz (Allgemeinfall Staßfurt-Steinsalz) und standortunabhängig,
- Anpassung des Streckenquerschnittes auf die notwendige Mindesthöhe für eine übliche Teilschnittmaschine von ca. 3 m. Die Breite soll 3,5 m betragen. Daraus folgt eine Querschnittfläche von 10,5 m² und ein äquivalenter Radius von $R_{\text{äqu}} = 1,83$ m.

Für den in situ Versuch bestehen folgende Zielstellungen:

- Ermittlung der Temperaturverteilung und der Temperaturgradienten in den Spritzschichten.
- Bestimmung der Permeabilität des Gesamtsystems (Bauwerk im umliegenden Steinsalz) mit Gas und Lösung. Daraus folgt, dass eine geeignete Druckkammer eingebaut werden muss und eine Druckbeaufschlagungsleitung vorgesehen werden muss. (Die Druckkammer ist bei der bisherigen Modellierung noch nicht berücksichtigt.)
- Weiterhin sollen begleitende Nachuntersuchungen am MgO-Spritzbeton vorgesehen werden. Der Umfang der Nachuntersuchungen (z.B. Entnahme von Bohrkernen, Ultraschalluntersuchungen) wird im Nachfolgevorhaben geplant.

Für die Verifizierung der Ergebnisse der Modellrechnungen im AP3.8 durch einen zukünftigen in situ Versuch sind folgende Messungen erforderlich:

- Frühzeitige und begleitende Konvergenzmessungen am Standort des in situ Versuches.
- Lokale Messungen des Feuchtegehaltes. Der MgO-Spritzbeton gehört zum Rezepturtyp D4 der MgO-Baustoffe. Bei diesem Rezepturtyp besteht der Binder aus der 5-1-8-Bindemittelphase. Des Weiteren ist im abgebundenen Baustoff Überschuss-MgO vorhanden. Nach Abschluss des Abbindeprozesses und nach der Ausbildung der 5-1-8-Bindemittelphase ist der Baustoff "trocken", d.h. er enthält keine Porenlösung. Daraus folgt, dass das Ende des Abbindeprozesses durch den vollständigen Verbrauch der Anmachlösung (= "trockener Baustoff") festgestellt werden kann. Dazu müssen geeignete Feuchtesensoren eingebaut werden.
- Die Temperatur im Spritzbeton soll in Abhängigkeit von der Spritzmächtigkeit (Dicke der jeweiligen Spritzschicht) und der Zeit ermittelt werden. Die Daten sollen so ausgewertet werden (können), dass zwischen festgelegten Messpunkten auch der lokale Temperaturgradient ermittelt werden kann.
- Für die Messung der Temperatur im umliegenden Steinsalz beim Einbau und beim nachfolgenden Abbinden des Spritzbetons sollen geeignete Sensoren in radialen Bohrlöchern eingebaut werden und an das Gebirge angekoppelt werden. Für die Ankopplung der Sensoren an das umliegende Steinsalz muss ein geeignetes Verfüllmaterial eingesetzt werden, das die gleiche Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität wie das umliegende Steinsalz hat, damit die Messungen nicht verfälscht werden.
- Der Kontaktdruck zwischen MgO-Spritzbeton und Gebirge ist eine wichtige Größe für die Überprüfung der Widerlagerfunktion des Versuchspfropfens unter axialer Belastung. Dieser muss gemessen werden. Weiterhin ist davon auch die Permeabilität der Kontaktzone zwischen MgO-Spritzbeton und dem umliegenden Steinsalz abhängig. Zur Interpretation der Messergebnisse der Drucksensoren werden an den Positionen der Drucksensoren zusätzliche Betondehnungsgeber vorgeschlagen.
- Für die Detektion eines Flüssigkeitszutrittes über die Kontaktzone zwischen MgO-Spritzbeton und dem umliegenden Steinsalz oder über die konturnahe Auflockerungszone (ALZ) im Steinsalz sind geeignete Sensoren in zwei Messebenen vorzusehen. Dabei sollen die Erfahrungen, die im Vorhaben MgO-SEAL bei den Messungen am GV2 gewonnen wurden, beachtet werden.
- Die effektive Permeabilität des Gesamtsystems aus dem Pfropfen und dem umliegenden Gebirge soll durch eine Druckbeaufschlagung mit Gas (pneumatischer Vortest) und nachfolgend mit Lösung bei verschiedenen Belastungsstufen gemessen werden.

Sie dient auch als Maß für die Funktionstüchtigkeit des Verschlusselementes aus MgO-Spritzbeton.

Die nachfolgende Tabelle 90 zeigt die für die vorgeschlagenen Messgrößen resultierenden Messsensoren.

Tabelle 90: Aufstellung der Messgrößen für den in situ Versuch mit MgO-Spritzbeton im Steinsalz und der Sensoren

Messgröße	Sensoren	Bemerkungen
Konvergenz am Versuchsort	Messstrecken mit Wegaufnehmern	
Feuchtegehalt im MgO-Spritzbeton	TDR-Sensoren (kalibriert)	Direkter Einbau
Temperatur im MgO-Spritzbeton	Thermoelemente (Eigenbau)	Direkter Einbau
Temperaturgradient im MgO-Spritzbeton	Thermoelemente (Eigenbau)	Wird aus den Temperaturdaten berechnet und ausgewiesen
Temperatur im umliegenden Steinsalz	Thermoelemente (Eigenbau)	Ankopplung an das Gebirge erforderlich
Kontaktdruck zwischen MgO-Spritzbeton und dem umliegenden Gebirge	Plattendruckgeber	Angebetet an der Gebirgskontur, 2 Messebenen
Dehnung / Verformung des MgO-Spritzbetons im Konturbereich	Betondehnungsgeber	Im Spritzbeton an der Kontur zum Gebirge
Detektion des Flüssigkeitszutritts über die Kontaktzone zum Gebirge oder über die konturnahe Auflockerungszone (ALZ)	TDR-Kabelsensoren (Referenz MFPA Weimar)	An der Gebirgskontur befestigt, 2 Messebenen
Permeabilität des Gesamtsystems (mit Gas und Lösung)	Permeabilitätsmessanlage außerhalb des Pfropfens (Messung des eingehenden Volumenstroms bei konstantem Druck sowie von Druckabfallkurven bei instationären Messungen)	Ausführung der Druckkammer und der Zuleitung zur Druckkammer beachten.

Alle Messkabel sollen innerhalb des Spritzbetons einzeln (nicht gebündelt) bis zur Messwerterfassung auf der Luftseite des Bauwerks geführt werden. Der Abstand der Kabel zur Kontur soll mindestens 15 cm sein.

Einzelheiten sind Inhalt der in einem Nachfolgevorhaben durchzuführenden Ausführungsplanung.

8.3 Vorschlag für die begleitende Qualitätssicherung bzw. -dokumentation beim Bau eines MgO-Streckenverschlusses

8.3.1 Bauablauf und Dokumentation

Ein Streckenverschluss aus MgO-Spritzbeton wird nach dem Trockenspritzverfahren errichtet. Das Nassspritzverfahren kommt nicht in Frage, weil für das vorliegende Stoffsystem MgO-MgCl₂ keine Erstarrungsbeschleuniger existieren.

Im Ergebnis der in situ Spritzbetonversuche sind zwei Rezepturen für ein Streckenverschlussbauwerk geeignet – die klassische Rezeptur mit Hartgesteinszuschlag (Versuche GSBV1 und GSBV2) und die Rezeptur mit Steinsalzzuschlag (Versuche GSBV3 und GSBV4). Die mittlere Zusammensetzung beider Rezepturen und die jeweiligen Mengenparameter sind in Tabelle 91 zusammengefasst. Die aufgelisteten Rezepturen sind die für die Versuche geplanten Rezepturen. Bei der Umsetzung der Versuche wurde eher mit einem höheren Lösungsverbrauch und einem höheren Lösung-/MgO-Verhältnis gearbeitet.

Tabelle 91: Kennwerte der Zusammensetzung der beiden Rezepturen

		Rezeptur mit Quarzzuschlag		Rezeptur mit Salzzuschlag	
		geplant	umgesetzt	geplant	umgesetzt
Zusammensetzung Beton:	[%]				
MgO-Produkt (Styromag G10)		15,6	15,3	17,1	16,8
Lösung (4,4 molal MgCl ₂)		11,4	13,6	14,5	15,5
Zuschlag 0-8 mm		73,0	71,1	68,4	67,7
Verhältnis Lösung/MgO	[-]	0,73	0,88	0,85	0,92
Zusammensetzung (TG):	[%]				
MgO-Produkt (Styromag G10)		17,6		20,0	
Zuschlag 0-8 mm		82,4		80,0	
Rohdichte Beton	[t/m ³]	2,165		1,930	
Trockengemisch je m ³ Beton	[kg]	1918	1870	1650	1631
MgO je m ³ Beton	[kg]	338	331	330	324
Zuschlag je m ³ Beton	[kg]	1580	1539	1320	1307
Lösung je m ³ Beton	[kg]	247	294	280	299

Aus diesen Angaben kann man den erforderlichen Materialbedarf je Spritzschicht und je Mischeransatz bestimmen. Geht man vereinfacht von einer Querschnittfläche von 10,5 m² (entspricht 3 m · 3,5 m) und einer mittleren Mächtigkeit der Spritzschicht von 15 cm aus, entspricht dies einem Volumen von 1,575 m³ Beton (ohne Rückprall). Daraus folgt beispielweise ein Materialumschlag (je nach Lösung-/MgO-Verhältnis) je Spritzschicht in folgender Höhe:

Bei Einsatz der Rezeptur mit Quarzzuschlag: 2,95 bis 3,02 t Trockengemisch (davon 518 kg bis 532 kg MgO-Produkt)
Ca. 390 kg bis 463 kg MgCl₂-Lösung

Bei Einsatz der Rezeptur mit Salzzuschlag: 2,57 t bis 2,60 t Trockengemisch (davon 513 kg bis 520 kg MgO-Produkt)
Ca. 441 kg bis 471 kg MgCl₂-Lösung

Für die Berücksichtigung des Rückpralls (hier ca. 30 Ma.%) erhöht sich die jeweilige Menge entsprechend.

Der Mischeransatz richtet sich nach der Größe des Mixers. Für den Mischeransatz wählt man erfahrungsgemäß ganze Säcke des MgO-Produktes (hier 25 kg je Sack) und kombiniert die mit der sich aus der Zusammensetzung des Trockengemisches ergebenden genauen Menge Zuschlag. Die genaue Menge Zuschlag je Mischeransatz soll in einem BigBag angeliefert werden. Ein Mischeransatz besteht somit aus einer bestimmten Anzahl ganzer Säcke des MgO-Produktes und der genau abgewogenen Menge des Zuschlages in einem (einzigem) BigBag.

Die Menge der Mischeransätze je Spritzschicht hängt vom tatsächlichen Rückprall ab und wird deshalb nicht vorgegeben.

Eine Abweichung der Mächtigkeit der Spritzschicht nach oben (größere Schichtmächtigkeit) ist bei der Rezeptur mit Steinsalzzuschlag aufgrund der guten Klebrigkeit jederzeit technisch möglich. Allerdings führt eine Vergrößerung der Schichtmächtigkeit zu einer höheren Wärmeentwicklung. Aus der Kenntnis der zulässigen Toleranz der Schichtmächtigkeit (Abhängigkeit der Temperatur von der Schichtmächtigkeit – siehe Abschnitt 7.8) resultiert eine maximale Schichtmächtigkeit, die nicht überschritten werden darf.

Beim Spritzen ist der zeitliche Ablauf je Arbeitstag wie folgt:

Frühschicht: Vorbereitung der Oberfläche des Spritzbetons (Reinigung der Oberfläche der Ortsbrust und des umliegenden Gebirges mit Druckluft, leichtes Befeuchten der Oberfläche mit MgCl₂-Lösung, Aufbringen des MgO-Spritzbetons in der vorgesehenen Mächtigkeit).

Mittagsschicht: Beräumen des Rückpralls, Beseitigung von Staub und losen Anhaftungen.

Nachtschicht: Erstarren und Abkühlen des MgO-Spritzbetons (Ruhezeit).

Der Arbeitsablauf beim Herstellen von MgO-Spritzbeton nach dem Trockenspritzverfahren ist wie folgt:

1. Anlieferung MgO-Produkt (Sackware, je 25 kg).
2. Anlieferung des Zuschlages in Big-Bags mit gleicher Zuschlagmasse (siehe oben).
3. Anlieferung der MgCl₂-Lösung nach der entsprechenden Spezifikation (4,4 molal MgCl₂).
4. Herstellen eines Trockengemisches aus Zuschlag und dem MgO-Produkt (Bindemittel) in einem Mischer nach einem konstanten Masseverhältnis Zuschlag/MgO-Produkt. Dazu wird die Zuschlagsmenge in den Big-Bags so eingestellt, dass das entsprechende Masseverhältnisses Zuschlag/MgO-Produkt durch eine feste Anzahl gleich großer Säcke des MgO-Produktes eingestellt werden kann. Die Gesamtmasse einer Mischercharge muss der Mischergröße angepasst werden. Die erforderliche Mischzeit ist vom Mischertyp abhängig.
5. Förderung des Trockengemisches zur Spritzmaschine mit konstantem Massestrom. Vermeidung von Anbackungen und Entmischungen, die zu einer unregelmäßigen MgO-Verteilung im Trockengemisch führen.
6. Einstellen der Grundparameter der Spritzmaschine (Drehzahl der Fördereinrichtung und des Luftdrucks der pneumatischen Förderung des Trockengemisches mit dem Ziel eines konstanten Massestroms des Trockengemischs, Pumpendruck der Förderung der MgCl₂-Lösung) und der Einstellung des Ventils der Lösungsdosierung in die Spritzdüse, bis die gewünschte Konsistenz erreicht wird. Ziel ist ein optimales Masseverhältnis Lösung/Trockengemisch.

Dabei sind folgende Parameter zu dokumentieren:

- Masse der MgO-Säcke (Eigenüberwachung des Herstellers, stichprobenartige Kontrolle).
- Masse der Big-Bags mit Zuschlag.
- Zusammensetzung der Anmachlösung (MgCl₂-Gehalt, MgSO₄-Gehalt, Dichte).

- Verbrauch der Anmachlösung während des Spritzens in [Liter/h] oder in [kg/h].
- In der Arbeitsschicht erreichte Spritzmächtigkeit.
- Zustand der Oberfläche des "alten" Spritzbetons (Ortsbrust) und des umliegenden Gebirges.

8.3.2 Qualitätssicherung

Allgemeines

Für die praktischen Arbeiten wird folgendes Qualitätssicherungssystem (QS) vorgeschlagen. Die Untersuchungen unterteilen sich in die Untersuchungen der Ausgangsstoffe, die Überwachung des technischen Ablaufes des Spritzvorganges und die Untersuchungen am MgO-Spritzbeton. Die Untersuchungen am Spritzbeton werden sowohl direkt am Bauwerk und an separat hergestellten Spritzkästen durchgeführt.

Untersuchung der Ausgangsstoffe

Es werden folgende Parameter dokumentiert:

- Masse der MgO-Säcke (Eigenüberwachung des Herstellers, stichprobenartige Kontrolle); stichprobenartige Überprüfung des Phasenbestandes und des ZTW der MgO-Lieferware entsprechend dem Datenblatt des Herstellers/Lieferanten (d.h. Prüfung der MgO-Anteils neben dem Nichtvorhandensein von CaO (< 0,5%) neben weiteren inerten Nebenbestandteilen, wie z.B. Talk u.a. Silikaten, Calcit, Dolomit).
- Masse der Big-Bags mit Zuschlag.
- Zusammensetzung der Anmachlösung (MgCl₂-Gehalt, MgSO₄-Gehalt, Dichte) mit stichprobenartiger Überprüfung der Lieferantenangaben.

Überwachung des Spritzverlaufs

- Zusammensetzung des Trockengemisches je Mischeransatz (Masse Zuschlag im Big-Bag und Anzahl der Säcke mit dem MgO-Produkt).
- Zustand der Oberfläche des "alten" Spritzbetons (Ortsbrust) und des umliegenden Gebirges.
- Bestimmung des mittleren Massestromes des Trockengemisches.
- Verbrauch der Anmachlösung während des Spritzens in [Liter/h] oder in [kg/h].
- In der Arbeitsschicht erreichte Spritzschichtmächtigkeit – Kontrolle der vorgesehenen Schichtmächtigkeit.
- Bestimmung des Rückprallanteiles (während der Beräumung).

Untersuchungen am MgO-Spritzbeton

- Temperaturmessung in einzelnen Spritzbetonschichten (Vergleich mit den Berechnungsergebnissen).
- Bestimmung der Frühfestigkeit durch Penetrometer-Test (nach 1 h, 2 h, 3 h).
- Herstellen von Proben in separaten Spritzkästen, Gewinnung von Bohrkernen, Bewertung der Gleichmäßigkeit des Spritzbildes, Kontrolle der einaxialen Druckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit an Bohrkernen.

Sonstige Untersuchungen

- Untersuchungen am umliegenden Gebirge (Nebenbestandteile im Steinsalz, konturnahe Permeabilität).
- Haftfestigkeit MgO-Spritzbeton am Steinsalz.
- Eventuell Ultraschall.
- Eventuell Permeabilitätsprüfung des Bauwerkes.
- Kontaktpaltinjektion (Kombination aus 2K-Injektionsbitumen und Epoxidharz).

8.4 Vorschlag bzw. Vorentwurf zum Aufbau eines MgO-Streckenverschlusses mit Instrumentierung

8.4.1 Einführung

Im Abschnitt 8.2 sind die Versuchsziele und die dafür erforderlichen Messgrößen für ein zukünftiges in situ Versuchsbauwerk aus MgO-Spritzbeton beschrieben.

Weiterhin wurden die geometrischen Randbedingungen mit 3 m Mindesthöhe und 3,5 m Breite herausgearbeitet. Daraus folgt eine Querschnittfläche von 10,5 m² und ein äquivalenter Radius von $R_{\text{äqu}} = 1,83$ m.

Eine weitere Randbedingung ist, dass die Geometrie des in situ Versuchsbauwerkes mit der Geometrie der thermo-mechanischen Modellierung (siehe Abschnitt 7.8) übereinstimmen soll. Dies ist der Fall, wenn die oben genannten Abmessungen übernommen werden. Des Weiteren sollen Temperatursensoren an der in der Modellierung angegebenen Historypunkten eingebaut werden.

8.4.2 Notwendige Gesamtlänge des Bauwerkes

Nach der entsprechenden der Zielstellung (siehe Abschnitt 8.2) soll nach Fertigstellung die Permeabilität des Gesamtsystems (Bauwerk im umliegenden Steinsalz) mit Gas und Lösung bestimmt werden. Dazu muss die Länge des Bauwerkes hydraulisch und mechanisch dimensioniert werden. Eine ausführliche Dimensionierung mit einem hydraulisch-mechanischen Nachweis durch Modellrechnungen muss im Zuge einer zukünftigen Ausführungsplanung erarbeitet werden. Im vorliegenden Fall wird eine Grobdimensionierung vorgenommen. Eine ausführliche Ausführungsplanung ist standortbezogen und erfordert beispielsweise Messergebnisse zur Permeabilität des konturnahen Gebirges am Versuchsstandort. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Grobdimensionierung beschrieben. Die Berechnung der erforderlichen Länge eines gebirgsverbundenen zylindrischen Widerlagers wird nach folgender Formel (7) durchgeführt. Dem Ansatz liegt zu Grunde, dass die durch die Mantelfläche realisierte Haltekraft (durch Kohäsion und Reibung) größer ist als die auf die Stirnfläche axial wirkende Beanspruchung durch die Flüssigkeitsdruckbelastung.

$$\frac{L}{R_{\text{äqu}}} = \frac{p}{2(c + \sigma \cdot \text{tg}\Phi)} \quad (7)$$

L ...	erforderliche Mindestlänge des Widerlagers [m]
$R_{\text{äqu}}$	äquivalenter Radius [m]
p ...	axiale Belastung des Widerlagers (maximaler Flüssigkeitsdruck) [MPa]
c ...	Kohäsion in Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge, konservativer Ansatz [MPa]
σ ...	Radiale Spannung (Kontaktdruck) [MPa]
Φ ...	Reibungswinkel in der Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge [°]

Realistische Eingangsdaten für die Berechnungen sind:

$c = 0,86$ MPa (Mindestanforderung $c > 0,5$ MPa)

$\Phi = 34^\circ$ (Mindestanforderung $\Phi > 30^\circ$)

$\sigma = 0,2$ MPa (nach einer Standzeit von 1 Jahr, sehr konservativ: $\sigma = 0$)

Für eine axiale Flüssigkeitsbelastung bis 6 MPa und $R_{\text{äqu}} = 1,83$ m erhält man folgendes Ergebnis (siehe Abbildung 275):

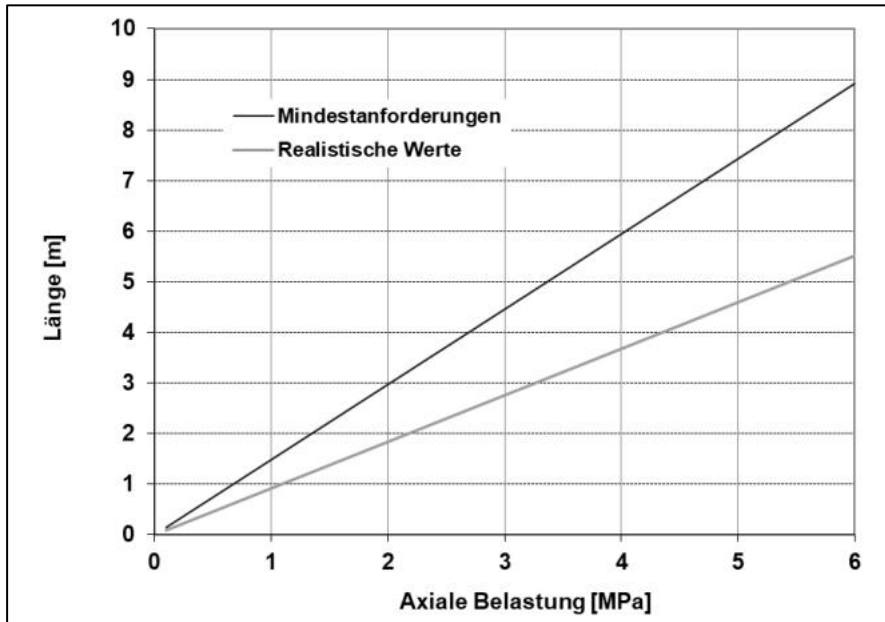


Abbildung 275: Abhängigkeit der Mindestlänge eines parallelen gebirgsverbundenen Pfropfens von der axialen Flüssigkeitsdruckbelastung für $c = 0,86$ MPa, $\Phi = 34^\circ$, $\sigma = 0,2$ MPa

Für einen sehr konservativen Ansatz mit $\sigma = 0$ erhält man eine um ca. 2 m höhere Mindestlänge des Pfropfens.

Für eine erste hydraulische Grobdimensionierung gilt überschlägig der empirische Ansatz $L = 4 R_{\text{äqu}}$. Zusätzlich muss aber noch ein Sicherheitsbeiwert berücksichtigt werden.

Übereinstimmend folgt bei der vorliegenden Geometrie mit der Querschnittsfläche von $10,5 \text{ m}^2$ und einem äquivalenten Radius von $R_{\text{äqu}} = 1,83$ m eine Mindestlänge des Pfropfens von ca. 8 m. Damit hat das mögliche in situ Versuchsbauwerk eine ähnliche Größenordnung wie der in situ Versuch GV2. Dies ermöglicht auch den Vergleich zwischen einem Bauwerk aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz mit dem früheren Bauwerk im Carnallit. Beide Bauwerke unterscheiden sich hauptsächlich durch die unterschiedlichen Wirtsgesteine und die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften der jeweiligen ALZ. Der Grundaufbau des Versuchs ist wie folgt (siehe Abbildung 276).

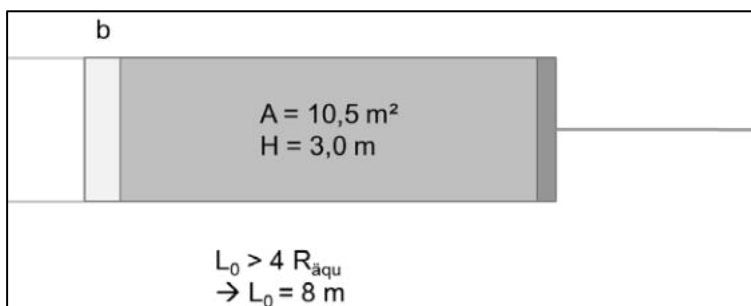


Abbildung 276: Grundaufbau eines zukünftigen in situ Streckenschlussbauwerkes mit Druckkammer

Der Anteil des Spritzbetons im gesamten Bauwerk, der ausführlich instrumentiert wird (Mächtigkeit "b" in Abbildung 276) ist variabel und richtet sich danach, wie viele Messebenen für die Validierung der Temperatursausbreitung erforderlich sind. In Abbildung 276 ist eine Minimalvariante mit $L_0 = 8$ m und $b = 1$ m mit 5 bis 7 Spritzbetonabschnitten (je nach optimaler Spritzmächtigkeit) angenommen. Der nicht mit Temperatursensoren bestückte Teil des Bauwerkes (Länge L_0) wird nachfolgend als "Altbeton" bezeichnet.

Für den "Altbeton" soll Spritzbeton mit der gleichen Rezeptur wie im instrumentierten Bereich verwendet werden.

8.4.3 Vorschlag für eine Instrumentierung

Der Umfang der Instrumentierung resultiert aus den im Abschnitt 8.2 festgelegten Messzielen (siehe Tabelle 90). Einen Längsschnitt eines ersten Vorschlages zeigt Abbildung 277 mit der Annahme $L_0 = 8$ m und $b = 1$ m. Alternativ sind verschiedene Kombinationen möglich, so beispielsweise $L_0 = 6$ m und $b = 3$ m, wenn 15 bis 21 Spritzbetonschichten instrumentiert werden sollen. Die Mächtigkeit der Spritzbetonschichten ergibt sich aus den Ergebnissen der Berechnungen zur optimalen Schichtmächtigkeit (siehe Abschnitt 7.8).

Im Bereich 1 ($L = 8$ m) sind keine Temperatur- und Feuchtesensoren erforderlich. In der Mitte des Bereiches 1 ist eine Messebene mit vier Plattendruckgebern (beide Stöße, Firste, Sohle) vorgesehen, in der der Kontaktdruck gemessen werden soll. Zur Interpretation der Messergebnisse der Drucksensoren werden an den Positionen der Drucksensoren zusätzliche Betondehnungsgeber vorgeschlagen (siehe Abschnitt 8.2).

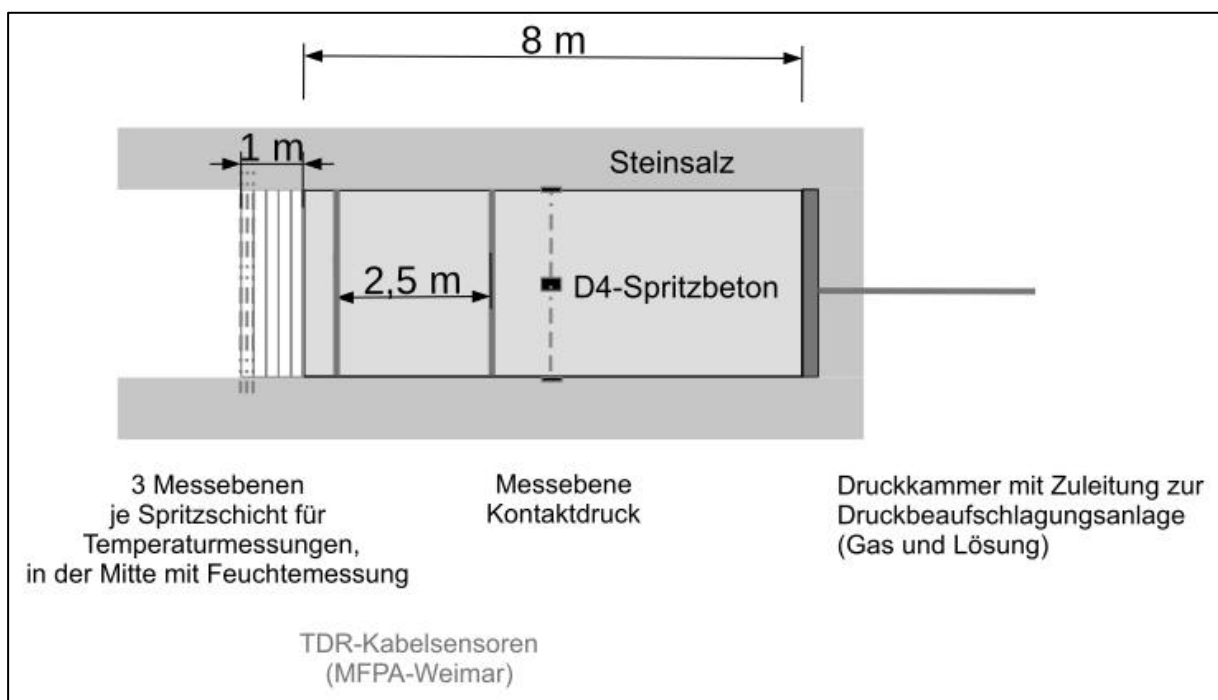


Abbildung 277: Längsschnitt durch das mögliche Verschlussbauwerk (Variante mit $L = 8$ m und $b = 1$ m)

Jede neue Spritzschicht im Bereich 2 soll drei Messebenen enthalten (hinten, mittig und vorne). Da an jeder Grenze zwischen 2 Spritzschichten eine Messebene "gemeinsam" ist, beträgt die Anzahl der Messebenen $2n + 1$, wobei n die Anzahl der Spritzschichten ist.

Die Anordnung der Feuchte- und der Temperatursensoren in jeder Messebene ist in Abbildung 278 dargestellt. Für die Temperaturmessung im umliegenden Gebirge (Steinsalz) sollen geeignete Sensoren in radialen Borlöchern eingebaut werden und an das Gebirge angekoppelt werden. Für die Ankopplung der Sensoren an das umliegende Steinsalz muss ein geeignetes

Verfüllmaterial eingesetzt werden, das die gleiche Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität wie das umliegende Steinsalz hat, damit die Messungen nicht verfälscht werden (siehe Abschnitt 8.2). Je Bohrloch (in der Sohle und in einem Stoß – mittig) sind von der Kontur aus gesehen zwei weitere Temperatursensoren vorgesehen, die sich in noch festzulegender Tiefe von der Kontur befinden (siehe Abbildung 278). Der Abstand der Sensorposition von der Kontur wird in Abhängigkeit von den Berechnungsergebnissen (siehe Abschnitt 7.8) festgelegt.

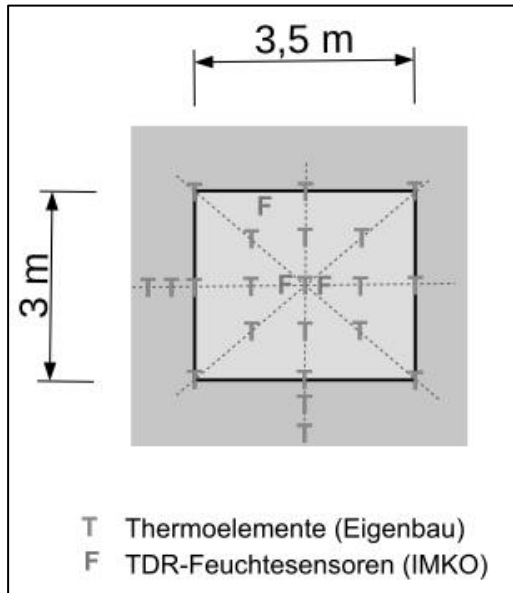


Abbildung 278: Messebene im Bereich des neu eingebrachten MgO-Spritzbetons

Der Abstand zwischen den beiden TDR-Messebenen im Bereich 1 (siehe Abbildung 277) beträgt 2,5 m und ermöglicht nicht nur die Detektion des Zeitpunktes des Flüssigkeitszutritts in der Kontaktzone, sondern auch eine grobe Abschätzung der Geschwindigkeit der Flüssigkeitsfront über den gesamten Umfang. Die genaue Position der TDR-Messebenen ist Gegenstand der späteren Ausführungsplanung.

Die nachfolgende Tabelle 92 zeigt den Umfang der zu verbauenden Messsensoren auf Basis des vorliegenden Vorschlages.

Tabelle 92: Abgeschätzter Umfang der Instrumentierung eines in situ Versuchsbauwerkes

Messgröße	Sensoren	Anzahl
Konvergenz am Versuchsort	Messstrecken mit Wegaufnehmern	2
Feuchtegehalt im MgO-Spritzbeton	TDR-Sensoren (kalibriert)	mind. 33
Temperatur und Temperaturgradient im MgO-Spritzbeton	Thermoelemente (Eigenbau)	mind.187
Temperatur im umliegenden Steinsalz	Thermoelemente (Eigenbau)	mind.44
Kontaktdruck zwischen MgO-Spritzbeton und dem umliegenden Gebirge	Plattendruckgeber	4
Dehnung / Verformung des MgO-Spritzbetons im Konturbereich	Betondehnungsgeber	4

Messgröße	Sensoren	Anzahl
Detektion des Flüssigkeitszutritts über die Kontaktzone zum Gebirge oder über die konturnahe Auflockerungszone (ALZ)	TDR-Kabelsensoren (Referenz MFPA Weimar)	8 TDR Flachbandkabel in 2 Messebenen
Permeabilität des Gesamtsystems (mit Gas und Lösung)	Permeabilitätsmessanlage außerhalb des Pfropfens (Messung des eingehenden Volumenstroms bei konstanten Druck sowie von Druckabfallkurven bei instationären Messungen)	1

Eine Ausführung einer Messebene mit dem notwendigen Umfang der Temperaturmessgeber (Thermoelemente) zeigt Abbildung 279. In diesen Messebenen kann auf die Feuchtesensoren verzichtet werden, wenn deren Messziel (Nachweis eines sich nach der Abbindereaktion einstellenden "trockenen" Baustoffs) bereits in den vorangegangenen Messebenen bereits erreicht wurde. Eine Reduzierung der Anzahl der Thermoelemente ist möglich, wenn durch die vorherigen ausführlichen Messebenen (Abbildung 278) so viele Daten vorliegen, dass ein Vergleich mit den Ergebnissen der Modellierung (siehe Abschnitt 7.8) möglich ist.

Der gleiche Sachverhalt trifft für die im Gebirge positionierten Thermoelemente zu. Auch hier muss dann geprüft werden, ob in den vorangegangenen ausführlich instrumentierten Messebenen das Messziel der Ermittlung der Temperaturverteilung im konturnahen Gebirge bereits erreicht werden konnte.

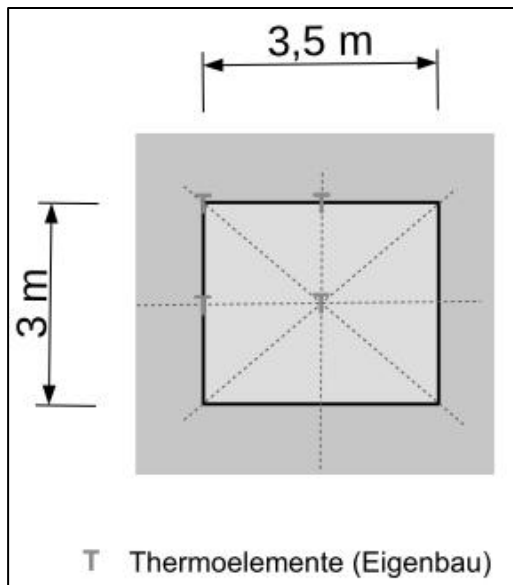


Abbildung 279: Querschnitt einer reduzierten Messebene im Bereich des neu eingebrachten MgO-Spritzbetons

Weitere Einzelheiten sind Inhalt der in einem Nachfolgevorhaben durchzuführenden Ausführungsplanung.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des FuE-Vorhabens CARLA [1] wurde das ca. 10 m lange **Streckenverschluss-element GV2 aus MgO-Spritzbeton** im Carnallitgebirge in der Grube Teutschenthal errichtet. Das GV2-Bauwerk besteht aus 15,6 Ma.% MgO, 11,4 Ma.% R-Lösung und 73 Ma.% Sand/Kies-Zuschlag mit einem Größtkorn von 8 mm. Bei dieser Rezeptur bildet sich nach dem Abbinden die 5-1-8-Phase ($5 \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$) neben unreaktiertem MgO.

Nach mehrjähriger Stand- und Reifezeit wurden 2016 mit dem Folgeprojekt MgO-SEAL [4] die Untersuchungen am GV2 fortgesetzt. So wurden vier bis zu 6 m lange Bohrlöcher mit Salzlösungen (reine, gesättigte NaCl-Lösung und NaCl-gesättigte, MgCl_2 -haltige Lösung) über einen Messzeitraum von 2,5 Jahren beaufschlagt und regelmäßig die Permeabilität gemessen. Bei den Bohrungen mit lokal durchlässigeren Bereichen verringerte sich die anfangs gemessene Lösungspemeabilität ($k_{\text{integral}} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bzw. $k_{\text{integral}} \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) 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, wenn er vollständig eingespannt ist und sich damit keine Volumenexpansion einstellen kann. Diese Porositätsverringering bei Lösungszutritt wurde auch rechnerisch im Modell beschrieben.

Durch die Nutzung dieser und neu gestoßener radialer Bohrungen wurde im Forschungsvorhaben MgO-S³ der Zustand der Betonierabschnittsgrenzen und ihre Permeabilität untersucht. Es wurde festgestellt, dass bei Lösungszutritt in den Bereichen mit anfangs höherer Permeabilität sich die Permeabilität mit der Zeit auf Werte $< 10^{-18} \text{ m}^2$ verringert. Damit konnte der bereits im Vorhaben MgO-SEAL [4] gezeigte Selbstabdichtungseffekt des MgO-Spritzbetons bei Lösungszutritt bestätigt bzw. verifiziert werden.

In Bohrungen im kompakten MgO-Spritzbeton ist nach 3,5 Jahren Kontaktzeit die Lösung ca. 1 mm bis 3 mm in die Bohrlochwandung eingedrungen. Durch ortsaufgelöste Phasenanalysen wurde gezeigt, dass sich in Kontakt mit Lösung $\text{Mg}(\text{OH})_2$ und die 3-1-8-Phase unter Umsetzung von Rest-MgO und die 5-1-8-Phase gebildet haben. Im sichtbaren Saumbereich dominiert $\text{Mg}(\text{OH})_2$, im tiefer liegenden Bereich die 3-1-8-Phase. Die neu gebildete "Mg(OH)₂-Sperrschicht" blockiert weitere Phasenumbildungen in das tiefere Bauwerk hinein und verringert bzw. stoppt auch weitere Konzentrationsänderungen der anstehenden Lösung.

Beim Zutritt von MgCl_2 -haltiger Salzlösung zum MgO-Beton der Rezeptur D4 wird die 5-1-8-Bindemittelphase in die langzeitstabile 3-1-8-Phase umgewandelt. Bei der Kristallisation der 3-1-8-Phase entsteht bei eingespanntem MgO-Beton ein Expansionsdruck. Dabei kommt es zu einer Verringerung des Porenraums. Die Zunahme des Feststoffvolumens bei Lösungszutritt führt zu einer Permeabilitätsverringering, wie auch die Ergebnisse der in den Bohrungen B38, B39, B40 und B41 durchgeführten Langzeitbohrlochversuche zeigten. Die Permeabilität verringert sich dauerhaft, da die neu gebildete 3-1-8 Phase nicht abtransportiert wird, Bestandteil des Gefüges wird und zusätzlich im Porenraum des Baustoffs verbleibt. Mit Verringerung der Porosität kann also zunehmend immer weniger Lösung in das MgO-Betongefüge eindringen.

Das **Bauwerk GV2 wurde durch die BAM mit Ultraschall untersucht**, um mögliche Schadstellen (z.B. großflächige Ablösungen) durch Reflexionen des Ultraschall-Signals zu detektieren. Grundsätzlich zeigt sich, dass das am GV2 eingesetzte LAUS-Messsystem gut für die zerstörungsfreie Prüfung von Abdichtbauwerken größerer Ausdehnung aus MgO-Spritzbeton geeignet ist. Das LAUS-Messsystem ist als einziges Messsystem in der Lage von der Bauwerksoberfläche auch in größeren Bereichen ($> 2 \text{ m}$) zerstörungsfrei Reflektoren zu detektieren. Am untersuchten Bauwerk GV2 zeigten sich auch im Tiefenbereich größer 2 m, z.B. 2,37 m, 2,75 m oder 3,3 m Reflektoren. Deshalb bietet sich dieses Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung großer Bauwerke an und kann als Qualitätssicherungsmaßnahme hinzugezogen werden, insbesondere wenn es darum geht, großflächige Ablösungen zu erkennen.

Weiterhin wurde Probematerial für die Charakterisierung der Betonierabschnittsgrenzen mittels μ CT-Untersuchungen für das HZDR bereitgestellt.

Bei **Spritzbetonversuchen** wurde die Rezeptur des GV2 reproduziert und eine höhere Schichtmächtigkeit von mindestens 15 cm bis 20 cm gespritzt, damit möglichst wenige Betonierabschnittsgrenzen im Bauwerk vorhanden sind. Außerdem musste die Rezeptur an die aktuell am Markt erhältlichen Bindemittel angepasst werden.

Im Technikumsmaßstab wurden insgesamt sieben Spritzbetonversuche (SBV1 bis SBV7) mit jeweils zwei bis drei Rezepturvarianten gespritzt. Die Vorzugsvariante aus diesen Tests wurde für die weiteren in situ Versuche (= GSBV) verwendet. Bewertet wurden in den Technikumsversuchen der Spritzprozess, die Klebrigkeit des Spritzgutes, die Rückprallmenge, die Frühfestigkeit und einaxiale Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit. Weiterhin wurde in drei Teilversuchen die Kombination von Quarz und Salz als Zuschlag erprobt.

Im ersten in situ Großspritzbetonversuch **GSBV1** wurde die angepasste GV2-Rezeptur eingesetzt. Es wurde ein 1 m dicker Spritzbetonkörper in sechs Schichten mit einer Mächtigkeit bis zu 30 cm gespritzt, was problemlos möglich war. Der Spritzprozess (Homogenität des Spritzstrahls, Klebrigkeit des Spritzguts) wurde positiv bewertet, jedoch wiesen die für die Festigkeitsprüfungen entnommenen Bohrkerne zahlreiche Fehlstellen auf. Es wurde mehrere Optimierungsmöglichkeiten identifiziert.

Beim **GSBV2** wurde anschließend die gleiche Rezeptur wie beim GSBV1 verwendet, jedoch wurden die Optimierungen umgesetzt. Es wurde ein höherer Förderdruck für Lösung und Trockengemisch verwendet, sodass das Spritzgut an der Wand besser kompaktiert wurde. Es wurde eine andere Spritzdüse eingesetzt, bei der die Lösung feiner zum Trockengemisch zugefügt und somit besser durchmischt wurde. Das Trockengemisch aus MgO-LW und Zuschlag wurde länger gemischt (mindestens 5 Minuten). Der Förderschlauch für das Trockengemisch wurde verlängert und die Auslage angepasst. Die beim GSBV2 gewonnenen Kerne waren von deutlich besserer Qualität als beim GSBV1 und hatten nur wenige Lunker.

Für den **GSBV3** wurde erstmals in einem in situ Versuch Salz als Zuschlag verwendet. Es wurden vier Schichten mit einer Mächtigkeit zwischen 16 cm und 29 cm gespritzt. Bei diesen hohen Schichtmächtigkeiten waren die hohen Abbinde Temperaturen von über 90 °C in der Schichtmitte problematisch. Einerseits kann es (und kam es) zu Rissen im Spritzbetonkörper kommen, andererseits kann sich die Hochtemperaturphase des Bindemittels bilden.

Bereits beim Spritzen war eine ungleichmäßige Förderung des Spritzgutes bzw. des Trockengemisches zu erkennen, sodass die Bohrkerne eine deutliche Maserung aufwiesen.

Für den **GSBV4** wurde nochmals die Rezeptur mit Salzzuschlag des GSBV3 verwendet. Jedoch wurde eine andere Spritzbetonmaschine als bei den Großversuchen GSBV1, GSBV2 und GSBV3 verwendet. Beim GSBV4 kam die Spritzmaschine von den Technikumsversuchen an der TU Freiberg zum Einsatz. Mit dieser Maschine war eine homogenere Förderung des Spritzgutes möglich. Beim GSBV4 wurden die Schichten einheitlich mit ca. 16 cm Mächtigkeit gespritzt. Dies führte zu einer geringeren Abbinde Temperatur. Die Bohrkerne wiesen eine sehr gute Qualität mit nur sehr wenigen Lunkern auf. Beim Abbinden des Spritzbetons wurde eine Temperatur von bis zu 76 °C in der Schichtmitte gemessen. Es hat sich herausgestellt, dass die Reaktivität der MgO-Lieferware einen entscheidenden Einfluss auf die Dauer der Wärmeentwicklung hat. Im ungünstigen Fall einer weniger reaktiven MgO-Charge (hoher ZT-Wert im Zitronensäuretest) verschiebt sich das Temperaturmaximum zeitlich nach hinten, so dass bei der nächsten Spritzschicht der "alte" MgO-Spritzbeton noch nicht abgekühlt ist. Dies führt zu einer Überlagerung der Wärmefreisetzung und somit zu einem Anstieg der Temperatur. Bei dem verwendeten MgO und der Leistung der Spritzmaschine beträgt die optimale Schichtmächtigkeit 16 cm bis 20 cm, wenn die Maximaltemperatur von 60 °C nicht überschritten werden soll. Dies wurde auch in Modellrechnungen belegt.

Bei den GSBV3 und GSBV4 mit Salzzuschlag betrug das mittlere Lösung-/MgO-Verhältnis 0,92 bzw. 0,93. Mit diesem Wert wurde ein guter Spritzprozess erreicht, sodass dieses Lösung-/MgO-Verhältnis für Spritzbeton mit Salzzuschlag empfehlenswert ist.

An den entnommenen Bohrkernen waren immer die Betonierabschnittsgrenzen anhand eines Farbunterschiedes bzw. anhand eines schmalen dunkleren Bereiches zu erkennen. Beim Bohren sind die Kerne jedoch nicht zwangsweise an den BAG gebrochen, was den guten Verbund der einzelnen Spritzbetonschichten zeigt.

Bei allen Kernproben der in situ Großspritzbetonversuche war die mittlere **einaxiale Druckfestigkeit** bereits nach drei Tagen mit über 28 MPa (GSBV3) bis 41 MPa (GSBV4) sehr hoch und nahm nach 28 Tagen bis auf 33 MPa (GSBV3) bis 52 MPa (GSBV4) zu.

Die Festigkeit der Proben aus den Spritzbetonversuchen erreichte nicht das Niveau der Festigkeit der Proben aus dem Bauwerk GV2. Allerdings liegt die Festigkeit des Spritzbetons über der Festigkeit des Steinsalzes, so dass auch der aktuell untersuchte MgO-Spritzbeton in beiden Rezepturvarianten (SiO₂-Zuschlag und Steinsalz-Zuschlag) die Anforderungen für ein Verschlussbauwerk erfüllt.

Die Festigkeiten (einaxiale Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, direkte Zugfestigkeit und Haftfestigkeit am Steinsalz) der ersten Proben aus der reproduzierten MgO-Spritzbetonrezeptur des Referenzbauwerkes GV2 waren ausreichend. Die Zugabe von Schmelzbasaltfasern zur Erhöhung der Endfestigkeit war nicht erforderlich.

Für die Prüfung der **Haftzugfestigkeit** zwischen Spritzbeton und Steinsalz wurden in situ bei GSBV1, GSBV3 und GSBV4 Rohrstücke mit Salzkernen vorbereitet, in die der Spritzbeton aufgespritzt wurde. Für die Proben des GSBV1 mit Quarzzuschlag ergab sich nach 18 Tagen eine Haftzugfestigkeit von im Mittel 0,48 MPa und nach 28 Tagen von im Mittel 0,56 MPa. Bei den Proben aus dem GSBV3 und GSBV4 mit Salzzuschlag war die Haftzugfestigkeit nach 28 Tagen mit 0,22 MPa (GSBV3) bzw. 0,25 MPa (GSBV4) nur etwa halb so groß.

Beim GSBV4 wurde in situ in zwei Bohrlöchern (B31 und B32) die **Gaspermeabilität** gemessen. Diese lag zwischen $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ (für den intakten Baustoff) und $5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ (für den Baustoff mit BAG/Fehlstellen). Im Anschluss wurde die integrale **Permeabilität mit NaCl-gesättigter, MgCl₂-haltiger Lösung** bestimmt. Dazu wurden zunächst die zwei Bohrlöcher mit der Salzlösung befüllt und nach 11 Wochen mit der ersten Messung begonnen. Hier ergab sich eine Permeabilität von $8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Nach sieben Wochen Lösungsbeaufschlagung verringerte sich die Permeabilität auf $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Hier zeigte sich der Selbstabdichtungseffekt des MgO-Spritzbetons.

Das Betonspritzen ist eine sehr gute Methode für die Herstellung von Streckenverschlusselementen im Steinsalz. Der **Umgang mit der Spritzbetonmaschine** erfordert Erfahrung und Wissen. Die durchgeführten in situ Spritzbetonversuche haben gezeigt, dass das Spritzergebnis sehr stark von der richtigen Technik, dem richtigen Umgang und den geeigneten Einstellungen abhängig ist. Es ist daher sehr empfehlenswert, vor dem Bau des eigentlichen Bauwerkes mit MgO-Spritzbeton ein Probespritzen unter realen in situ Bedingungen in mehreren Schichten mit denselben Ausgangsstoffen durchzuführen. Aus dem erhärteten „Probespritzbeton“ sollten dann Bohrkern ausgebohrt und begutachtet werden und die Dichte, Festigkeit und Permeabilität gemessen werden.

Die Bohrkern aller Spritzbetonversuche wiesen eine markante **Hell-Dunkel-Maserung** auf. Um zu prüfen, ob sich der Phasenbestand zwischen den schmalen dunklen und hellen Bereichen unterscheidet, wurden mehrere Kerne untersucht. Es wurde festgestellt, dass sich der Phasenbestand in den helleren und dunkleren Bereichen nicht unterscheidet. Beim GSBV1 waren mehrere Kerne aus einem Tiefenbereich hinsichtlich der hellen Färbung besonders auffällig. Hier wurde Chlorartinit nachgewiesen. Woher das für die Chlorartinitbildung notwendige CO₂ stammte, konnte nicht aufgeklärt werden.

An Proben des GV2 wurde untersucht, welchen Einfluss die **Lagerung unter CO₂-Atmosphäre** und einer Luftfeuchte von 65 - 70 % auf den MgO-Beton hinsichtlich Phasenbestand, Masse, Volumen und Permeabilität hat. Beim GV2 hatte sich in situ unter diesen Bedingungen Chlorartinit gebildet. Es wurde in Laborversuchen eine Masse- und

Volumenzunahme bei Kernproben sowie eine Erhöhung der Permeabilität gemessen. Jedoch hat sich anstatt Chlorartinit das Magnesiumcarbonat-Hydrat Nesquehonit, $\text{MgCO}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$, gebildet.

Als Endergebnis der Untersuchungen zur Verbesserung der "**Klebrigkeit**" des MgO-Spritzbetons (ohne chemische Abbindebeschleuniger) wird empfohlen, eine MgO-Lieferware mit Talk als natürlichen und inerten Nebenbestandteil zu verwenden. Dazu wurden mit einem europäischen Hersteller erste Gespräche geführt und vereinbart, dass der Hersteller ein MgO mit vorgegebenen Kenngrößen zur Phasenzusammensetzung (z.B. MgO, Calcit, Talk, Magnesit, CaO), zum Zitronensäuretestwert (ZTW) als Maß für die Reaktivität, zur BET-Oberfläche (durch Gasadsorption gemessene spezifische Oberfläche) und zur Korngrößenverteilung liefert.

Die **Spritzbetonkörper** des GSBV1, GSBV3 und GSBV4 wurden **mit Ultraschall untersucht**, um mögliche Fehlstellen, Ablösungen oder die beim GSBV4 eingebauten Störkörper zu detektieren. Die Messungen mit dem kommerziellen MIRA-Messsystem mit geringer Eindringtiefe ($< 2 \text{ m}$) an den Großspritzbetonversuchen zeigten, dass der Einsatz von Ultraschallmethoden an Abdichtbauwerken aus MgO-Spritzbeton grundsätzlich möglich ist. Größere Reflektoren/ Ablösungen sind nachweisbar, wie am Beispiel der unerwartet großen Ablösung in $0,63 \text{ m}$ Tiefe beim GSBV4 zu sehen war. Kleinere in den Spritzbeton eingespritzte Störkörper ($8 \times 8 \times 3 \text{ cm}^3$) sind mit dem hier eingesetzten Stand von Mess- und Auswertetechnik nicht zu detektieren. Es zeigte sich, dass im untersuchten Spritzbeton viele Reflektoren zu sehen sind, diese aber nicht eindeutig den Störkörpern zugeordnet werden konnten. Eine mögliche Ursache könnte in den Materialeigenschaften des Spritzbetons liegen, da dieser eventuell „inhomogener“ als im Bauwesen eingesetzter Rüttelbeton ist und deshalb eventuell die Ultraschallgeschwindigkeit stärker variiert. Nach aktuellem Stand ist somit die standardisierte Verwendung der Ultraschallmessungen mit kommerzieller Technik, wie sie bei der klassischen zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall an Beton im Bauwesen zum Einsatz kommt, nur sehr eingeschränkt zur Qualitätssicherung von Spritzbeton geeignet.

Ausgewählte Kernproben aus dem GSBV3 und GSBV4 wurden mittels **Mikro-Computertomographie (μCT)** untersucht, um die Porenverteilung innerhalb des Bohrkerns darzustellen. Im Vergleich der Bereiche mit BAG und innerhalb einer Spritzschicht lassen sich praktisch keine Unterschiede hinsichtlich der Porositätsverteilung erkennen. Mithilfe der **Positronen-Emissionstomographie (PET)** wurde an 2 Proben aus dem GSBV3 das Eindringen von Salzlösung in den Spritzbeton beobachtet. Die markierte Lösung wurde schnell eingesaugt und bereits nach einer Stunde war die Tracerverteilung stationär. Es fanden sich dabei nur einzelne, lokal begrenzte Transportpfade, die an porösere Zonen gebunden sind.

Bei den in situ Spritzbetonversuchen wurde beim Abbinden eine sehr hohe **Temperatur** von bis zu $98 \text{ }^\circ\text{C}$ (GSBV3) in der Schichtmitte im Zentrum des Spritzbetonkörpers gemessen. Dies war auf die große Schichtmächtigkeit von $28,9 \text{ cm}$ zurückzuführen. Eine hohe Abbinde-temperatur von über $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sollte vermieden werden, da es zur Bildung der Hochtemperaturphase des Bindemittels und zu Rissen kommen kann. Um die optimale Schichtmächtigkeit bei einer maximalen Abbinde-temperatur von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ zu ermitteln, wurden entsprechende **Modellrechnungen** durchgeführt. Dazu wurden die erforderlichen Modellparameter (maximale Wärmemenge, Aktivierungsenergie, Wärmekapazität, Startpunkt der Hydratation, kinetische Parameter) experimentell durch kalorimetrische Messungen bestimmt und im FLAC 3D-Modell verwendet. Zur Verifizierung der Eingangsparameter wurde zunächst der GSBV4 nachgerechnet. Anschließend wurde ein modifiziertes Modell erstellt, mit dem die Temperaturentwicklung in einem zukünftigen in situ-Bauwerk (MgO-Spritzbeton mit Salzzuschlag) im Steinsalz beispielhaft an einer Einzelscheibe, die auf einen bestehenden Spritzbetonkörper aufgebracht wurde, prognostiziert werden kann.

In einem weiteren Modell mit einer Breite von 3 m und einer Höhe von $3,5 \text{ m}$ wurde mit den Parametern eines höher reaktiven MgO (als beim GSBV4) gerechnet, um ein schnelles

Abbinden zu simulieren. Zur Ableitung der optimalen Schichtdicke wurde die Dicke der Spritzbetonschicht im Modell mit 10 cm, 16 cm, 20 cm und 25 cm angesetzt. An verschiedenen Punkten im Modell wurde der Temperaturverlauf ausgewertet. Erwartungsgemäß ist die Temperatur für dickere Schichten deutlich höher (maximal ca. 56 °C). Die Bedingung, dass die Kerntemperatur unter 60 °C bleibt, ist also auch für die mächtigste Schicht (25 cm) erfüllbar. Damit gehen jedoch hohe Temperaturgradienten von bis zu 80 K/m einher. Entsprechend der Temperatur entwickeln sich auch Zugspannungen im Spritzbetonkörper. Für die Modelle mit einer Schichtmächtigkeit von 20 cm und 25 cm zeigten sich Fluktuationen in der maximalen Hauptspannung, die auf plastische Verformung, also Zugversagen hindeuten. Die optimale Schichtmächtigkeit beträgt somit etwa 16 cm. Damit können allzu hohe Abbindetemperaturen (bei Verwendung einer höher reaktivem MgO) und Spannungen vermieden werden.

Aus den Erkenntnissen der Spritzbetonversuche, der Laborversuche und den Modellierungen wurde ein wissenschaftliches **Programm für ein in situ-Verschlussbauwerk** aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz entwickelt.

Um die qualitätsgerechte Realisierbarkeit eines Streckenverschlusselementes aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz nachzuweisen, sollte ein solches Versuchsbauwerk in einem weiteren Forschungsvorhaben erstmals im Steinsalz errichtet und getestet werden. In dem 3 m hohen, 3,5 m breiten und mindestens 8 m langen Bauwerk sollen die Temperaturverteilung und -gradienten in den Spritzschichten ermittelt werden sowie die Permeabilität des Gesamtsystems mit Gas und Lösung bei einer Druckbeaufschlagung über eine Druckkammer bestimmt werden. Außerdem soll die Temperaturentwicklung im umgebenden Steinsalz in radialen Bohrungen während des Spritzens gemessen werden. Es wird vorgeschlagen, im Randbereich zwischen Bauwerk und Salz Feuchtesensoren, die einen Flüssigkeitszutritt detektieren, und Plattendruckgeber, die den Kontaktdruck zwischen Spritzbetonkörper und umliegenden Gebirge aufzeichnen, zu installieren. Für den Versuch kommen sowohl der MgO-Spritzbeton mit Hartgesteinszuschlag als auch mit Salzzuschlag in Frage. Rezeptur und Bauablauf wurden durch die in situ Spritzbetonversuche erprobt und für weitere Versuche empfohlen. Vor, während und nach den Spritzarbeiten müssen zahlreiche Parameter für die Qualitätssicherung überprüft und dokumentiert werden. Die Ausgangsstoffe müssen hinsichtlich der geforderten Zusammensetzung und Massen untersucht werden. Der Spritzprozess muss hinsichtlich der verbrauchten Mengen, der Spritzschichtmächtigkeit und des Rückprallanteils dokumentiert werden. An dem Spritzbetonkörper sollen die Frühfestigkeit (mittels Penetrometer) sowie die Temperaturentwicklung in einzelnen Schichten bestimmt werden. In separat hergestellten Spritzkästen sollen Bohrkerne entnommen werden, an denen die einaxiale Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und die Permeabilität gemessen wird.

Das vorliegende Vorhaben MgO-S³ schafft wissenschaftliche und technische Voraussetzungen für die Konzeption und den Bau von Streckenverschlussbauwerken aus MgO-Spritzbeton, die für eine genehmigungsfähige Errichtung zukünftiger Streckenverschlussbauwerke aus MgO-Spritzbeton in zukünftigen HAW-Endlagern im Steinsalz genutzt werden können.

Mit dem Forschungsvorhaben MgO-S³ konnten wesentliche neue Erkenntnisse für ein Verschlussbauwerk aus MgO-Spritzbeton gewonnen werden. Gleichzeitig sind neue Fragen entstanden bzw. es konnten nicht alle Fragen beantwortet werden. Neue Erkenntnisse können bei Spritzbeton nur in Großversuchen gewonnen werden, da Spritzbeton in Laborversuchen nicht herstellbar ist und vor allem der Temperaturverlauf beim Abbinden nur im Großversuch realistisch gemessen werden kann. Auch zerstörungsfreie Messungen beim Spritzbeton bis in größere Tiefe (z.B. mit einem verbesserten LAUS-Gerät) können nur durch in-situ Messungen weiterentwickelt werden.

Das Team des Verbundprojektes MgO-S³ dankt dem Projektträger Karlsruhe sehr für die Förderung und die Betreuung des Projektes und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz für die finanzielle Förderung!

Literaturverzeichnis

- [1] Kulenkampff, J.: „MgO-S³: „MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz - Röntgen-CT und Positronen-Emissions-Tomographie“, Abschlussbericht des HZDR, FKZ: 02E11769B; Januar 2023 (in Bearbeitung).
- [2] Niederleithinger, E.; Effner, U., Lay, V.: „Ultraschall-Messungen in der Grube Teutschenthal im Rahmen des Projekts „MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz“ (MgO-S³)“, Abschlussbericht der BAM, FKZ: 02E11767; 16.05.2022.
- [3] Zusammenfassender Abschlussbericht zum Vorhaben CARLA: „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV“ vom 31.12.2010. FKZ: 02C1204.
- [4] Abschlussbericht zum Vorhaben MgO-SEAL: „MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl₂-Lösung“ vom 29.02.2020, TU Bergakademie Freiberg; FKZ:02E11435.
- [5] Freyer, D.; Gruner, M. & Popp, T. (2015): „Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs“. FKZ: 02E10880. Freiburger Forschungshefte E 15, TU BA Freiberg, ISBN 978-3-86012-516-8.
- [6] DGZfP. Merkblatt B 04: „Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen“, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung. Berlin, 2018; p 67
- [7] Krause, M.: „Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen“. In Bauphysik-Kalender 2004, Cziesielski, E., Ed. Ernst und Sohn: Berlin, 2004; pp. 341-352.
- [8] Wiggerhauser, H.; Samokrutov, A.; Mayer, K.; Krause, M.; Alekhin, S.; Elkin, V.: „Large Aperture Ultrasonic System for Testing Thick Concrete Structures“. Journal of Infrastructure Systems, 2016, 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000314, doi:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000314.
- [9] Wiggerhauser, H.; Niederleithinger, E.; Milmann, B.: „Zerstörungsfreie Ultraschallprüfung dicker und hochbewehrter Betonbauteile“. Bautechnik, 2017, 94, 682-688.
- [10] Effner, U.; Mielentz, F.; Niederleithinger, E.; Friedrich, C.; Mauke, R.; Mayer, K.: „Testing repository engineered barrier systems for 381 cracks - a challenge“. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 2021, 52, 19–31. <https://doi.org/10.1002/mawe.202000118>.
- [11] Effner, U., Mielentz, F., Niederleithinger, E., Friedrich, Ch., Mauke, R., Mayer, K.: „Prüfung von Abdichtbauwerken für Endlager auf Risse – eine Herausforderung/ Testing repository engineered barrier systems for cracks - a challenge“. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik/ Materials Science and Engineering Technology, 2021, 52, 19-31, DOI: 10.1002/mawe.202000118.
- [12] Mayer, K., und P.M. Cinta: „User Guide of Graphical User Interface interSAFT“. University of Kassel, Department of Computational Electronics and Photonics, 2012.
- [13] Mayer, K.; Langenberg, K.J.; Krause, M.; Milmann, B.; Mielentz, F.: „Characterization of reflector types by phase-sensitive ultrasonic data processing and imaging“. J Non-destruct Eval, 2008, 27, 35-45, doi:10.1007/s10921-008-0035-3.
- [14] Mielentz, F.: „Einsatzpotenzial von laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen“. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2006.
- [15] Mayer, K.; Milmann, B.; Krause, M.; Mielentz, F.: „Methode zum Nachweis von Verpressfehlern in Spannbeton durch Phasenauswertung bei Ultraschallecho-Verfahren“, ZfP-Zeitung, 2008, 112 37-40.

-
- [16] Patent DE 10 2006 027 132 B1: Verfahren zum Detektieren von Fehlstellen in Betonbauteilen, Patentinhaber: BAM: Milmann, B.; Krause, M.; Mielentz, F., Mayer, K., Veröffentlichungstag: 15. April 2010, US 2009 0229 363 A1, Veröffentlichungstag: 17. September 2009.
- [17] DIN EN 14488-2 (2006): Prüfung von Spritzbeton – Teil 2: Druckfestigkeit von jungem Spritzbeton.
- [18] DIN 18551 (2014): Spritzbeton – Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbeton.
- [19] Knabe, Ph.: „Vergleich der Druck- und Zugfestigkeit unterschiedlicher MgO-Betonrezepturen“. Studienarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 31.3.2019, unveröffentlicht.
- [20] Kison, V.: „Vorschlag einer optimierten Zusammensetzung eines Zuschlag-Ton-Gemisches“. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 31.10.2019, unveröffentlicht.
- [21] Detering, V.: „Einfluss der Gesteinskörnung auf die Verarbeitbarkeit und die Festigkeit von MgO-Spritzbeton“. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 31.10.2020, unveröffentlicht.
- [22] ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, TU Bergakademie Freiberg (IfAC), Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Schachtanlage Asse II: Nachweis der Langzeitbeständigkeit für den Sorelbaustoff der Rezeptur A1, BGE (2018).
- [23] DIN 66133: „Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion“, Juni 1993.
- [24] Herold G. (1999): „Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineralsauren Wässern“, Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe Heft 36, Universität Karlsruhe, Dissertation.
- [25] Klopfer, H. (1974): „Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen“, Bauverlag GmbH, Wiesbaden.
- [26] Liesgang D. (1991): „Zur Korrosionssicherheit des einbetonierten Bewehrungsstahls in Abhängigkeit von der Permeabilität des Betons“; Dissertation.
- [27] Sosoro M. (1995): „Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton“, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, 3-410-65.
- [28] Eberhardt W. (1995): „Zusammenhänge zwischen Struktur und Dichtheit von Beton“, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Dissertation.
- [29] THEREDA: Thermodynamische Referenz-Datenbasis. <https://www.thereda.de/de>
- [30] Söhnel, O.; Novotný, P.: „Densities of aqueous Solutions of inorganic substances“, academia, 1985.
- [31] Arifin, Y. F. (2008): „Thermo-Hydro-Mechanical Behavior of Compacted Bentonite-Sand Mixtures: An Experimental Study“. Dissertation. Bauhaus-University Weimar.
- [32] Sachs, L.: „Angewandte Statistik, Planung und Auswertung, Methoden und Modelle“. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 5. Aufl., ISBN 0-387-6443-5, 1973.
- [33] Gessler, K. (1983): „Vergleich der einaxialen Zugfestigkeit mit der Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit und unterschiedlichen Spaltzugfestigkeiten“, Kali und Steinsalz, Bd.8 (1983) Heft 12, 416-423.
- [34] Heidelberger Zement (2017): „Betontechnische Daten“, HeidelbergCement AG, 69181 Leimen.
-

-
- [35] IfG (2010): „Modellberechnungen für das Komplettbauwerk“, in: Knoll, P., FINDER, M. & Kudla, W. (2010): CARLA - „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV“ (FKZ 02C1204). TB 6 (Teilbericht 6); IfG vom 31.08. 2010; 174 Seiten, 17 Abbildungen; 1 Tabelle, 116 Anlagen.
- [36] IfG (2016): „Abschließende Analyse und Bewertung der langzeitigen gebirgsmechanischen Entwicklung - 2. Fortschreibung des Langzeitsicherheitsnachweises vom 30.06.2000 für das Grubengebäude der GTS“, Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 15.07.2016. (211).
- [37] Popp, T., Salzer, K., Weise, D. & Wiedemann, M. (2010): „Hydraulische Barrierenintegrität von carnallititischen Salzgebirge“, Kali und Steinsalz, Heft 2/2010, 16 – 23.
- [38] Teilbericht 7 zum Vorhaben CARLA: „Errichtung und Test von Funktionslementen; Großversuche GV1, GV2 und GV3“, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 03.12.2010. FKZ: 02C1204.
- [39] Itasca Consulting Group, Inc. (2019): „FLAC3D — Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions“, Ver. 7.0. Minneapolis: Itasca.
- [40] Onken, P., and F. Rostásy. (1995): „Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang“, DAFStb Heft 449. Berlin: Beuth-Verlag.
- [41] Luckner, L.; Schestakow, W.M. (1986): „Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich“. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.
- [42] Cosenza, Ph.; Ghoreychi, M.; Bazargansabet, B. (1997): “Mesure de la perméabilité in situ du sel/In situ permeability measurement in salt”. Revue Francaise de Geotechnique, Nr. 79 (1997).
- [43] Förster, S. (1970): „Dichtheitsprüfung des Jüngeren Steinsalzes im Schacht Burggraf“. Bergakademie Freiberg, Sektion Geotechnik und Bergbau, Lehrstuhl für Tiefbohrtechnik und Erdölgewinnung.
- [44] Förster, S. (1985): „Gasdruckbelastbarkeit und Rissbildung der für die unterirdische Gasspeicherung bedeutsamen Salinargesteine des Zechsteins“. Dissertation, Bergakademie Freiberg, Sektion Geotechnik und Bergbau; veröffentl. in: Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Freiburger Forschungsheft A 724.
- [45] Häfner, F.; Belohlavek, K.-U.; Förster, S.; Pohl, A.; Behr, A. (2001): „In situ Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge“. Abschlussbericht 2001, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau.
- [46] Häfner, F.; Förster, S.; Pohl, A.; Behr, A. (1998): „Dichtheitsuntersuchungen der Ortsbrust EU, 1. Teilbericht zum BMBF- und TMLNU-geförderten Vorhaben, Förderkennzeichen 02 C 0527 6, In-situ-Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge“, April 1998.
- [47] Knoll, P.; FINDER, M.; Kudla, W. (2010): „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV – Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. Zusammenfassender Abschlussbericht“, BMBF FuE Vorhaben 02C1204, Grube Teutschenthal, 145 S.
- [48] Stormont, J.C. (1997b): „In Situ Gas Permeability Measurements to Delineate Damage in Rock Salt“. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 7.
- [49] Weber, J.R.; Wallner, M. (1998): „Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
-

- [50] Philipp, N. (2006): „Einführung in die Probleme des Physikalischen Praktikums“. Fachhochschule Lausitz Senftenberg, Einführungsheft, 6. Auflage, 2006.
- [51] Lay, V.; Effner, U.; Niederleithinger, E.; Arendt, J.; Hofmann, M.; Kudla, W.: “Ultrasonic quality assurance at magnesia shotcrete sealing structures”, *Sensors* 2022, 22(22), 8717, <https://doi.org/10.3390/s22228717>

Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
AP	Ansatzpunkt
BAG	Betonierabschnittsgrenze
B	Bohrung
BET	Analyseverfahren zur Größenbestimmung von Oberflächen, benannt nach den Entwicklern: Brunauer, Emmett, Teller
BS	Bruchstück
CT	Computertomographie
D	Durchmesser
DB	Druckbeaufschlagung
DK	Druckkammer
EW	Einzelwert
Fa.	Firma
F _R	relative (Luft-) Feuchtigkeit
FS	Feinsalz
gD	großes Dilatometer
GSBV	Großspritzbetonversuch (in situ)
GV	Großversuch
HAW	hoch radioaktiver Abfall ("high active waste")
HVZ	Haftzugversuch
IfAC	Institut für anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg
IL	Intervalllänge
KAB	Konturabstand
kD	kleines Dilatometer
KS	Kernstück
L	Länge
LAUS	Large Aperture Ultrasonic System
LD	Luftdruck
LW	Lieferware
Max	Maximalwert
Min	Minimalwert
MP	Messpunkt
MW	Mittelwert
n.b.	nicht bestimmt
OK	Oberkante
OM	Optische Mikroskopie
PET	Positronen-Emissions-Tomografie
PV	Pneumatischer Vortest
PR	Prüfraum
rLF	relative Luftfeuchte
SBV	Spritzbetonversuch (Technikumsversuch)
SZ	Spaltzugversuch
TC	Triaxialer Kompressionsversuch

TCMS	Triaxialer Mehrstufen-Kompressionsversuch
TG	Trockengemisch
Tr	Trocknung
UK	Unterkante
VWZ	Verwitterungszone

Symbolverzeichnis

$(\alpha - \alpha_0)_{\min}$	Minimale Differenz zwischen Hydrationsgrad und Mindesthydrationsgrad	[-]
$Q_{Ce, \max}$	Maximale Hydrationswärme bis Ende Verschluss	[kJ/kg]
α_0	Mindesthydrationsgrad	[-]
$\alpha_{\max, q}$	Maximaler Hydrationsgrad für Wärmefreisetzung	[-]
$\sum V_{L,i}$	kumulatives Lösungsvolumen über die ausgetauschten Porenvolumina bzw. alle Einzelstufen "i"	[cm ³]
a	Neigung Bohrung	[°]
b	Jonasson-Materialparameter	[-]
B	Kinetischer Parameter	[-]
c	Dichte des bindenden Materials	[kg/m ³]
c	Kohäsion in Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge, konservativer Ansatz	[MPa]
c	Materialparameter für einaxiale Druckfestigkeit	[-]
C_C	Gesamtkonzentration gelöste Komponenten	[g/l]
c_p	Spezifische Wärmekapazität	[-]
dT_{\max}	Maximal mögliche Temperaturerhöhung unter adiabatischen Bedingungen	[K]
E_A	Aktivierungsenergie	[kJ/mol]
f_{cte}	Referenzparameter für einaxiale Zugfestigkeit nach Ende Hydratation	[MPa]
F_{\max}	axiale Bruchlast	[kN]
G_{cte}	Referenz-Schubmodul für $\alpha = 1$	[MPa]
G_{MgCl_2}	Gehalt an MgCl ₂ in der Lösung	[g/l]
i	Zählvariable, Einzelstufe, in der eine gewisse Menge Lösung in den Porenraum eindringt und mit dem Baustoff reagiert	[-]
J	Gütekriterium	[Pa]
K_{cte}	Referenz-Kompressionsmodul für $\alpha = 1$	[MPa]
$k_{Ph, abs}$	absolute Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
$k_{Ph, eff}$	effektive Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
$k_{Ph, rel}$	relative Permeabilität der Fluidphase	[-]
L	erforderliche Mindestlänge des Widerlagers	[m]
m_F	Masse Feststoff	[g]
$m_{F, kor}$	Masse Feststoff, trocken, korrigiert	[g]
$m_{F, f}$	Masse Feststoff, feucht	[g]
$m_{F, tr}$	Masse Feststoff, trocken	[g]
mL	Masse Lösung	[g]
M_{MgCl_2}	Molmasse MgCl ₂	[g/mol]
M_{MgO}	Molmasse MgO	[g/mol]

MV	Molverhältnis MgO/MgCl ₂	[-]
m _W	Masse Wasser	[g]
N	Anzahl Messpunkte, p = f(t)	[-]
n	Porosität des MgO-Baustoffes nach Aufsättigung mit Lösung	[-]
n ₀	Porosität des MgO-Betons im Ausgangszustand	[-]
s _n	Normalspannung	[Pa]
n _t	totale Porosität	[-]
p	axiale Belastung des Widerlagers (maximaler Flüssigkeitsdruck)	[MPa]
p _{cap}	Kapillardruck	[Pa]
p _{i,B}	Druck berechnet	[Pa]
p _{i,M}	Druck gemessen	[Pa]
Q _{Beton,max}	Maximale Wärmemenge Spritzbeton	[kJ/kg]
Q _{BM,max}	Maximale Wärmemenge Binder	[kJ/kg]
r _P	Porenradius	[m]
r	Radius der Kontaktfläche	[m]
R	Universelle Gaskonstante	[kJ/(mol·K)]
R _{äqu}	äquivalenter Radius	[-]
$\frac{m(t)-m_0}{m_0}$	relative Massenänderung	[-]
S	Sättigung des Porenraumes	[-]
t _{res}	Schubspannung	[Pa]
S _L	volumetrische Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit	[-]
t1	Jonasson-Parameter für Zeit	[s]
t1	Startpunkt der Hydratation	[h]
T _{Ref}	Referenz-Temperatur	[K]
V	Volumen des MgO-Betons	[cm ³]
V _{L,spez.}	Spezifisches Lösungsvolumen	[-]
V _{P,0}	Porenvolumen im Ausgangszustand	[cm ³]
W	Wärmeleitfähigkeit	[m/K]
W _F	Feuchtegehalt	[-]
w _L	Lösungsgehalt	[-]
X	Wertebereich S _L (0 ≤ X ≤ 1)	[-]
α _t	Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/K]
δ	Kontaktwinkel (δ _{Hg-Luft} (25 °C) = 140°)	[°]
λ	Thermische Leitfähigkeit	[kW/(m·K)]
ρ _d	Trockendichte	[g/cm ³]
ρ _L	Dichte Lösung	[g/L]
ρ _s	Reindichte	[g/cm ³]
γ	Grenzflächenspannung (σ _{Hg-Luft} (25 °C) = 480 mN/m)	[N/m]
σ	Radiale Spannung (Kontaktdruck)	[MPa]
Φ	Reibungswinkel in der Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge	[°]
ε	Fehler der x-Werte	[-]
s _T	direkte Zugfestigkeit	[MPa]
α	Materialparameter für elastische Moduln als Funktion vom Hydrationsgrad Exponent a	[-]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	schematischer Längsschnitt GV2	13
Abbildung 2:	Schema zum Anfahren des Freischnittbereiches am GV2 (Draufsicht)	14
Abbildung 3:	Versuchsbauwerk GV2 mit seitlicher Auffahrung.....	15
Abbildung 4:	Kontaktbereich MgO-Beton und Carnallit mit Verpressmaterial	16
Abbildung 5:	Abtragen der Salzschiicht mittels Bohrmeißel	17
Abbildung 6:	freigelegter Bereich	17
Abbildung 7:	Denepox (gelb) in Schuppen.....	18
Abbildung 8:	freigelegte Kontur mit Denepox unter UV-Licht	19
Abbildung 9:	freigelegter Bereich mit Verpressebenen und -materialien	20
Abbildung 10:	freigelegte Mantelfläche und Messfeld 2 für Ultraschalluntersuchungen der BAM	21
Abbildung 11:	Lage der drei Messfelder der BAM für das Messsystem LAUS am Großversuch GV2	21
Abbildung 12:	Seitenansicht der Ultraschallmessfelder der BAM an der rechten Mantelfläche des Bauwerkes GV2.....	22
Abbildung 13:	Ortsbrust des GV2 mit Bohrungen	24
Abbildung 14:	Ergebnisse der Kamerabefahrung B48 (Länge: 6,30 m, Durchmesser: 100 mm, Neigung: 0,0°) – lösungsführende BAG bzw. Risse. (li.) Bohrlochfotos; (re.) Ergebnisse aus Bohrloch-Durchschallungsmessungen mittels der Bohrlochsonde des IfG.....	25
Abbildung 15:	LAUS-Prüfkopf mit 32 zusammenschalteten Einzelprüfköpfen, einsetzbar als Sender oder Empfänger.....	26
Abbildung 16:	Montage der LAUS am Abdichtbauwerk mit Vakuum-Saugfüßen in einer Messschablone	26
Abbildung 17:	Zeichnung der Rekonstruktionsachsen relativ zum markierten LAUS-Messfeld 2.....	28
Abbildung 18:	Messfeld 2 mit montierter LAUS.....	28
Abbildung 19:	3D-Rekonstruktion der LAUS-Messergebnisse für das Messfeld 2 am GV2. Der xy-Schnitt oben links liegt parallel zur Messfläche in z = -3,80 m Tiefe. Die Schnitte zeigen xz- und yz-Profile.	28
Abbildung 20:	Auswertung des Langzeit-Monitorings am GV2 im Zeitraum vom 20.10.2008 bis 07.10.2019; das Inset zeigt die Anordnung der Messgeber im Bereich des „Zahns“	30
Abbildung 21:	a) Spannungsverteilung im Salzpfiler zwischen GV2 und GV3 in der Horizontalbohrung 2019 sowie entsprechend den früheren Messungen 2009 in drei Bohrungen mit unterschiedlicher Richtung. Das Inset zeigt die Lage der Bohrung 2019 mit den verschiedenen Messpunkten; b) Tabellarische Auflistung der teufenabhängigen Spannungswerte	31
Abbildung 22:	Monitoring der Flächendruckgeber während der Druckbeaufschlagungen des GV2 mittels Lösung im Zeitraum Anfang 2017 bis Frühjahr 2019	33
Abbildung 23:	Detailausschnitt der Druckbeaufschlagungen am GV2 über schrittweise erhöhte Druckstufen.....	33
Abbildung 24:	Druckstoßtest zur Permeabilitätsbestimmung im Dammkern (ca. 18 m); a) gemessene Druckabfallkurve mit schrittweiser numerischer Anpassung (3 Bereiche mit abnehmender Porosität); b) schematische Fluidausbreitung um die 2-fach-Packer-Messsonde; c) 2D-Druckverteilung im Porenraum am Ende des Injektionstests (Auswertung mittels COMSOL).....	35

Abbildung 25:	Permeabilitätsmessungen in der HF-Horizontalbohrung 2019; a) Druckstoßtests: 8 m – Carnallitit-Pfeiler, 16,4 m – Kontaktfuge Gebirge/Beton, 18 m - im Zentrum des Damms; b) Bestimmung der Steifigkeit der Messanordnung; c) Messort (u.a. Datenlogger mit Injektionspumpe K3)...35
Abbildung 26:	Schematische Darstellung der Lage der Bohrungen B45 und B46 im Streckenverschlussbauwerk GV2 – links: Draufsicht, rechts: Seitenansicht37
Abbildung 27:	Lage der Bohrungen B45 und B46 im Streckenverschlussbauwerk GV2 ..38
Abbildung 28:	Verwendete Versuchsausrüstung für die Testung der Bohrung B45 mit MgCl ₂ -haltiger, NaCl-gesättigter Lösung im Teufenbereich 0,43 m bis 2,36 m39
Abbildung 29:	Kern aus der Bohrung B45.....40
Abbildung 30:	In-situ ermittelte Permeabilität für Gas in den Bohrungen B45 und B4640
Abbildung 31:	Temperatur und rel. Luftfeuchte während der Druckhaltephasen43
Abbildung 32:	Volumenstrom und Druckganglinie während der Druckhaltephasen.....44
Abbildung 33:	Anordnung der Bohrungen B48 und B42b an der Ortsbrust des GV245
Abbildung 34:	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 [4] 50
Abbildung 35:	Probeentnahmebereich für Proben Hg-Porosimetrie - Bohrung B4250
Abbildung 36:	Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser – Ergebnisse der Untersuchungen für Trocknung bei ca. 25 °C und ca. $F_R = 32,5 \%$ sowie maximale Porendurchmesser bis 900 µm51
Abbildung 37:	Kapillardruck in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit – Ergebnisse der Untersuchungen für Trocknung bei ca. 25 °C und ca. $F_R = 32,5 \%$ sowie maximale Porendurchmesser bis 900 µm.....52
Abbildung 38:	Gaspermeabilität von Kernproben aus den Bohrungen GV2 (B40, B41, B44 und B48)53
Abbildung 39:	Oben: Foto der Kernstrecke der B47, Mitte: µCT-Oberflächenabbildung der Kernstücke, Unten: Längsschnitte der µCT-Aufnahmen. Aufnahmeparameter: Nikon XTH225, 200 kV, 200 µA, Filter: 3.5 mm Cu, 1 frame/s, Voxelgröße 50 µm, 8 frames/projection54
Abbildung 40:	Größenverteilungen der segmentierten Poren (links) und Körner (rechts) von Teilvolumina der Aufnahmen aus Abbildung 39. Die Porengröße wurde bestimmt als Thickness Map (größter enthaltener Kugeldurchmesser), die Korngröße als Breadth (größter Korndurchmesser senkrecht zur Längsachse, entspricht Siebdurchgang) (Volumenangabe der Verteilungen in cm ³).....55
Abbildung 41:	Das Volumenrendering der Poren (links) zeigt zum Zentrum der BAG (helles Rechteck) hin abnehmende Porengröße bis hinunter zur Detektierbarkeitsschwelle, außerdem nimmt in dieser Zone die Anzahl an großen Körnern ab (rechts).56
Abbildung 42:	Charakterisierung von BAGs mit Hilfe der Poren- und Korngrößenverteilung aus µCTs. Die Verteilungen wurden über Ebenen parallel zu den vermuteten BAGs zusammengefasst und als farbkodierte Profile dargestellt. Bei Probe 1 und 3 ist ein erhöhter Anteil feiner Poren und feiner Körnung zu erkennen (gelb), sowie der Ausfall grober Körnung. Bei Probe 2 ist dieser Effekt undeutlich, bzw. keine BAG detektierbar.57

Abbildung 43:	Schutzring-Oberflächenpacker für Injektionsexperimente mit PET-Beobachtung. In den überlagerten PET/ μ CT-Bildern ist die mit Tracer gefüllte innere Zelle aufgrund ihrer Aktivität zu erkennen. Die blauen Markierungselemente sind in beiden Bildgebungsmodalitäten sichtbar und dienen für die Ko-Registrierung der Bilder.....	58
Abbildung 44:	Füllstandsermittlung im Flüssigkeitsreservoir durch Radiographie (links). .	59
Abbildung 45:	Entwicklung der Aktivitätsverteilung aus PET-Messungen (3 von 28). Links: Volumenrendering zeigt das aufgegliederte Eindringmuster, rechts: Querschnitt als PET/ μ CT-Fusionsbild zeigt das tiefere Eindringen entlang einer porösen Struktur sowie lokale diffuse Ausbreitung.	60
Abbildung 46:	Kernmaterial aus der Bohrung B47	62
Abbildung 47:	Versagensbilder nach dem Zugbruch (in der Prüfmaschine) mit Ansicht der Bruchflächen. Zusätzlich ist jeweils die gemessene Zugfestigkeit angegeben.....	63
Abbildung 48:	Direkte Haftzugfestigkeit (li.) und indirekte Zugfestigkeit (=Spaltzugfestigkeit) (re.) von Probenmaterial aus der Bohrung B42 – Probenserie 624 (Vorhaben MgO-SEAL) und der Bohrung B47 – Probenserie 696.	63
Abbildung 49:	Messsignale am TDR-Sensor 3 vom 04.12.2019 bis 23.07.2020	66
Abbildung 50:	Fotos vom Bohrkern aus der Bohrung B57	67
Abbildung 51:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse des Probestückes aus der Bohrung B57 ..	67
Abbildung 52:	Zeitabhängige ortsaufgelöste Phasenanalyse des Probestückes aus der Bohrung B57	68
Abbildung 53:	Zeitliche optische Veränderungen der freigelegten seitlichen GV2-Oberfläche	68
Abbildung 54:	Phasenanalyse eines Probestückes aus der seitlichen GV2-Oberfläche nach Freilegung.....	69
Abbildung 55:	Fotos der Bohrkerngewinnung für dielektrische Messungen	69
Abbildung 56:	Fotos der für die dielektrischen Messungen gewonnenen Bohrkern.....	70
Abbildung 57:	Koaxialmesszelle (mitte: Draufsicht, rechts: Seitenansicht).....	70
Abbildung 58:	Koaxialmesszelle und Anschlüsse an den Netzwerkanalysator.....	70
Abbildung 59:	Dielektrische Messungen der Carnallitproben: Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der frequenzabhängigen Permittivität der pulverisierten Salzproben.....	71
Abbildung 60:	Dielektrische Messungen der Carnallitproben nach der Trocknung: Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der frequenzabhängigen Permittivität.....	72
Abbildung 61:	Realteil der Permittivität (ϵ_r) in Abhängigkeit der Trockendichte (ρ_r) der Carnallitproben.....	72
Abbildung 62:	Oberflächensonde mit 100 mm Bohrkern (links) bzw. 50 mm Bohrkern (rechts).....	73
Abbildung 63:	Dielektrische Messungen der MgO-Betonproben: Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der frequenzabhängigen Permittivität.....	73
Abbildung 64:	Probenfotos und Pulverdiffraktogramme der Probe 1 aus dem Konturbereich	74
Abbildung 65:	Probenfoto und Pulverdiffraktogramm der Probe 2 aus dem Konturbereich .	74
Abbildung 66:	Probenfoto und Pulverdiffraktogramm der „Schuppen“ (= Injektionsmaterial Denepox)	75
Abbildung 67:	Übersicht der Kernscheiben der Überbohrung B40 zur Phasenanalyse	76

Abbildung 68:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Kernscheibe bei 0,50 m aus der Überbohrung B40.....	76
Abbildung 69:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Kernscheibe bei 1,10 m aus der Überbohrung B40.....	77
Abbildung 70:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Kernscheibe bei 1,90 m aus der Überbohrung B40.....	77
Abbildung 71:	Phasenanalyse des Bohrlochinneren der Überbohrung B40	78
Abbildung 72:	Vergleich der Pulverdiffraktogramme der MgO-LW-Proben der Charge G10/16 (Styromag) mit den MgO-LW-Proben G75 und G80 mit erhöhtem CaO-Gehalt (FuE-Projekt MgO-SEAL) (blaue Diffraktogramme).....	81
Abbildung 73:	Für Technikumsversuche eingesetzte Spritzmaschine WM-14U (Firma Werner Mader) (Eigentum der TUBAF).....	86
Abbildung 74:	Aufbau zu den Spritzbetonversuchen.....	88
Abbildung 75:	Schema zu den Spritzbetonversuchen im Technikum und in situ.....	100
Abbildung 76:	Abhängigkeit des MgO-Überschusses (Rest MgO) im Binder und im MgO-Beton	102
Abbildung 77:	Aufbau zur Spritzmaschine	104
Abbildung 78:	vorbereitete Spritzfläche mit seitlichen Begrenzungen aus Holz und den Positionen der Thermoelemente (TE) beim GSBV1	105
Abbildung 79:	Positionierung der Thermoelemente	106
Abbildung 80:	schematische Seitenansicht des GSBV1 mit Position der Thermoelemente	108
Abbildung 81:	Kornverteilungskurven des Zuschlags aus der Lieferware und aus dem Rückprall.....	109
Abbildung 82:	Spritzbetonfläche des GSBV1 mit den Kernbohrungen	110
Abbildung 83:	Bohrkern der Bohrung B14 aus dem GSBV1	111
Abbildung 84:	Bohrkern der Bohrung B17 aus dem GSBV1	111
Abbildung 85:	Bohrkern der Bohrung B35 aus dem GSBV1	111
Abbildung 86:	Lunker am Kern der B16.....	111
Abbildung 87:	poröser Bereich am Kern der B16	111
Abbildung 88:	Riss am Kern der B2.....	112
Abbildung 89:	Riss am Kern der B18	112
Abbildung 90:	trockener Bereich an einer Bruchfläche der B8	112
Abbildung 91:	Frühfestigkeit der Schichten 2 bis 6 beim GSBV1	113
Abbildung 92:	einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV1 über die Tiefe	115
Abbildung 93:	einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV1 in Abhängigkeit des Prüfaltes.....	115
Abbildung 94:	Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV1 über die Tiefe.....	117
Abbildung 95:	Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV1 in Abhängigkeit des Prüfaltes.....	117
Abbildung 96:	Direkte Zugfestigkeit an Proben des GSBV1 aus Schicht 6 nach 17 bzw. 23 d Prüfaltes bzw. aus Schicht 5 nach 25 bzw. 28 d: (li.) Einzelergebnisse, (re.) Boxplots zur Darstellung der Streuung der verschiedenen Einzelversuche (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75, sowie als Strich der Medianwert (0,5), und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x).	118
Abbildung 97:	Untersuchung der Schicht 5 (Auftreten von Chlorartinit): (li) Kernstücke mit Prüfbereich, darunter die jeweiligen Prüfkörper mit der Versagensfläche nach Zugversuch; (Mitte) Schichtprofil GSBV1 mit Kernstückausschnitt zum Auftreten von Chlorartinit.....	119

Abbildung 98:	Übersicht zur Anordnung der Messpunkte und der Spritzbetonschichten/BAG im GSBV1 /B36.....	120
Abbildung 99:	Temperaturentwicklung beim GSBV1.....	122
Abbildung 100:	Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Schichtmächtigkeit beim GSBV1	123
Abbildung 101:	Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Zeit zwischen Spritzende und Erreichen der Maximaltemperatur beim GSBV1... ..	123
Abbildung 102:	Bohrkern aus der Bohrung B11 aus dem GSBV2.....	126
Abbildung 103:	Bohrkerne aus den Bohrungen B12, B7 und B8 aus dem GSBV2.....	126
Abbildung 104:	Frühfestigkeit der Schichten 1 und 2 beim GSBV2.....	127
Abbildung 105:	Anordnung der Messbohrungen am Spritzbetonkörper des GSBV2.....	129
Abbildung 106:	Bereiche mit Rissen, Fehlstellen und erhöhter Porosität in den Bohrungen am GSBV2	130
Abbildung 107:	Aufbau des GSBV3 mit Position der Thermoelemente	132
Abbildung 108:	Spritzbetonfläche des GSBV3 mit den Kernbohrungen	134
Abbildung 109:	Überblick Kerne des GSBV3 (Auswahl: B1 bis B7)	135
Abbildung 110:	Überblick Kerne des GSBV3 (Auswahl: B17 bis B27)	136
Abbildung 111:	Bruchfläche mit trockenem Bereich am Bohrkern B3 des GSBV3	136
Abbildung 112:	Frühfestigkeit der einzelnen Schichten beim GSBV3	137
Abbildung 113:	Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV3 über die Tiefe	139
Abbildung 114:	Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV3 in Abhängigkeit des Prüfaltes.....	139
Abbildung 115:	Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV3 über die Tiefe.....	141
Abbildung 116:	Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV3 in Abhängigkeit des Prüfaltes.....	142
Abbildung 117:	IfG-Untersuchungsprogramm an Proben des GSBV3	142
Abbildung 118:	Direkte Zugfestigkeit an Proben des GSBV3 (Probenserie 753) aus den Schichten 2, 3 und 4 nach >28 Tagen Prüfaltes: (li.) Einzelergebnisse – gelb markierte Säulen kennzeichnen Versagen an der Kontaktfläche Baustoff / Stahlstempel, (re.) Boxplot zur Darstellung der Streuung der verschiedenen Einzelversuche (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75, sowie als Strich der Median (0,5) und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x)	143
Abbildung 119:	Festigkeits- und Verformungsverhalten im Mehrstufenversuch (732/TCM1): großes Diagramm: Spannungs-Verformungskurve σ_{Diff} vs. σ_{Ax} . Inset: Geomechanische Kennwerte aus den vier Belastungsstufen	144
Abbildung 120:	Triaxiale Festigkeit - MOHR-COULOMB-Diagramme für Proben aus dem GSBV3 und GSBV4. Zusätzlich ist die einaxiale Druckfestigkeit, wie sie standardmäßig von der TU BAF bestimmt wird (Festigkeit nach 28d), dargestellt.	145
Abbildung 121:	Zweistufenversuch zur Bestimmung der Scherfestigkeit der Spritzbetonmatrix einer Kernprobe aus dem GSBV3 - Exp. 732/SV1	146
Abbildung 122:	Mohr-Coulomb-Diagramm auf Basis von Schertests an Baustoff-Kernproben aus dem GSBV3 bzw. GSBV4	147
Abbildung 123:	Relaxationsverhalten der GSBV3- und GSBV4-Proben; (li.) Spannungsabfall (normiert auf Startwert) vs. Zeit; (re.) Transformierter Spannungsverlauf vs. log Kriechrate.....	148

Abbildung 124:	GSBV3 - Permeabilitätstest Kernprobe BK19-1 (Injektion von N ₂ mit schrittweiser Erhöhung der Einspannung); das Inset zeigt schematisch die Permeabilitätsmessanordnung mit radialer Injektionsgeometrie über eine Zentralbohrung.....	149
Abbildung 125:	Schematische Positionierung der Messpunkte für die Permeabilitätsmessungen im GSBV3.....	150
Abbildung 126:	Temperaturentwicklung beim GSBV3.....	152
Abbildung 127:	Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Schichtmächtigkeit beim GSBV3.....	153
Abbildung 128:	Abhängigkeit der Maximaltemperatur in der Schichtmitte von der Zeit zwischen Spritzende und Erreichen der Maximaltemperatur beim GSBV3... ..	153
Abbildung 129:	Aufbau des GSBV4 mit Position der Thermoelemente.....	155
Abbildung 130:	Spritzbetonfläche des GSBV4 mit den Kernbohrungen.....	157
Abbildung 131:	Überblick Kerne des GSBV4 (Auswahl: B9 bis B16).....	158
Abbildung 132:	Frühfestigkeit der einzelnen Schichten beim GSBV4.....	159
Abbildung 133:	Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV4 über die Tiefe.....	161
Abbildung 134:	Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV4 in Abhängigkeit des Prüfaltes.....	161
Abbildung 135:	Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV4 über die Tiefe.....	163
Abbildung 136:	Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV4 in Abhängigkeit des Prüfaltes.....	163
Abbildung 137:	IfG-Untersuchungsprogramm an Proben des GSBV4.....	164
Abbildung 138:	Direkte Zugfestigkeit an Proben des GSBV4 aus den Schicht 1 - 6 (Schichtübergänge/Matrix; nach 28 Tagen Prüfaltes: (li.) Einzelergebnisse – gelb markierte Säulen kennzeichnen Versagen an der Kontaktfläche Baustoff / Stahlstempel, (re.) Boxplot zur Darstellung der Streuung der verschiedenen Einzelversuche (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75, sowie als Strich der Median (0,5), und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x).....	165
Abbildung 139:	Isotrope Kompaktion von GV2-Proben (Laborserie 609) und GSBV4 (Laborserie 758): Spannungs-Verformungskurven bei „schneller“ ($\dot{p} = 0,1$ MPa/s) bzw. bei „langsamer“ Belastung ($\dot{p} = 0,005$ MPa/s).....	167
Abbildung 140:	GSBV4 - Permeabilitätstest 758_Perm-Radial: Injektion von N ₂ mit schrittweiser Erhöhung der Einspannung bei konstant gehaltenem Gasdruck.....	168
Abbildung 141:	Übersicht zur in situ ermittelten Gaspermeabilität in der Bohrung B31	169
Abbildung 142:	Übersicht zur in situ ermittelten Gaspermeabilität in der Bohrung B32	170
Abbildung 143:	Übersicht der eingefüllten Lösungsmengen in den Bohrungen B31 und B32.....	171
Abbildung 144:	Ganglinien der Parameter Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte am Teststandort für den Salzlösungstest in der Bohrung B31.....	172
Abbildung 145:	Ganglinien der Parameter Druck, Volumenstrom und kumulatives Salzlösungsvolumen für den Salzlösungstest in der Bohrung B31.....	172
Abbildung 146:	Zeitabhängige Entwicklung von Volumenstrom und Permeabilität über den Versuchszeitraum.....	173
Abbildung 147:	Temperaturentwicklung beim GSBV4.....	176
Abbildung 148:	Maximale Abbinde-temperatur in Abhängigkeit der Untergrundtemperatur.... ..	177
Abbildung 149:	Düsenführer beim Spritzen.....	179

Abbildung 150:	Quartilswerte aller Haftfestigkeitsversuche (unterschieden nach Baustoffgruppen) im Rahmen von MgO-S ³	182
Abbildung 151:	MOHR-COULOMB-Diagramm der hier untersuchten Sorelbetonchargen (größte Hauptspannung σ_1 vs. kleinste Hauptspannung σ_{\min} bzw. Manteldruck σ_3). Als Referenz sind Festigkeitskurven anderer Sorelbaustoffe sowie das gut belegte Variationsfeld der Festigkeitsuntersuchungen an A1-Beton aus dem ESA-Vorhaben [22] dargestellt. Hinweis: für den Vergleich sind vor allem die Streufelder der unterschiedlichen Baustoffe relevant: GV2 (D4: 5:1:8-Rezeptur mit Silikatzuschlag) im Vergleich zu den „neuen“ Chargen GSBV3 bzw. 4 (5:1:8-Rezeptur mit Salzzuschlag).....	183
Abbildung 152:	Darstellung der Gaspermeabilität, gemessen in situ und an Kernproben aus der Bohrung B31.....	185
Abbildung 153:	Darstellung der Gaspermeabilität, gemessen in situ und an Kernproben aus der Bohrung B32.....	185
Abbildung 154:	Probenpräparation aus Bohrkern B17 aus dem GSBV4.....	186
Abbildung 155:	Probenpräparation aus dem Bohrkern B19 aus dem GSBV4.....	187
Abbildung 156:	Probe P302-9/5 vor Messung k_L	190
Abbildung 157:	Probe P302-9/5 nach Messung k_L	190
Abbildung 158:	Probe P302-9/6 vor Messung k_L	191
Abbildung 159:	Probe P302-9/6 nach Messung k_L	191
Abbildung 160:	Probe P302-16/8 vor Messung k_L Anstromseite.....	192
Abbildung 161:	Druckganglinien p/p_0 für die Probe P302-9/5.....	193
Abbildung 162:	Druckganglinien p/p_0 für die Probe P302-9/6.....	193
Abbildung 163:	Druckganglinien p/p_0 für die Probe P302-16/8.....	194
Abbildung 164:	Manteldruck über die Versuchsdauer der Messungen zur Lösungsporeabilität von Kernmaterial aus dem GSBV3 und GSBV4....	195
Abbildung 165:	Lösungsporeabilität von Kernmaterial aus den Bohrungen B36 (GSBV3) und B32 (GSBV4).....	196
Abbildung 166:	Presse zum Verdichten der Prüfkörper im Labor.....	197
Abbildung 167:	Frühfestigkeit in Abhängigkeit der Zeit an Laborproben, ermittelt mit dem Penetrometer (für die Zahlen in der Legende siehe Tabelle 77).....	199
Abbildung 168:	BAG an Bohrkern B21 des GSBV1.....	199
Abbildung 169:	BAG an Bohrkern B28 des GSBV1.....	200
Abbildung 170:	BAG an Bohrkern B22 des GSBV1.....	200
Abbildung 171:	BAG an Bohrkern B9 des GSBV2.....	201
Abbildung 172:	BAG an Bohrkern B3 des GSBV3.....	201
Abbildung 173:	BAG an Bohrkern B6 des GSBV3.....	202
Abbildung 174:	BAG an Bohrkern B4 des GSBV4.....	202
Abbildung 175:	BAG an Bohrkern B13 des GSBV4.....	202
Abbildung 176:	BAG an Bohrkern B15 des GSBV4.....	203
Abbildung 177:	Bohrkern der B22 des GSBV4 mit BAG und Bruchstelle.....	203
Abbildung 178:	Herstellung von Prüfkörpern zur Untersuchung der Kontaktflächeneigenschaften MgO-Spritzbeton auf Steinsalz. a) Schematische Probenanordnung; b) Spritzen der Kontaktflächenproben vor Ort im Großversuch GSBV4 (Grube Teutschenthal, 28.09.2021); c) vorbereitete Steinsalzprüfkörper; d) vorbereitete Prüfkörper untertage zum Abbinden gelagert.....	205

Abbildung 179:	Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV1 / Steinsalz (Laborserie 717): Haftzugfestigkeit nach 18 bzw. 28 d (braune Balken) (x: kein Probenbild vorhanden).....	206
Abbildung 180:	Morphologie der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV1 / Steinsalz nach Zugversuch (Versagen an der Kontaktfläche) (Labornummer 717/HZF3)	207
Abbildung 181:	Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV3 / Steinsalz; oben: Bruchbilder der „Sandwichprüfkörper“ (12 Proben, Probenalter > 28d) ...	208
Abbildung 182:	Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV4 / Steinsalz; oben: Bruchbilder der „Sandwichprüfkörper“ (6 Proben, Probenalter > 28 d)	209
Abbildung 183:	Haftzugfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton zu Steinsalz in Box-Plot-Darstellung in den GSBV (dargestellt sind als Box die Quartilswerte 0,25 und 0,75, sowie als Strich der Median (0,5), und die Extremwerte sowie der Mittelwert als x)	210
Abbildung 184:	Zweistufenversuch zur Bestimmung der Scherfestigkeit einer MgO-Spritzbeton/Steinsalz-Kontaktfläche - Exp. 754/SV2	212
Abbildung 185:	Mohr-Coulomb-Diagramm zur Scherfestigkeit der Kontaktfläche Spritzbeton GSBV4 / Steinsalz (6 Proben, Probenalter > 28d); (Das Inset zeigt die Kontaktfläche der Probe 754-SV4 nach dem Scherversuch).....	214
Abbildung 186:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse an kompakter Spritzbetonprobe aus dem GSBV1 (Bohrung B7, 32,5 cm – 42,5 cm).....	215
Abbildung 187:	Phasenanalyse an pulverisierten Proben aus hellem und dunklem Bereich des entsprechend Abbildung 186 vermessenen Probestückes aus dem GSBV1 (Bohrung B7, 32,5 cm – 42,5 cm).....	216
Abbildung 188:	Fotos des Bohrkernmaterials der Bohrungen B20 und B30 aus dem GSBV3; S1, S2, S3: 1., 2. und 3. Betonierschicht; rote Linie: Lage BAG	217
Abbildung 189:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 - B30: Bereich mit Schicht 1, BAG und Schicht 2 (s. Abbildung 188).	217
Abbildung 190:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 – B30: Schicht 2 (s. Abbildung 188).....	218
Abbildung 191:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 - B20: Schicht 2 (s. Abbildung 188).....	218
Abbildung 192:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse an Kernprobe aus dem GSBV3 – B20: Schicht 2, BAG und Schicht 3 (s. Abbildung 188)	219
Abbildung 193:	Fotos vom Bohrkern der Bohrung B48 (links) und gewonnene Bohrkernscheiben (rechts).....	220
Abbildung 194:	Lagerung von Proben unter CO ₂ -Atmosphäre über endlagerrelevanter Lösung	221
Abbildung 195:	Zeitlicher Verlauf von relativer Luftfeuchte, Luftdruck und Temperatur in den Exsikkatoren während der Lagerungsversuche (Datenloggerausfälle nach 170 Tagen).....	222
Abbildung 196:	Relative Masseänderungen der Proben über den Versuchszeitraum	223
Abbildung 197:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse auf der Probenscheiben P302-2/13 und P302-2/14 vor und nach der Lagerung in CO ₂ -Atmosphäre und relativer Gasfeuchte von 65±2 % bei 24±4 °C.....	225
Abbildung 198:	Ortsaufgelöste Phasenanalyse der Probescheiben P302-2/18 und P302-2/19 vor und nach der Lagerung in Luft-Atmosphäre bei 65±2 % F _R bei 24±4 °C.....	226
Abbildung 199:	Effektive Gaspermeabilität und Probenvolumina vor (t ₀) und nach (t ₁) der Lagerung in CO ₂ - bzw. Luft-Atmosphäre	227

Abbildung 200:	Relaxationsverhalten der zwei Spritzbeton-Chargen GSBV3 und 4; Transformierter Spannungsverlauf vs. log Kriechrate. Für den Vergleich sind Daten von D4-Ortbeton und verschiedenen C3-Varianten sowie von A1 aus dem ESA-Vorhaben dargestellt.....	229
Abbildung 201:	Bohrkerne GSBV3, Positionen der Proben für PET/CT-Untersuchungen. Die BAG-Zonen sind gelb markiert	231
Abbildung 202:	μCT- Untersuchung der Probe MgO_04 (aus GSBV3, B19):.....	233
Abbildung 203:	μCT-Untersuchung der Probe MgO_06 (aus GSBV3, B21):.....	234
Abbildung 204:	μCT-Aufnahme von GSVBV4 B17. Von oben nach unten: Äußere Volumenansicht; Volumenrendering mit Thickness Map der segmentierten Poren im Ausschnitt, Volumenrendering der Thickness Map; Porositätsprofil.	236
Abbildung 205:	μCT-Aufnahme von GSVBV4 B19. Von oben nach unten: Äußere Volumenansicht; Volumenrendering mit Thickness Map der segmentierten Poren im Ausschnitt, Volumenrendering der Thickness Map; Porositätsprofil.	237
Abbildung 206:	Dilatierte Poren (ca. 60 μ) der Probe GSBV4 B19 mit detektiertem durchgehendem Pfad längs der Schichtung. Die Farbkodierung gibt die Weglänge längs des verbundenen Porenraumes wieder.....	238
Abbildung 207:	PET-Untersuchung an MgO_04 (GSBV3 B19):.....	240
Abbildung 208:	Querschnitte der Ebenen 0, 5, 15, 25 mm unterhalb der Oberfläche mit μCT-Bild (hell: geringe Dichte, dunkel: hohe Dichte) und überlagerter PET-Aktivitätskonzentration, Probe MgO_04. Es ergeben sich drei eng begrenzte Wegsamkeiten mit Querschnitten im Millimeterbereich mit einer Eindringtiefe von etwa 25 mm in den poröseren Zonen.	241
Abbildung 209:	PET-Untersuchung an MgO_06 (GSBV3 B21), PET-Frames 0, 15, 30 und 60 min nach Aufbringen der Lösung. Links: Überlagerung der Längsschnitte von μCT- und PET. Rechts: Volumenrendering der PET-Frames für die initiale und die Wiederholungsmessung; im Hintergrund μCT-Schnitte....	242
Abbildung 210:	Querschnitte der Ebenen 0, 5, 15, 25 mm unterhalb der Oberfläche mit μCT-Bild (hell: geringe Dichte, dunkel: hohe Dichte) und überlagerter PET-Aktivitätskonzentration, Probe MgO_06. Hier ergeben sich zwei eng begrenzte Wegsamkeiten mit Querschnitten im Millimeterbereich und eine etwas diffusere Ausbreitung bis zu einer Tiefe von ca. 10 mm.	243
Abbildung 211:	Isotrope Verlagerung der Porenstrukturen nach außen durch Expansion der Probe. Volumenrendering der ersten Aufnahme, farbkodierte Folgeaufnahmen in einer horizontalen Schnittebene (bezogen auf die Injektion). Der Riss ist in der ersten Aufnahme nur angedeutet (gelbe Linie).	244
Abbildung 212:	Schematische Darstellung des verwendeten MIRA-Messsystem (Typ A 1040).....	246
Abbildung 213:	MIRA-System Bedienfeld und Bildschirm (links) und Transversalwellen-Prüfköpfen (rechts).....	246
Abbildung: 214:	Messschema beim GSBV1.....	247
Abbildung: 215:	Messung mit dem MIRA-Gerät beim GSBV1.....	247
Abbildung 216:	3D-Rekonstruktion der MIRA-Messergebnisse für die Messfläche am GSBV1. Der Schnitt oben rechts liegt parallel zur Messfläche in z = -0,75 m Tiefe.....	248
Abbildung 217:	Ultraschall-Messfeld des GSBV3, links: Skizze mit vertikaler Ausrichtung des MIRA-Messsystems, rechts: MIRA-Messung in horizontaler Ausrichtung, Ultraschall-Messfeld rot umrandet.	249

Abbildung 218:	3D-Darstellung der SAFT-Rekonstruktion der MIRA-Messungen bei vertikaler Ausrichtung des Gerätes mit 3D-Volumen (oben rechts), oberflächenparalleler Tiefenschnitt (oben links, Projektion des Messfeldes rot eingezeichnet) bei $z = -0,3$ m, Vertikalschnitten (xz unten links und yz unten rechts).....	250
Abbildung 219:	GSBV4 mit eingebauten Störkörpern in Ebene 1 (zwischen Schicht 1 und Schicht 2) in 0,8 m Tiefe; roter Rahmen entspricht dem BAM-Messfeld ..	251
Abbildung 220:	Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit allen eingebauten Störkörpern in den 3 Ebenen.....	252
Abbildung 221:	Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit den eingebauten Störkörpern in Ebene 1 in 80 cm Tiefe	252
Abbildung 222:	Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit den eingebauten Störkörpern in Ebene 2 in 48 cm Tiefe	253
Abbildung 223:	Frontansicht des GSBV4 (unterer Teil) mit den eingebauten Störkörpern in Ebene 3 in 32 cm Tiefe	253
Abbildung 224:	links: Messfeld des GSBV4, rechts: Ausrichtung des MIRA-Messgerätes horizontal	254
Abbildung 225:	Rekonstruktion der Ultraschall-MIRA-Messungen bei $z=-0,63$ m, $x=0,45$ m, $y=0,98$ m.....	255
Abbildung 226:	Die Rekonstruktion der Ultraschalldaten mit den Lokationen der eingebauten Störkörper überlagert. Die Ultraschall-Messfläche ist im Tiefenschnitt (oben links) rot markiert.....	256
Abbildung 227:	Lage der Bohrungen im Messfeld der BAM am GSBV4 mit initialer Ultraschallauswertung.....	258
Abbildung 228:	Versuchsbauwerk GSBV4 mit den Bohrungen im BAM-Messfeld	259
Abbildung 229:	Kernmarsche der Bohrungen B33, B34, B35 am GSBV4.....	259
Abbildung 230:	GSBV4 Bohrung B33, 6 cm lange Fehlstelle bei 27 cm Tiefe und kleine Fehlstelle bei 34 cm	260
Abbildung 228:	Bohrung B33 im GSBV4, Inhomogenität bei 63 cm Tiefe	260
Abbildung 229:	Bohrung B33 im GSBV4, Fläche im Bereich der Inhomogenität bei 63...64 cm, ohne Verbund bei der Bohrkernentnahme.....	260
Abbildung 230:	Bohrung B34 im GSBV4, sichtbare Inhomogenität bei 60...61 cm Tiefe ..	261
Abbildung 234:	Bohrung B34 im GSBV4, lokaler Spalt bei 67 cm Tiefe	261
Abbildung 235:	Bohrung B35 im GSBV4, Fehlstelle bei 31 cm Tiefe	261
Abbildung 236:	Bohrung B35 im GSBV4, Bruchfläche in 32 cm Tiefe.....	261
Abbildung 237:	Bohrung B35 im GSBV4, weißer Streifen in der Betonstruktur in 65 cm Tiefe	262
Abbildung 238:	Ergebnisse der Temperaturmessung am in situ Bauwerk GV2 vom 18.03.2008 bis 25.03.2008 bei einer Bauwerkslänge von 1,64 m bis 1,83 m [38].....	264
Abbildung 239:	Schnittbilder (von Ausschnitten) aus dem in FLAC3D aufgebauten Modell für die Vergleichsrechnung zum in situ-Versuch GSBV4 zur Anpassung der Parameter. Links: Blick von oben auf einen Querschnitt. Rechts: Blick von der Seite auf einen Längsschnitt	268
Abbildung 240:	Perspektivische Sicht durch das FLAC3D-Modell. Die FLAC3D-Zonen (Elemente) sind in Gruppen für den Homogenbereich Steinsalz und die Betonschichten 1 bis 6 zusammengefasst.....	269
Abbildung 241:	Lage der History-Punkte für die Vergleichsrechnung. Draufsicht auf einen Querschnitt des Modells.....	270

Abbildung 242:	Zur Simulation eines Luftspalts erhält ein Bereich zwischen dem Spritzbeton und dem Steinsalz eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Ausdehnung des Luftspaltbereichs ist 5,34 cm.	271
Abbildung 243:	Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Vergleichsrechnung ..	271
Abbildung 244:	Vergleich von Temperaturkurven aus dem in situ-Versuch GSBV4 (oben) mit den nachgerechneten Temperaturkurven (unten).....	272
Abbildung 245:	Draufsicht auf einen Querschnitt (von einem Ausschnitt) des FLAC3D-Modells des geplanten Versuchsbauwerks.....	273
Abbildung 246:	Längsschnitt durch das Modell für das geplante Versuchsbauwerk.....	273
Abbildung 247:	Lage der History-Punkte im Modell für das Versuchsbauwerk (Längsschnitt). In der Mitte der Betonschicht: History-Punkte 1 bis 3. Unten: History-Punkte 4 bis 6	274
Abbildung 248:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 25 cm	275
Abbildung 249:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 20 cm	275
Abbildung 250:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 16 cm	276
Abbildung 251:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 1, 2, 3 bei einer Schichtdicke d = 10 cm	276
Abbildung 252:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke d = 25 cm	277
Abbildung 253:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke d = 20 cm	277
Abbildung 254:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke d = 16 cm	278
Abbildung 255:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 1-2 bzw. 2-3, für eine Schichtdicke d = 10 cm	278
Abbildung 256:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke d = 25 cm	279
Abbildung 257:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke d = 20 cm	279
Abbildung 258:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke d = 16 cm	280
Abbildung 259:	History-Kurven der Temperatur an den Punkten 4, 5, 6 bei einer Schichtdicke d = 10 cm	280
Abbildung 260:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke d = 25 cm	281
Abbildung 261:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke d = 20 cm	281
Abbildung 262:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke d = 16 cm	282
Abbildung 263:	Temperaturgradienten zwischen History-Punkten 4-5 bzw. 5-6, für eine Schichtdicke d = 10 cm	282
Abbildung 264:	Lage der 6 Zonen, an denen History-Kurven der minimalen Hauptspannung aufgezeichnet werden	283
Abbildung 265:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 25 cm	283

Abbildung 266:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 20 cm	284
Abbildung 267:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 16 cm	284
Abbildung 268:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 10 cm	285
Abbildung 269:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 25 cm	285
Abbildung 270:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 20 cm	286
Abbildung 271:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 16 cm	286
Abbildung 272:	Minimale Hauptspannung an den History-Zonen 1, 2, 3 für eine Schichtdicke d = 16 cm	287
Abbildung 273:	Abhängigkeit der Zeitdauer Spritzende bis zum primären Temperaturmaximum in der Spritzbetonschicht vom ZTW	288
Abbildung 274:	Abhängigkeit der beim Spritzversuch GSBV4 in der ersten Spritzschicht von 4 Thermoelementen A1-m, A1-b, B1-m, B1-b im Verlauf der gesamten Versuchszeit gemessenen Temperatur	289
Abbildung 275:	Abhängigkeit der Mindestlänge eines parallelen gebirgsverbundenen Pfropfens von der axialen Flüssigkeitsdruckbelastung für $c = 0,86$ MPa, $\Phi = 34^\circ$, $\sigma = 0,2$ MPa	303
Abbildung 276:	Grundaufbau eines zukünftigen in situ Streckenverschlussbauwerkes mit Druckkammer	303
Abbildung 277:	Längsschnitt durch das mögliche Versuchsverschlussbauwerk (Variante mit $L = 8$ m und $b = 1$ m)	304
Abbildung 278:	Messebene im Bereich des neu eingebrachten MgO-Spritzbetons	305
Abbildung 279:	Querschnitt einer reduzierten Messebene im Bereich des neu eingebrachten MgO-Spritzbetons	306
Abbildung 280:	Reindichte und Feuchtegehalt des MgO-Baustoffes des GV2 für unterschiedliche Trocknungsbedingungen (die Balken beschreiben den Wertebereich der Parameter)	339
Abbildung 281:	Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen [31]	342
Abbildung 282:	Abhängigkeit der relativen Porosität im MgO-Beton der Rezeptur D4 in Abhängigkeit von der normierten Menge an Lösung im Porenraum	346
Abbildung 283:	Mehrphasiger Relaxationsversuch (Beispielversuch für Probe aus GV2).	349
Abbildung 284:	Methodik zur Durchführung von direkten Zugversuchen (DTT-Versuch) an der Kontaktfläche Baustoff/Gestein. a) Schematischer Probenaufbau mit der Wegmessung in der servohydraulischen Universalprüfmaschine SHM 250 (Zug/Druck); b) Spannungs-/Verformungsdiagramm des Zugversuchs 754/HZV1 (GSBV4); c) Prüfkörper vor und nach dem Zugversuch	350
Abbildung 285:	MTS-Scher-Test-System (Modell 816) (IfG Leipzig GmbH)	351
Abbildung 286:	Schematische Übersicht des Versuchsaufbaus	352
Abbildung 287:	Schematische Darstellung des numerischen Modells	353
Abbildung 288:	Zweikammerversuchsapparatur für Gas	353
Abbildung 289:	Beispiel für das Ergebnis einer modellgestützten Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien (kein Bezug zu projektbezogenen Auswertungen)	354

Abbildung 290:	Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit aquatischer Salzlösung nach [41].....	358
Abbildung 291:	Schematische Darstellung der Gas- bzw. Lösungsströmung (Vierfachpacker).....	359
Abbildung 292:	Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Impulstestes mit einem Vierfachpacker	360
Abbildung 293:	Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Tests mit konstantem Druck (CP) mit einem Vierfachpacker	360
Abbildung 294:	Schematischer Versuchsaufbau.....	362
Abbildung 295:	Messausrüstung eines Bohrlochpackertests (hier beim Dichtheitstest) ...	363
Abbildung 296:	Testauswertung - Modelldiskretisierung und räumliche Druckverteilung..	364
Abbildung 297:	Vergleich der Pulverdiffraktogramme der MgO-LW-Proben der Charge G10/54 (Styromag) mit den MgO-LW-Proben G75 und G80 mit erhöhtem CaO-Gehalt (FuE-Projekt MgO-SEAL) (blaue Diffraktogramme).	379
Abbildung 298:	Vergleich der Pulverdiffraktogramme der MgO-LW-Proben der Charge G10/74.	379
Abbildung 299:	Zitronensäuretest der MgO-LW-Proben der Charge G10/16.	380
Abbildung 300:	Zitronensäuretest der MgO-LW-Proben der Charge G10/54.	380
Abbildung 301:	Zitronensäuretest der MgO-LW-Proben der Charge G10/74 (mit Vgl. zu G10/54).....	381

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	vor 2019 ausgeführte Bohrungen an der Ortsbrust des GV2	23
Tabelle 2:	nach 2020 ausgeführte Bohrungen an der Ortsbrust des GV2.....	23
Tabelle 3:	Radiale Bohrungen an der rechten Mantelfläche des GV2	24
Tabelle 4:	Ergebnisse der Permeabilitätsuntersuchungen in der B45.....	44
Tabelle 5:	Untersuchungsprogramm Laboruntersuchungen Kernmaterial GV2	46
Tabelle 6:	Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie aus [4] ergänzt um aktuelle Ergebnisse	49
Tabelle 7:	Lösungskonzentrationen sowie Analysenmethoden der aus der B40 entnommenen Lösung	78
Tabelle 8:	Zusammensetzung und Lieferanten der Komponenten der Spritzbetonrezeptur GV2 (Referenzrezeptur)	79
Tabelle 9:	Überblick über die MgO-Lieferungen von Styromag	80
Tabelle 10:	In den Vorversuchen verwendete Rezepturvariationen (MgO ist hier MgO-LW)	84
Tabelle 11:	Rezepturvariationen der halbtechnischen Spritzbetonversuche	86
Tabelle 12:	Spritzbetonrezepturvarianten 2A und 2B	88
Tabelle 13:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV2A.....	89
Tabelle 14:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV2A.....	89
Tabelle 15:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV2B.....	89
Tabelle 16:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV2B.....	89
Tabelle 17:	Spritzbetonrezepturvarianten 3A, 3B und 3C	90
Tabelle 18:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV3A.....	91
Tabelle 19:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV3A.....	91
Tabelle 20:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV3B.....	91
Tabelle 21:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV3B.....	91
Tabelle 22:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV3C	91
Tabelle 23:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV3C.....	92
Tabelle 24:	Spritzbetonrezepturvarianten 4A, 4B und 4C.....	92
Tabelle 25:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV4A	93
Tabelle 26:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV4B	93
Tabelle 27:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV4C	93
Tabelle 28:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV4C.....	94
Tabelle 29:	Spritzbetonrezepturvarianten 5A und 5B	94
Tabelle 30:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV5A.....	95
Tabelle 31:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV5A.....	95
Tabelle 32:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV5B.....	95
Tabelle 33:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV5B	95
Tabelle 34:	Spritzbetonrezepturvarianten 6A und 6B	96
Tabelle 35:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV6A.....	97
Tabelle 36:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV6A.....	97
Tabelle 37:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV6B.....	97
Tabelle 38:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV6B.....	97
Tabelle 39:	Spritzbetonrezepturvarianten 7A und 7B	98

Tabelle 40:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV7A.....	98
Tabelle 41:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV7A.....	99
Tabelle 42:	Einzelwerte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben des SBV7B.....	99
Tabelle 43:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des SBV7B	99
Tabelle 44:	Überblick zu den GSBV1 bis GSBV4.....	103
Tabelle 45:	Kenndaten der 6 Spritzschichten des GSBV1.....	107
Tabelle 46:	Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV1.....	114
Tabelle 47:	Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV1.....	114
Tabelle 48:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV1.....	116
Tabelle 49:	Spaltzugfestigkeit an Kernen des GSBV1.....	117
Tabelle 50:	Ergebnisse der in situ Permeabilitätsmessung mit Gas im GSBV1 (B36) ...	121
Tabelle 51:	Auswertung Temperatur in der Mitte des Spritzbetonkörpers beim GSBV1 .	122
Tabelle 52:	Kenndaten der 2 Spritzschichten des GSBV2.....	125
Tabelle 53:	Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV2.....	127
Tabelle 54:	Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV2.....	128
Tabelle 55:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV2.....	128
Tabelle 56:	Zusammenfassung Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV2.....	129
Tabelle 57:	Ergebnisübersicht GSBV2.....	130
Tabelle 58:	Auswertung zum Spritzen des GSBV3.....	133
Tabelle 59:	Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV3.....	138
Tabelle 60:	Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV3.....	139
Tabelle 61:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV3.....	140
Tabelle 62:	Spaltzugfestigkeit an Kernen des GSBV3.....	141
Tabelle 63:	Auswertung triaxiale Mehrstufenversuche mit den entsprechenden Peak- Festigkeiten und MOHR-COULOMB-Parameter GSBV3 und GSBV4.....	145
Tabelle 64:	Festigkeitskennwerte aus direkten Scherversuchen an der Spritzbeton-Matrix Spritzbeton (GSBV3):.....	147
Tabelle 65:	Ergebnisübersicht GSBV3 (Bohrung B31: L=0,94 m; a=0,0°; d=100 mm) ...	151
Tabelle 66:	Auswertung Temperatur in der Mitte des Spritzbetonkörpers beim GSBV3 .	152
Tabelle 67:	Auswertung zum Spritzen des GSBV4.....	156
Tabelle 68:	Einzelwerte der Einaxialen Druckfestigkeit an Proben des GSBV4.....	160
Tabelle 69:	Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit an Proben des GSBV4.....	160
Tabelle 70:	Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit an Proben des GSBV4.....	162
Tabelle 71:	Spaltzugfestigkeit an Kernen des GSBV4.....	163
Tabelle 72:	Festigkeitskennwerte aus direkten Scherversuchen an der Spritzbeton-Matrix Spritzbeton (GSBV4).....	166
Tabelle 73:	Ergebnisübersicht GSBV4.....	174
Tabelle 74:	Auswertung Temperatur in der Mitte des Spritzbetonkörpers beim GSBV4 .	176
Tabelle 75:	Durchgeführte Haftzugversuche: Anzahl und Quartilswerte der verschiedenen Chargen.....	181
Tabelle 76:	Ergebnisse der Gaspermeabilitätsuntersuchungen an Kernmaterial.....	188
Tabelle 77:	Rezepturen der Labor-Betonproben.....	197

Tabelle 78:	Quartile (25 % bzw. 75 %), Median, Mittelwert, Minimum und Maximum der erhaltenen Messergebnisse der Haftzugfestigkeit zwischen der jeweiligen Spritzbetonrezeptur und Steinsalz bei den verschiedenen Großspritzbetonversuchen (GSBV).....	207
Tabelle 79:	Vergleich der Haftzugfestigkeit aus den GSBV	210
Tabelle 80:	Normal- und Schubspannung aus den direkten Scherversuchen an der Kontaktfläche Spritzbeton (GSBV4 / Steinsalz (1 Peak- und 2-Restscherfestigkeitswerte))	213
Tabelle 81:	Änderung der Prüfkörpervolumina über den Versuchszeitraum	223
Tabelle 82:	Probenfotos vor und nach der Lagerung in CO ₂ - bzw. Luft-Atmosphäre	224
Tabelle 83:	Effektive Gaspermeabilität vor und nach der Lagerung in CO ₂ - bzw. Luft-Atmosphäre bei relativer Feuchte von 65±2 % und 24±4 °C	226
Tabelle 84:	Koordinaten der rekonstruierten Reflektoren bei horizontaler Messrichtung	255
Tabelle 85:	Eingangsparameter für die Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung	265
Tabelle 86:	Verwendete Parameter im thermischen Hydratationsmodell (FLAC3D) für MgO-Spritzbeton. Die Zahlenwerte ergeben sich aus der Anpassung an den In-Situ-Versuch GSBV4	267
Tabelle 87:	Verwendete Parameter im mechanischen Stoffmodell für Hydratation (modifiziertes Drucker-Prager-Modell)	267
Tabelle 88:	Verwendete thermische und mechanische Parameter für Steinsalz (isotropes thermisches bzw. elastisches Stoffmodell).....	267
Tabelle 89:	Verwendete thermische und mechanische Parameter für Altbeton (isotropes thermisches bzw. elastisches Stoffmodell).....	268
Tabelle 90:	Aufstellung der Messgrößen für den in situ Versuch mit MgO-Spritzbeton im Steinsalz und der Sensoren.....	298
Tabelle 91:	Kennwerte der Zusammensetzung der beiden Rezepturen	299
Tabelle 92:	Abgeschätzter Umfang der Instrumentierung eines in situ Versuchsbauwerkes	305
Tabelle 93:	Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe.....	341



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

Anlagen

**MgO-S³:
MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse
für HAW-Endlager im Steinsalz**

Förderkennzeichen 02E11769A

Ausführende Stelle: Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Gustav-Zeuner-Str. 1a
D-09596 Freiberg

Projektleitung: Dr. Matthias Gruner und Prof. Dr. Wolfram Kudla

Editor: M.Sc. Jennifer Arendt

Freiberg - 24.01.2023

Anlage 1 Methodik Laboruntersuchungen

Anlage 1.1 Lösungsgehalt und Trocknung

Nachfolgend wird allgemein kurz beschrieben, wie einzelne Laborversuche ausgeführt wurden bzw. einzelne Parameter bestimmt wurden. Dabei wird das Verfahren beschrieben. Welche Proben beispielsweise wie getrocknet wurden, ist im Hauptteil des Berichtes beschrieben.

Die der Lösungsgehaltsbestimmung zugrundeliegende Trocknung des Materials ist ein Teil der Probenaufbereitung für die Ermittlung weiterer Materialparameter - z.B. Trockenrohichte, Reindichte, Porosität, Porenraumsättigung, Porengrößenverteilung, Kapillardruck.

Der Lösungsgehalt berechnet sich aus:

$$w_L = \frac{m_L}{m_{F,korr}} \quad (8)$$

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

Die Masse der Lösung im Porenraum berechnet sich aus:

$$m_L = \frac{m_w \cdot \rho_L}{\rho_L - C_C} \quad (9)$$

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

Die korrigierte Feststofftrockenmasse ergibt sich aus:

$$m_{F,korr} = \frac{m_{F,tr} \cdot \rho_L - C_C \cdot m_{F,f}}{(\rho_L - C_C)} \quad (10)$$

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

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

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

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

- die thermische Zersetzung der Bindemittelmatrix (Sorelminerale) 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, Steinsalz ...) auskristallisieren,
- bereits bei der Präparation entsprechender Pulverproben enthaltene Porenlösung beginnt einzutrocknen oder auch Feuchtigkeit aus der Luft aufzunehmen - je nachdem, welche Ionenkonzentrationen und Wasseraktivität die Porenlösung aufweist,
- eine Trocknung kompakter (nicht pulverisierter) Proben in endlicher Zeit und aufgrund des z.T. stattfindenden Porenverschlusses nicht möglich ist.

Vor diesem Hintergrund wurde zunächst das Kernmaterial aus den Bohrungen B35, B36 sowie das Material aus SBV7A und SBV7B bei 60 °C im Ofen getrocknet.

Aufgrund des dargelegten temperaturabhängigen Verhaltens des Baustoffes war es erforderlich, die Trocknungsbedingungen auf das Ziel der Untersuchungen und die weitere Verwendung der ermittelten Parameter abzustimmen.

Die Proben der Bohrungen B31 und B32 (GSBV4) wurden bei 45 °C im Ofen getrocknet - siehe Erläuterungen in Anlage 1.5.

Anlage 1.2 Feuchtegehalt

Der im Bericht angegebene Feuchtegehalt wird im Rahmen des Projektes als weiteres Ergebnis der Trocknung berechnet.

Der angegebene Feuchtegehalt berechnet sich aus:

$$w_F = \frac{m_W}{m_F} \quad (11)$$

w_F	Feuchtegehalt	[-]
m_W	Masse Wasser	[g]
m_F	Masse Feststoff	[g]

Eine Massenkorrektur auf der Grundlage der Gesamtmineralisation und Dichte der Porenlösung erfolgt bei der Berechnung des Feuchtegehaltes nicht. Der Feuchtegehalt beschreibt das Verhältnis der Masse der Porenlösung oder des Wassers im Porenraum zur Feuchtmasse der untersuchten Probe.

Anlage 1.2.1 Ofentrocknung

Die Proben wurden im Verlauf der Ofentrocknung bei 105 °C, 60 °C oder bei 45 °C mit einer Kern-Waage PLS mit einer Messunsicherheit von ± 0,001 g gewogen.

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

- < 1 Ma. %: 0,001 Ma. %/24 h für 100 g – ±1 mg/24 h
- ≥ 1 Ma. %, < 5 Ma. %: 0,01 Ma. %/24 h für 100 g – ±10 mg/24 h
- ≥ 5 Ma. %: 0,1 Ma. %/24 h für 100 g – ±100 mg/24 h

Die entsprechend getrockneten Proben (Bruchstücke) wurden nach dem Erreichen der Massekonstanz in verschlossene Behältnisse überführt. Anschließend wurde die Reindichte im Gaspyknometer (Anlage 1.3) bestimmt und die Porosität aus den Dichten (Anlage 1.4.1) berechnet. An ausgewählten Proben wurde die Porosität und Porengrößenverteilung durch Quecksilberporosimetrie (Anlage 1.4.2) ermittelt. Als Ergebnis der Trocknung wurde ein Lösungsgehalt berechnet. Für die Proben der Spritzbetonkörper wurde angenommen, dass die Porenlösung der MgCl₂-gesättigten Anmachlösung des Spritzbetons eine Dichte von 1,304 g/cm³ und eine Gesamtmineralisation 0,427 g/cm³ hat.

Für die Proben aus dem GV2 wurde die Zusammensetzung der Anmachlösung des Spritzbetons für den GV2 mit einer Dichte von 1,346 g/cm³ und einer Gesamtmineralisation von 0,470 g/cm³ zugrunde gelegt.

In Abhängigkeit der Temperatur und Luftfeuchte beim Trocknen ergaben sich unterschiedliche Feuchtegehalte:

Lagerungsbedingungen	Feuchtegehalt ± Stand.abw. (Min. – Max., Anzahl)
0 % F _R – über CaCl ₂ , wasserfrei	1,99 ± 0,06 Ma.% (1,94 - 2,03 Ma.%, N = 2)
~8 % F _R – bei 45°C	0,31 ± 0,07 Ma.% (0,22 - 0,43 Ma.%, N = 10)
~3 % F _R – bei 60°C	0,54 ± 0,05 Ma.% (0,48 - 0,63 Ma.%, N = 10)
0 % F _R – bei 105°C	4,04 ± 0,22 Ma.% (3,67 - 4,43 Ma.%, N = 27)

Anlage 1.2.2 Lagerung bei ca. 25 °C und bei ca. 32,5 % relativer Luftfeuchte F_R

Die Proben wurden bei ca. 25 °C und bei ca. 32,5 % relativer Luftfeuchte F_R bis zur Massekonstanz (siehe Anlage 1.2.1) in einem Exsikkator über einer Schüttung aus Bischofit gelagert. Die Gleichgewichtsfeuchte von Bischofit stellt sich bei ca. 25 °C mit ca. F_R = 32,5 % ein.

Für eine überschlägige Berechnung der Kapillardruckes bei einer relativen Luftfeuchte von 32,5 % wurde die KELVIN-Gleichung für das Phasensystem Wasser/Luft angewendet.

32,5 % F _R – über MgCl ₂ ·6 H ₂ O	-0,16 ± 0,19 Ma.% (-0,45 - 0,14 Ma.%, N = 27)
--	---

Anlage 1.3 Dichten

An einigen Proben wurde die Feuchtdichte, die Trockendichte und die Reindichte bei Trocknung der Probekörper bei 105 °C, bei 60 °C und 45 °C sowie bei 25 °C und ca. 32,5 % relativer Luftfeuchte [4] ermittelt.

Die Feuchtdichte wurde aus der Feuchtmasse und dem Volumen des zylindrischen Probekörpers der jeweiligen Probe berechnet. Der Durchmesser und die Höhe der Probenzylinder wurden aus mindestens 10 Einzelmessungen je Probekörper mit einem elektronischen Messschieber mit einer Messunsicherheit von ± 0,1 mm ermittelt.

Die Feuchtmasse der Probekörper wurde über Wägung mit einer KERN-Waage PLS mit einer Messunsicherheit von ± 0,001 g bestimmt.

Die Trockendichte wurde auf der Basis der Feuchtdichte und der ermittelten Lösungsgehalte berechnet. Der für die Trockendichte angegebene Fehler wurde auf der Basis der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung nach Gleichung (12) ermittelt, wobei damit implizit angenommen wird, dass der jeweilige Fehler normalverteilt ist.

$$\varepsilon_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \varepsilon_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \cdot \varepsilon_k\right)^2} \quad (12)$$

y	abhängige Variable f(x ₁ ... x _k)
x _i	fehlerbehaftete Eingangsvariable
ε	Fehler der Eingangsvariable x _i

Die Proben, an denen die Reindichte ermittelt wurde, wurden nach der Trocknung bis zur Dichteermittlung luftdicht gelagert. Die Reindichte der Proben wurde mit einem Gaspyknometer Pycnomatic DMA-4500-M, Fa. Anton-Paar, ermittelt. Für die Reindichte wurden die Ergebnisse von mindestens drei Einzelmessungen gemittelt.

Im Projekt MgO-S³ wurde zusätzlich die Reindichte von bei 45 °C und 60 °C getrockneten Proben ermittelt. Die nachfolgende Zusammenstellung aller Ergebnisse der Reindichten und die Darstellung mit dem zugehörigen Wertebereich in Abbildung 280 gibt eine Übersicht zum Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Reindichte.

In Abhängigkeit der Temperatur und Luftfeuchte beim Trocknen ergaben sich unterschiedliche Reindichte:

Lagerungsbedingungen	Reindichte ± Stand.abw. (Min. – Max., Anzahl)
0 % F _R – über CaCl ₂ , wasserfrei	2,404 ± 0,005 g/cm ³ (2,401 - 2,407 g/cm ³ , N = 2)
32,5 % F _R – über MgCl ₂ ·6 H ₂ O	2,337 ± 0,028 g/cm ³ (2,282 - 2,381 g/cm ³ , N = 9)
~8 % F _R – bei 45°C	2,342 ± 0,022 g/cm ³ (2,319 - 2,363 g/cm ³ , N = 3)
~3 % F _R – bei 60°C	2,388 ± 0,024 g/cm ³ (2,354 - 2,410 g/cm ³ , N = 5)
0 % F _R – bei 105°C	2,451 ± 0,008 g/cm ³ (2,432 - 2,466 g/cm ³ , N = 12)

Die Ergebnisse für die Reindichte zeigen den Einfluss der Trocknungstemperatur und der Mobilisierung von hydratgebundenem Wasser in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur entsprechend den Erläuterungen in Anlage 1.5. Vor diesem Hintergrund wird für die Ermittlung von Materialparametern zur Prozessbeschreibung die Anwendung der ebenfalls in Anlage 1.5 dargestellten Trocknung bei 45 °C empfohlen.

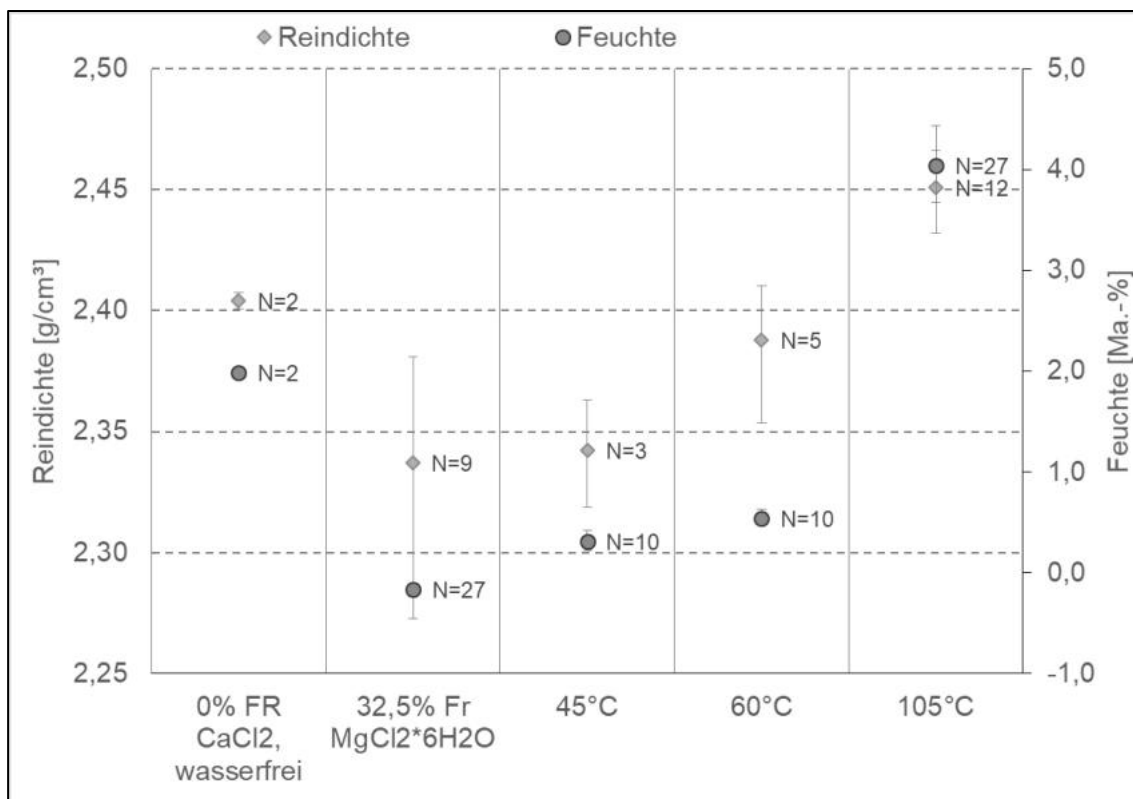


Abbildung 280: Reindichte und Feuchtegehalt des MgO-Baustoffes des GV2 für unterschiedliche Trocknungsbedingungen (die Balken beschreiben den Wertebereich der Parameter)

Anlage 1.4 Porosität

Anlage 1.4.1 Porosität aus der Dichte

Die Porosität des verwendeten Magnesiabetons kann aus der ermittelten Dichte (s. Anlage 1.4.1) und aus dem Ergebnis der Quecksilberporosimetrie (s. Anlage 1.4.2) berechnet werden.

Auf der Grundlage der Rein- und Trockendichte wird die **totale Porosität** nach der Gleichung (13) berechnet.

$$n_t = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (13)$$

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 [21], unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der eingehenden Parameter der Fehler ermittelt.

Anlage 1.4.2 Porosität aus der Quecksilberporosimetrie

Beim Quecksilberinjektionsversuch nach DIN 66133 [23] wird die Porosität einer Probe aus dem druckabhängig injizierten Quecksilbervolumen ermittelt. Aus der Kenntnis der Grenzflächenspannung und des Benetzungswinkels von Quecksilber bei den angewendeten Druck- und Temperaturbedingungen kann nach der Gleichung (14) aus den Versuchsdaten die Porengrößenverteilung abgeleitet werden.

$$p_{cap} = \frac{2 \cdot \gamma_{Hg-Luft} \cdot \cos \delta_{Hg-Luft}}{r_p} \quad (14)$$

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

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 Porengrößenverteilung 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 Porenhalsdurchmesser-Verteilung statt Porengrößenverteilung lauten. Dies schränkt die Aussagekraft der Versuchsergebnisse für die Beurteilung von Strömungsprozessen nicht ein. Die Strömung eines Fluids 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, bis zu dem Messungen möglich sind.
3. Bei der Quecksilberporosimetrie ist davon auszugehen, dass die Injektionsrate, die Kompressibilität des Gesamtsystems aus Feststoff, Porengefüge und Quecksilber und die Porenform (zylindrisch oder davon abweichend) das Ergebnis (etwas) beeinflusst. Die Auswertung geht von zylindrischen Poren aus.

Die Proben wurden mittels Quecksilberporosimetrie teilweise 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, Prüfung durch das Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau (TUBAF).
2. Porosimeter AutoPore V9600 der Firma *Micromeritics*, Druck von ca. 420 MPa, messbarer Porendurchmesser von ca. 2 nm bis ca. 300 µm, Prüfung durch das Institut für Silikatechnik (TUBAF).
3. Porosimeter AutoPore V9600 1.03 der Firma *Micromeritics*, Druck von ca. 420 MPa, messbarer Porendurchmesser von ca. 2 nm bis ca. 700 µm, Prüfung durch *Micromeritics GmbH*.

Für alle Proben wurde die Reindichte ermittelt (siehe Abschnitt 5.2.2).

Die Porosität bzw. die Porengrößenverteilung von porösen Materialien weist einen materialspezifischen Verlauf auf. Anhand dieses Verlaufes können Makro-, Meso- und Mikroporen differenziert werden. Wie die Beispiele in Tabelle 93 zeigen, werden die Porengrößenbereiche für Baustoffe in Abhängigkeit von der bearbeiteten Themenstellung unterschiedlich definiert. Vor diesem Hintergrund werden die Porengrößen probenbezogen anhand der Anstiege der Regressionsgeraden an Teilabschnitten der Porengrößenverteilung entsprechend der beispielhaften Darstellung in Abbildung 281 klassifiziert. Die Grenzen zwischen den Porenklassen werden durch die Schnittpunkte der Regressionsgeraden definiert (Abbildung 281).

Tabelle 93: Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe

Mikroporen	Mesoporen	Makroporen	Quelle
Gelporen	Kapillarporen		
[nm]	[nm]		
< 30	> 30		[24]
< 10	> 10		
mittlerer Durchmesser 1,8	-		
0,01 bis 100	100 bis 10 ⁵	ab 10 ⁵	[25]
0,5 bis 30	30 bis 10 ⁵	10 ⁵ bis 10 ⁶	[26]
0,5 bis 50	50 bis 500		[27]
1 bis 10	10 bis 10 ⁵	10 ³ bis 10 ⁶	
< 5	5 bis 5 · 10 ³		
1 bis 10	10 bis 10 ⁵		[28]

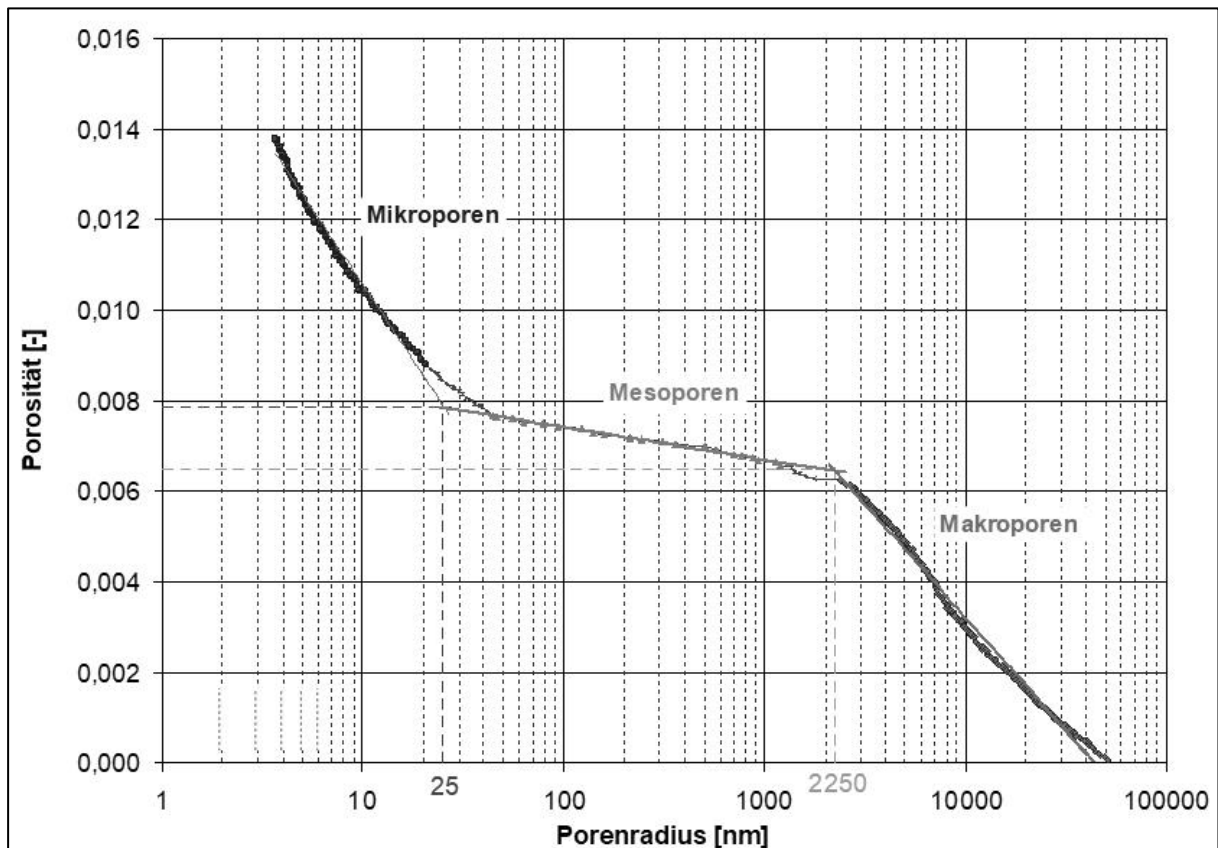


Abbildung 281: Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen [31]

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

Anlage 1.4.3 Porenraumsättigung

Auf der Basis der aus der Dichte ermittelten totalen Porosität (Anlage 1.4) und des Lösungsgehaltes (Anlage 1.1) wurde die Porenraumsättigung mit Flüssigkeit nach Gleichung (15) ermittelt:

$$S = \frac{w_L \cdot \rho_d}{\rho_L \cdot n_t} \quad (15)$$

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

Die Dichte ρ_L der Porenraumflüssigkeit wurde entsprechend den Erläuterungen in Anlage 1.2.1 berücksichtigt. Für die Sättigung wurde der Fehler auf der Basis der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung [32] berechnet.

Anlage 1.5 Spezifik des MgO-Baustoffes im Zusammenhang mit der Behandlung von Proben der Rezeptur D4 (mit der 5-1-8-Bindemittelphase) bei der Bestimmung von Materialparametern, in welche die Baustofffeuchte eingeht

Schädigung von MgO-Baustoff durch Trocknung bei 105°C

Werden Materialparameter zur Beschreibung des strömungstechnisch²⁰-mechanischen Verhaltens von Baustoffen/Bauwerken ermittelt, muss zum einen

- das im Gefüge ggf. befindliche mobile (freie, chemisch nicht gebundene) Wasser zur Beurteilung der Sättigung des Porenraumes bestimmt werden

und zum anderen

- ist die Herstellung eines Probenzustandes notwendig, welcher die Ermittlung der Dichten (Reindichte, Trockendichte) und der Porengrößenverteilung erlaubt.

Dafür werden Materialproben, üblicherweise nach DIN EN ISO 17892-1, bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Eine Trocknung bei 105 °C ist für einen MgO-Baustoff unabhängig davon, ob es sich um einen 3-1-8- oder 5-1-8-Rezepturtyp handelt, nicht zur Ermittlung von materialbeschreibenden, strömungstechnischen und mechanischen Parametern anwendbar, da bei dieser Temperatur eine stoffliche Veränderung eintritt²¹. Es wird deshalb ein alternatives Verfahren angewandt, das nachfolgend beschrieben wird.

Besonderheiten des Baustoffs

Der MgO-Baustoff der Rezeptur D4 (5-1-8-Rezepturtyp) besteht aus folgenden Komponenten:

- Bindemittelphase: 5-1-8-Phase [$5 \text{ Mg(OH)}_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{ H}_2\text{O}$]
- nicht umgesetztes MgO (Überschuss hinsichtlich der stöchiometrisch erforderlichen Menge zur Bindemittelphasenbildung)
- Zuschlag (Hartgesteinskörnung oder Steinsalz)

Die Poren sind theoretisch lösungsfrei (keine Restporenlösung, da stöchiometrisch alle Lösung zur Bindemittelphasenbildung verbraucht ist).

Die 5-1-8-Bindemittelphase liegt im abgebundenen MgO-Baustoff vor, wenn die Menge der Anmischlösung über den Rezepturansatz so begrenzt bzw. eingestellt ist, dass sich die 3-1-8-Bindemittelphase nicht oder nur anteilig ausbilden kann. Die 5-1-8-Bindemittelphase steht nicht im thermodynamischen Gleichgewicht mit Wasser oder Salzlösung (gleiches gilt für nicht umgesetztes MgO). Im Kontakt mit Wasser oder Lösung setzen Reaktionen unter Phasenneubildung (3-1-8-Phase, Mg(OH)_2 – je nach Kontaktlösung) ein. Dabei wird das mobile (freie) Wasser verbraucht. Besteht also der abgebundene MgO-Baustoff aus 5-1-8-Bindemittelphase und Rest-MgO, heißt das in Umkehrung, dass das Baustoffgefüge lösungs- bzw. feuchtfrei ist.

Da der Wasser- bzw. Lösungsgehalt des Baustoffs aufgrund der genannten Eigenschaften $w = 0$ ist, ist auch die Anfangssättigung $S_R = 0$. Unter diesen Bedingungen ist die für diese Proben ermittelte Gaspermeabilität als absolute/intrinsische Permeabilität des trockenen Baustoffes anzusehen.

Für die Bestimmung von Materialparametern zur Beschreibung des strömungstechnisch-mechanischen Verhaltens ist daher theoretisch keine vorangehende Probentrocknung notwendig.

²⁰ Der Begriff „strömungstechnisch“ steht für Strömung von Gas und Flüssigkeit. Der sonst auch genutzte Begriff „hydraulisch“ steht nur für Transport von Wasser.

²¹ Wird bei einem Trocknungsverfahren feinpulverisiertes Probematerial (sehr großes Verhältnis von Oberfläche zu Masse) in einem offenen System bei z.B. 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet, ändert sich bei Hydraten (dazu zählen die Bindemittelphasen des Magnesiabaustoffs) über die Zeit die Masse, da Hydratwasser in einem gewissen %-Bereich austritt (und ggf. auch mobiles, ungebundenes Wasser), auch wenn der Baustoff bei einer Temperatur von 105° C als stabil gilt. Es handelt sich dabei um einen Oberflächeneffekt aufgrund des massenhaften Abbruchs der dreidimensionalen Fernordnung der Festkörperstruktur von Hydraten im feinpulverisierten Zustand.

Für den MgO-Baustoff der Rezeptur D4 (GV2) ist von einem Anteil an Poren mit einem Durchmesser <100 nm am gesamten Porenanteil von bis zu 80 % auszugehen [4]. Für diesen Porenraum stellt sich an der Phasengrenze²² zwischen Porenlösung und Gas theoretisch ein Kapillardruck von bis zu 55 MPa im Porengefüge ein. Für die gegebene Porengrößenverteilung ist die Größe des Kapillardruckes abhängig von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit. Zur Einordnung soll darauf verwiesen werden, dass der maximale Druck für die Beaufschlagung mit Salzlösung mit 6 MPa, also nur mit einem Bruchteil des möglichen Kapillardruckes, angesetzt wird.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Kapillardruck die Transportprozesse der fluiden Phasen in der Lagerungszeit der Proben in der Laboratmosphäre, während der Standzeit des Bauwerkes in der Grubenatmosphäre (ungesättigten Bedingungen, keine Druckbeaufschlagung mit Salzlösung) und auch in der Anfangsphase der Druckbeaufschlagung mit Flüssigkeit bestimmt.

Unter dem Einfluss des Kapillardruckes wird es in Abhängigkeit von:

- den effektiven Phasenpermeabilitäten,
- dem Wasserdampfpartialdruckgradient zwischen Porenraum und Grubenatmosphäre,
- dem effektiven Diffusionskoeffizienten für Wasserdampf,
- den chemischen Wechselwirkungen an den Phasengrenzen flüssig/gasförmig und flüssig/fest in Folge der Sorptionsprozesse des Wasserdampfes an der Porenwandung und die Wasseraufnahme der Bindemittelmatrix (5-1-8 oder 3-1-8 Kristallisation),
- den chemischen Reaktionen mit den Inhaltsstoffen der Grubenatmosphäre

kontinuierlich (zumindest in den Randbereichen) zu einem Wassertransport in die Probe bzw. in das Bauwerk kommen. Der dafür zu erwartende Massenstrom an Wasser und die sich zeitabhängig ergebenden Folgen für den Kapillardruck und die Kristallisationsprozesse sind gegenwärtig nicht bekannt.

Aufgrund des hygroskopischen Materialverhaltens, der Absorption von Wasser auf der Porenmantelfläche und der sich, beginnend in den kleinsten Poren, ausbildenden Kapillardruckes an der Phasengrenze Flüssigkeit / Gas ist eine kapillare Durchfeuchtung des Randbereiches der Proben möglich. Dies wird durch die ermittelte Sättigung des Baustoffes nach unterschiedlichen Trocknungsmethoden bestätigt:

Lagerungsbedingungen	Sättigung ± Stand.abw. (Min. – Max., Anzahl)
0 % F _R – über CaCl ₂ , wasserfrei	45,9 ± 2,4 Vol.% (44,1 - 47,6 Vol.%, N = 2)
~8 % F _R – bei 45°C	13,6 ± 3,7 Vol.% (9,8 - 23,2 Vol.%, N = 10)
~3 % F _R – bei 60°C	20,4 ± 2,7 Vol.% (16,6 - 26,1 Vol.%, N = 10)

Die ermittelten Sättigungen deuten darauf hin, dass mobiles (freies, chemisch nicht gebundenes) Wasser/Salzlösung im Porenraum des Randbereiches des Baustoffes vorhanden ist. Vor dem Hintergrund des großen Anteils an Poren < 100 nm (Abbildung 36 und [4]) ist davon auszugehen, dass diese Salzlösung durch Kapillarkräfte in diesem Porenraum gebunden ist.

Es ist davon auszugehen, dass der konvektive Strömungsprozess in den vernetzten Makroporen stattfindet. Für diese Bedingungen und die maximale Porenraumsättigung von bis zu 47,6 Vol.-% werden die ermittelten Gaspermeabilitäten als effektive Permeabilitäten angesehen werden.

Für eine Beurteilung des funktionalen Zusammenhanges zwischen effektiver Gaspermeabilität und der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit liegt, trotz der scheinbar großen Anzahl von 25 Permeabilitätsergebnissen (Tabelle 76), keine ausreichende Anzahl an Permeabilitäts-

²² fluide Phasen – Verwendung als Überbegriff für im Porenraum bewegte gasförmige und flüssige Materie – Gas, Flüssigkeit

messungen vor. Nicht bei allen Permeabilitätsmessungen konnten repräsentative Sättigungen ermittelt werden. Darüber hinaus schwankte die Sättigung im Bauwerk nur geringfügig in der Größenordnung von wenigen Vol.-% (innerhalb einer Trocknungsmethodik). Eine Beurteilung des Einflusses der Porenraumsättigung auf die effektive Gaspermeabilität erfordert Untersuchungen bei unterschiedlichen Porenraumsättigungen. Eine wesentliche Herausforderung dabei ist die Einstellung unterschiedlicher Sättigungsbedingungen in dem geringpermeablen Material.

Dieses Ergebnis unterstreicht, zusammen mit den Erläuterungen zum Kapillardruck, dass die Porenraumsättigung mit Flüssigkeit bei der Prognose von Strömungsprozessen während der Standzeit des Materialkörpers in der Grubenatmosphäre beurteilt werden muss. Die Ermittlung dieser Eigenschaften bildet die Grundlage für die Beurteilung des Langzeitverhaltens des Baustoffes.

Festlegungen für die Behandlung der MgO-Baustoffproben

Um für Materialparameterbestimmungen (Porosität etc.) vergleichbare Probeausgangsbedingungen (im Labor) zu schaffen, werden die Proben, welche z.B. durch Kernbohrungen aus untertägigen Bauwerken gewonnen wurden, bei 25 °C und einer relativen Luftfeuchte F_R von 30 % bis 35 % gelagert²³. Dafür können ein Exsikkator oder ein Klimaschrank genutzt werden. So wird der reale, untertägige Zustand im „Mittel“ für den Baustoff wieder eingestellt.

Steht kein Klimaschrank zur Verfügung oder ist aufgrund der Größe oder der Menge der Proben (z.B. Bohrkerne) eine Lagerung in einem Exsikkator nicht möglich, kann die Probe in einem Trockenschrank bei maximal 45 °C und einer Luftfeuchte bis 35 % F_R bis zum Erreichen der Massekonstanz (keine Veränderungen der Masse innerhalb von 72 h um mehr als 0,1 % der Probenmasse bei einer Mindesteinwaage 100 g) gelagert werden. Im Klimaschrank mit 45 °C ist eine Luftfeuchte von 8 % einzustellen, welche mit der im Laborraum korreliert. I.d.R. handelt es sich um relative Luftfeuchten F_R im Bereich von >0 bis maximal 31 %. Ggf. ist diese zu kontrollieren oder kann auch über Bischofit, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, eingestellt werden. Über Bischofit stellt sich bei 45 °C eine Gleichgewichtsfeuchte F_R von 31 % ein (bei 25 °C von 32,5 %).

Die bei diesen Lagerungsbedingungen ermittelte Trockendichte, Reindichte und die daraus berechnete Gesamtporosität können als Parameter des Baustoffes verwendet werden, wenn das strömungstechnisch-mechanische Verhalten bestimmt wird.

Verhalten bei Lösungszutritt bzw. bei der Messung der Lösungspermeabilität

Tritt ein MgO-Baustoff vom 5-1-8 Rezepturtyp (D4) mit hinreichend $MgCl_2$ -haltiger Lösung in Kontakt, so verändert sich im Kontaktbereich der Porenraum, da die Lösung mit der Bindemittelphase reagiert und sich eine neue Phase(n) bildet (sekundäre Kristallisation). Dies beeinflusst die Trockendichte, die Reindichte und die Permeabilität.

Im MgO-Beton D4 sind die Poren im Ergebnis des Abbindeprozesses initial lösungsfrei, da die Anmischlösung vollständig verbraucht und dadurch keine Porenlösung im Gefüge enthalten ist. Die Eindringgeschwindigkeit und das räumliche Fortschreiten der Lösungsfront sind von der Porosität und der Porengrößenverteilung abhängig. In Abhängigkeit von diesen Größen stellen sich der Kapillardruck und die effektive Permeabilität ein.

Durch den Lösungszutritt werden sekundäre Kristallisationsprozesse ausgelöst. Infolgedessen wächst das Feststoffvolumen und die Lösung wird verbraucht. Dadurch reduziert sich die Porosität des Baustoffes. In der Folge ändern sich die Porengrößenverteilung, die Porosität und die strömungstechnischen Eigenschaften. Die Eindringgeschwindigkeit der Lösung nimmt

²³ In der Grube Teutschenthal wurde am Versuchsort CARLA (Standort im Carnallitit) im Zeitraum 2018/2019 eine sich im jahreszeitlichen Gang ändernde Luftfeuchte F_R von max. 48 % bzw. min. 25 % gemessen. Bei Kernbohrmaterial aus dem 2008 fertiggestellten Dammbauwerk GV2 (5-1-8-Rezepturtyp) hat sich der Phasenbestand nach 10-jähriger Standzeit in Gegenwart entsprechender Luftfeuchte nicht verändert.

dabei ab und es kommt letztendlich zu einer hydraulischen "Selbstabdichtung". Die Permeabilität sinkt also erheblich.

Diese Prozesse sind in [5] sowie im Abschnitt 9 des Abschlussberichtes des FuE-Projektes MgO-SEAL [4] beschrieben.

Die Abweichung Δn der Porosität n nach Aufsättigung mit Lösung von der Porosität n_0 im Ausgangszustand kann wie folgt in Abhängigkeit von der Menge der eingedrungenen Lösung berechnet werden (siehe Abbildung 282):

$$\Delta n = \frac{n - n_0}{n_0} \quad (16)$$

n Porosität des MgO-Baustoffes nach Aufsättigung mit Lösung

n_0 Porosität des MgO-Betons im Ausgangszustand

Das spezifische Lösungsvolumen ist das kumulative Lösungsvolumen, normiert auf das Ausgangsporenvolumen (Formeln (17) und (18)).

$$V_{L, \text{spez.}} = \frac{\sum V_{L,i}}{V_{P,0}} \quad (17)$$

$V_{L, \text{spez.}}$ - Spezifisches Lösungsvolumen [-]

$\sum V_{L,i}$ - kumulatives Lösungsvolumen über die ausgetauschten Porenvolumina bzw. alle Einzelstufen "i" [cm³]

i - Einzelstufe, in der eine gewisse Menge Lösung in den Porenraum eindringt und mit dem Baustoff reagiert

$V_{P,0}$ - Porenvolumen im Ausgangszustand [cm³]

$$V_{p,0} = n_0 \cdot V \quad (18)$$

n_0 - Porosität des MgO-Betons im Ausgangszustand [-]

V - Volumen des MgO-Betons [cm³]

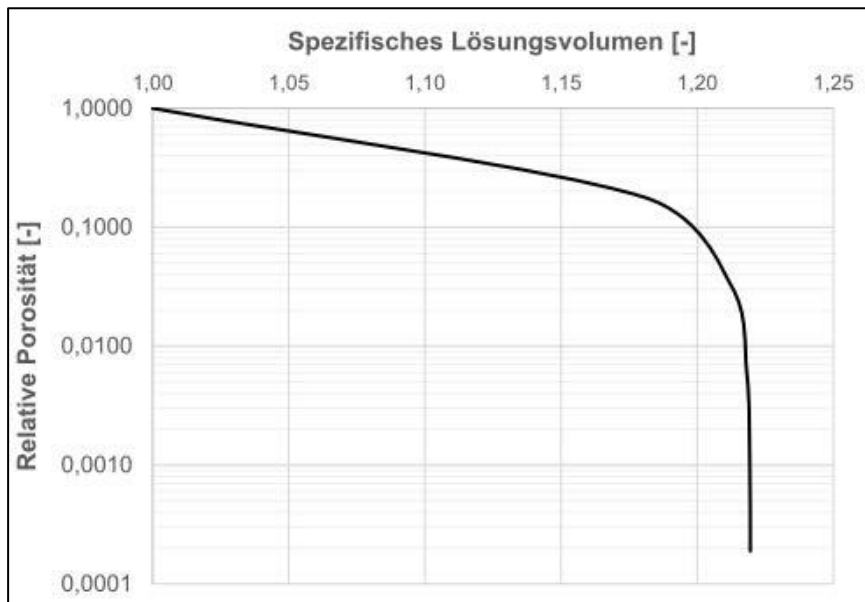


Abbildung 282: Abhängigkeit der relativen Porosität im MgO-Beton der Rezeptur D4 in Abhängigkeit von der normierten Menge an Lösung im Porenraum

Die in Abbildung 282 dargestellte Abhängigkeit basiert auf der in [5] beschriebenen Reaktionsgleichung und der Erkenntnis, dass der Volumenzuwachs an Feststoff das 1,323-

fache des Feststoff-Ausgangsvolumens beträgt. In diesem Fall strebt das spezifische Lösungsvolumen einem Wert von 1,219 entgegen.

Anlage 1.6 Bestimmung der triaxialen Druckfestigkeit und weiterer Probenparameter

Als Festigkeit wird der Widerstand eines Körpers gegen Bruch bei mechanischer Belastung bezeichnet. Sie ist die wichtigste Bemessungsgröße von Tragelementen. Bei Schachtverschlussbauwerken zählen zu den Tragelementen bspw. Widerlager oder kombinierte Widerlager-Dichtelemente.

Ein wichtiger Festigkeitskennwert von kohäsiven Baustoffen ist die einaxiale Druckfestigkeit. Sie wird in der klassischen Betonprüfung durch einen Druckversuch mit eigens hergestellten Probekörpern zumeist als Würfelfestigkeit (Kantenlänge 150 mm) bzw. als Festigkeit eines Prüfzylinders (150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe) ermittelt. Analog wurden an etwas kleineren Proben von der TU BAF die einaxiale Druckfestigkeit an Zylinderproben bestimmt (100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe).

Die vom IfG verwendete Untersuchungsmethodik weicht in mehreren Punkten von der üblichen Baustoffprüfung ab:

- (1) Ein- bzw. triaxiale Druckversuche werden am IfG Leipzig (abweichend von den Qualitätsprüfungen in der Baustoffindustrie) bevorzugt verformungsgeregelt (z.B. mit einer konstanten Verformungsrate von $9\%/h = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) durchgeführt, wobei mit der Verformung automatisch die dafür notwendige Axialkraft servohydraulisch nachgeregelt wird. Im Ergebnis wird eine Spannungsdehnungskurve erhalten, die abhängig vom Manteldruck zunächst eine zunehmende Verfestigung bis zum Probenbruch und danach den Übergang in ein Restfestigkeitsniveau zeigt.
- (2) Die mit Sorelbaustoffen zu erstellenden Schachtverschlussbauwerke werden in radialer Richtung durch das aufkriechende Gebirge und in axialer Richtung durch einen möglichen Gas- bzw. Fluiddruck belastet, wobei die Belastungsraten entsprechend der In-situ-Bedingungen gering sein werden. Deshalb liegt hier, über die klassischen Untersuchungstechniken hinausgehend, der Schwerpunkt in der Untersuchung des Festigkeitsverhaltens unter triaxialer Einspannung u.a. in der Ableitung einer Festigkeitskurve. Üblicherweise werden dafür triaxiale Drucktests an Einzelproben bei definierten, jeweils unterschiedlichen Einspannungen durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Probenzahl (vgl. Kap. 6.5.4.5 und 6.5.5.5) wird im Rahmen dieses Untersuchungsprogrammes für jede Probe ein triaxialer Mehrstufenversuch durchgeführt, der es ermöglicht, über eine Erhöhung der Einspannung in insgesamt vier Laststufen eine vollständige Festigkeitskurve aufzunehmen.
- (3) Die Probe wird analog zu den konventionellen Einstufen-Druckversuchen bei konstantem Manteldruck axial unter Vorgabe einer definierten Verformungsrate verformt. Werden charakteristische Verschiebungen oder Spannungszustände nahe dem Bruchpunkt (Annäherung an ein Maximum) erreicht, wird die Belastung der Probe schnell abgebrochen, indem die erreichte Axialspannung abgesenkt wird, so dass im Idealfall keine signifikante Schädigung des Prüfkörpers eintritt. Danach wird die nächste Belastungsstufe angefahren, wobei gleichzeitig die Axialkraft und der Manteldruck erhöht wird.

Isostatischer Druckversuch

Der Verformungsmodul wird in Anlehnung an die DIN EN 12390-13 (Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung) bestimmt, wobei zwei verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten (schnell: $\dot{p} = 0,1 \text{ MPa/s}$ bzw. langsam: $\dot{p} = 0,005 \text{ MPa/s}$) in einem Belastungsregime mit einem Manteldruck

zwischen 0,2 MPa und 15 MPa mit mehreren Hysteresen realisiert werden. Die Proben werden in drei Zyklen (mit Zwischenentlastung bei jeweils 5 MPa, 10 MPa und 15 MPa) schrittweise belastet und die Spannungs-Volumenverformungskurve aufgezeichnet. Im Rahmen dieses Index-Untersuchungsprogrammes wurde keine exakte Querdehnungs- bzw. integrale Volumenmessung durchgeführt. Stattdessen wird vereinfachend die Volumenverformung über die axiale Dehnungsmessung berechnet ($\Delta V = 3 \cdot \epsilon_{Ax}$).

Es ist anzumerken, dass aus den so bestimmten Belastungskurven, keine unmittelbar in situ-relevanten Verformungsmodule, wie sie als Eingangsgrößen für numerische Modellierungen benötigt werden, bestimmt werden können, da bei den vergleichsweise schnellen Belastungsraten häufig zu hohe Steifigkeiten ermittelt werden. Deshalb führt das IfG Leipzig in anderen Vorhaben (z.B. Charakterisierung der Eigenschaften von A1-Baustoff für Strömungsbarrieren auf der Schachanlage Asse II) zusätzlich isostatische Kriechversuche durch, auf deren Basis ein sogenannter Ersatzkompaktionsmodul abgeleitet wird.

Kriechen / Relaxation

Mit dem Begriff Kriechen wird bei Werkstoffen die zeit- und temperaturabhängige, plastische Verformung unter konstanter Last bezeichnet, wobei zwischen deviatorischem und Volumen- bzw. Kompaktionskriechen unterschieden wird. Während deviatorisches Kriechen, wie es z.B. für Steinsalz typisch ist, als irreversible plastische Verformung volumenkonstant abläuft, kommt es bei porösen Baustoffen infolge der wirkenden äußeren Einspannung zusätzlich zur (teilweise reversiblen) Matrixkompaktion und zu einer Reduzierung der Porosität aufgrund von Gefügeänderungen (z.B. durch Zukriechen von Porenräumen, Umverteilung von potentiell vorhandener Lösung). Im Realfall bedeutet dies, dass das Bauwerk sich bspw. beim Aufkriechen des Gebirges der Spannung entziehen kann. Je nach hydraulischem Gradienten und abhängig von der Durchlässigkeit kann sich der Baustoff entweder verdichten (mit Erhöhung des hydraulischen Widerstandes) oder aber infolge einer Aufweitung von Fließwegen wird die Durchlässigkeit erhöht.

Einen Sonderfall des Kriechens stellen Relaxationsprozesse mit sich ändernden Spannungen dar. Unter Relaxation ist der allgemein zu beobachtende, zeitabhängige Spannungsabbau zu verstehen (aufgrund Baustoff inhärenter Verformungsprozesse), wie er im Laborversuch z.B. bei Gesteinsproben während eines Druckversuchs in Phasen konstanter Dehnung auftritt. Als Folge dieser Prozesse wird die in einem Verschlussbauwerk unter äußerer Belastung (oder infolge der sich beim Abbindeprozess entwickelnden Kristallisationsdrücke) erreichte Spannung im Laufe der Zeit durch Strukturänderungen innerhalb des Baustoffes abgebaut. Daraus folgt, dass die sich einstellende Deviatorspannung des Baustoffes abhängig von der Belastungsrate ist.

Zur Beschreibung dieses Effektes wird hier der sogenannte Tragwiderstand bestimmt, der der Deviatorspannung des Baustoffes als extrapoliertes Spannungswert abhängig von der wirkenden Belastungsrate entspricht. Er wird im Laborversuch über ein spezielles Verfahren bestimmt, das am IfG Leipzig ursprünglich zur Bewertung des verformungsratenabhängigen Tragwiderstandes von Pfeilern im Salzbergbau entwickelt wurde.

Da in situ-relevante Belastungsraten ($\dot{\epsilon}_1 \approx 10^{-10}$ 1/s) im Labor praktisch nicht realisiert werden können, wird hier der in situ-Tragwiderstand des MgO-Baustoffs durch Relaxationsversuche auf Basis von (schnellen) Laborversuchen ($\dot{\epsilon}_1 \approx 10^{-5}$ 1/s) bestimmt. Der hierfür durchgeführte Triaxialversuch umfasst ein mehrstufiges Versuchsregime (vgl. Abbildung 283):

- (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 Bruch-

festigkeit, nach dem Ergebnis von Vorversuchen) erreicht war (Abbildung 283a).

- (2) Danach wurden die Druckeinspannung (Manteldruck) und die Axialverformung (σ_1) konstant gehalten, d.h. $\dot{\varepsilon}_1 = 0$, und die Relaxation der Differenzspannung über die Zeit (bis zu 48 h) beobachtet (Abbildung 283b bzw. c).

Aus der in (2) 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.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_{Diff}}{E_s} \quad (19)$$

Als Ergebnis wird die Effektivspannung gegen die logarithmierte Verformungsrate für jeden Relaxationsversuch dargestellt. Dies ist eine quasi-lineare Kurve, aus der über Extrapolation auf $\dot{\varepsilon}_1 \approx 10^{-10}$ 1/s der in situ-relevante Tragwiderstand abgelesen werden kann (Abbildung 283c).

- (3) Nach Beendigung der Relaxationsphase wurde die Probe abschließend bis zum Probenbruch bzw. bis zum Restfestigkeitsniveau verformt (Abbildung 283d).

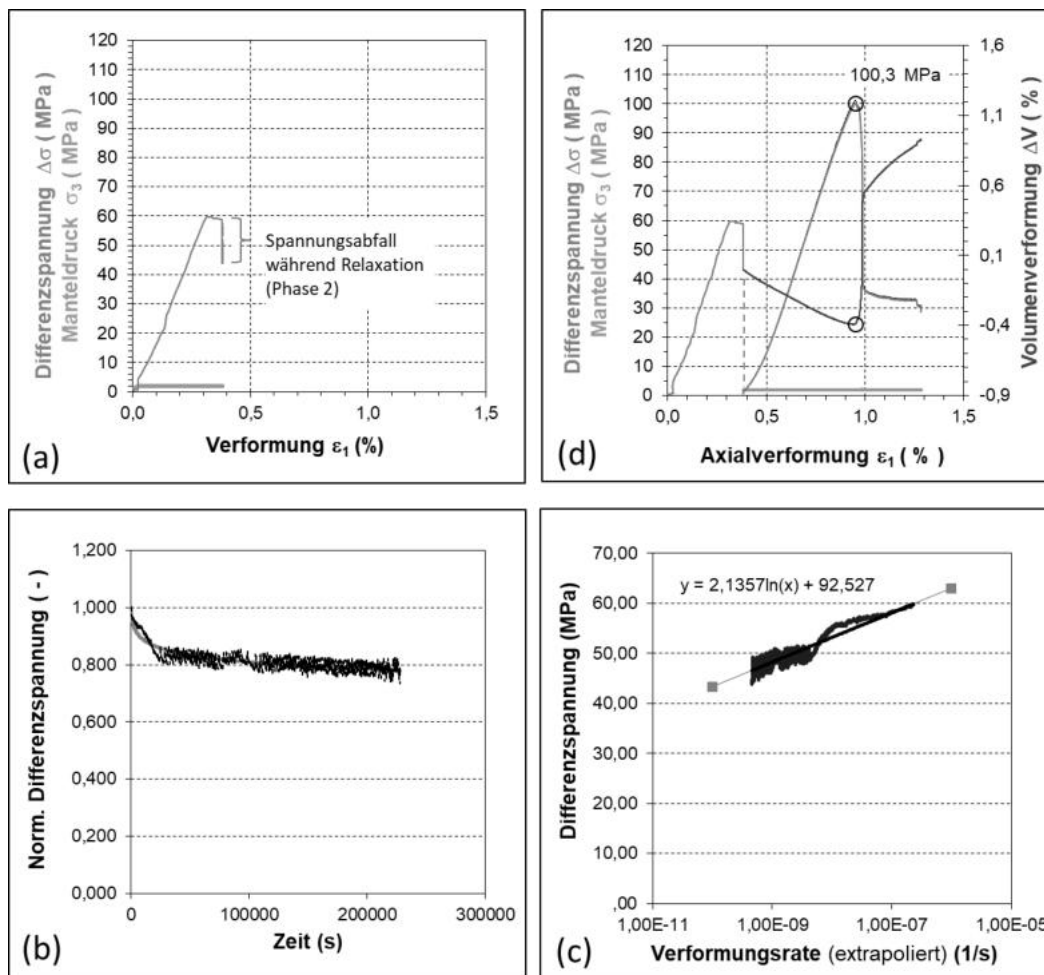


Abbildung 283: Mehrphasiger Relaxationsversuch (Beispielversuch für Probe aus GV2).

Hinsichtlich der Relevanz der Untersuchungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die hier durchgeführten Relaxationstests ausschließlich dem Vergleich zeitabhängiger Verformungseigenschaften im „Kurzzeitversuch“ dienen. Mit den ermittelten Relaxationskurven ist jedoch keine ausreichende Quantifizierung des Kriechverhaltens des

Baustoffes in einem Verschlussbauwerk möglich, wie sie innerhalb von Nachweisführungen benötigt wird. Auch deshalb, weil die gewählte Belastung von ca. 80% des Bruchzustandes nicht den In-situ-Bedingungen entspricht. Bevorzugend sollte deshalb eine Serie von Kriechversuchen mit hydrostatischen und deviatorischen Belastungen durchgeführt werden, auf deren Basis zur Beschreibung des Kriechens geeignete Stoffparameter für den relevanten Spannungsraum (für hydrostatische Belastungen bis ca. 20 MPa zur Beschreibung des Kompaktionskriechens sowie für kleine Spannungsdeviatoren) bestimmt werden.

Für die Durchführung von triaxialen Druckversuchen an großen Prüfkörpern ($l = 200 \text{ mm}$, $d = 100 \text{ mm}$) wird vom IfG Leipzig die servohydraulischen Prüfsystem RBA2500 (mit $F_{\max} = 2.500 \text{ kN}$) bzw. die D2000 (mit $F_{\max} = 2.000 \text{ kN}$) eingesetzt. Mittels einer triaxialen Druckzelle können routinemäßig triaxiale Festigkeitsuntersuchungen nach dem Kármán-Prinzip $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ durchgeführt werden. Die Axialbelastung bzw. -verformung und der Manteldruck werden jeweils über eine Servohydraulik unabhängig voneinander geregelt. Die Versuche werden gemäß der Empfehlung Nr. 2 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG 1979) durchgeführt.

Auf Basis der so ermittelten Festigkeitsdaten kann das Baustoffverhalten mit dem elasto-plastischen Stoffansatz nach MOHR-COULOMB in numerischen Berechnungen näherungsweise nachgebildet werden.

Anlage 1.7 Bestimmung der Haftzugfestigkeit

Die IfG-Standardmethode zur experimentellen Bestimmung der direkten Zugfestigkeit von Gesteinsproben bzw. Trennflächen (DTT-Versuchsanordnung: „direct tensional test“) basiert auf der experimentellen Zugbeanspruchung einer zylindrischen Gesteinsprobe (vgl. ASTM D 2936). Nach Fixierung der planparallelen Probenendflächen an zwei Stempeln mit einem hochfesten Kleber (z.B. Araldite AW 2101 / HW 2951: pastöser 2-K-Mehrzweckklebstoff; Härtezeit: 1h – 1d) wird die Probe in einer hierfür geeigneten Prüfmaschine in einer Linie und ohne Torsionkräfte kontinuierlich durch Vorgabe einer definierten Verformungsrate auf Zug bis zum Gesteinsversagen beansprucht (vgl. Abbildung 284).

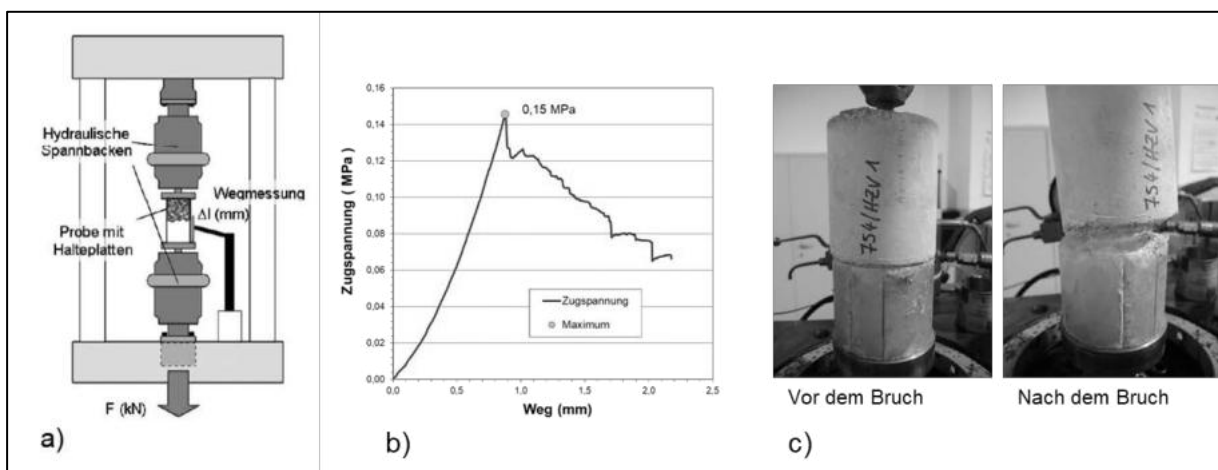


Abbildung 284: Methodik zur Durchführung von direkten Zugversuchen (DTT-Versuch) an der Kontaktfläche Baustoff/Gestein. a) Schematischer Probenaufbau mit der Wegmessung in der servohydraulischen Universalprüfmaschine SHM 250 (Zug/Druck); b) Spannungs-/Verformungsdiagramm des Zugversuchs 754/HZV1 (GSBV4); c) Prüfkörper vor und nach dem Zugversuch.

Die Zugspannung ergibt sich beim direkten Zugversuch („Direct Tension Test“, DTT) über den einaxialen Kräfteintrag F_{\max} und die zugbelastete Querschnittsfläche A_{TZ} :

$$\sigma_T = \frac{F_{\max}}{A_{TZ}} = \frac{F_{\max}}{r^2 \cdot \pi} \quad (20)$$

σ_T	direkte Zugfestigkeit	[MPa]
F_{\max}	axiale Bruchlast	[kN]
r	Radius der Kontaktfläche	[m]

Anlage 1.8 Bestimmung der Scherfestigkeit

Bei einem Scherversuch wird die Probe zwischen Baustoff und Steinsalz nach Aufgabe einer konstanten Normalspannung („constant normal load“) über die verformungsratengeregelte Verschiebung der unteren Scherbox abgeschert.

Ein direktes Schertestsystem bietet den Vorteil, dass die zu untersuchenden Proben so ausgerichtet sind, dass die Wirkungslinie der Scherkraft bzw. Spannung (τ) in der zu untersuchenden Trenn- oder Schichtfläche liegt und die Wirkungslinie der Normalspannung (σ_N) senkrecht zu dieser Fläche orientiert ist.

Die zu untersuchende Kontaktfläche sollte bzgl. ihrer Welligkeit bzw. Rauigkeit möglichst repräsentativ für in situ-Verhältnisse sowie reproduzierbar sein. Diese Anforderung ist aufgrund des Probendurchmessers von ca. 100 mm sowie der Variabilität des natürlichen Probenmaterials, mittelkörniges Steinsalz, mit einer manuellen Herstellung der Spaltflächen mit einer unregelmäßigen Morphologie ($\Delta h = \pm 0,5 - 1 \text{ cm}$) nur eingeschränkt realisierbar. Allerdings zeigen die Erfahrungen aus verschiedenen Dammbauprojekten (z.B. der Asse oder Teutschenthal), bei denen im in situ-Versuch u.a. die mit der Druckbeaufschlagung bedingte Bauwerksverschiebung gemessen werden konnte, dass die experimentell bestimmten Scherparameter zu realistischen Rechenergebnissen führen.



Abbildung 285: MTS-Scher-Test-System (Modell 816) (IfG Leipzig GmbH)

Für die Bestimmung der Scherfestigkeit wird am IfG seit 2003 das servohydraulische MTS-Scher-Test-System (Modell 816) eingesetzt. Der Aufbau des Schersystems ist in Abbildung 285 dargestellt. Im vorderen Teil der Prüfmaschine (rechts) befindet sich ein extrem steif

ausgebildeter viersäuliger Lastrahmen, der zur Aufnahme und zur vertikalen Belastung der zweiteiligen Scherbox durch den oberen Hydraulikzylinder (bis zu 500 kN Axialkraft) dient. Seitlich angebracht ist ein stabiler Tisch, auf dem ein Horizontalzylinder (250 kN Druck; 160 kN Zug) in einem horizontalen Kraftrahmen zur Aufbringung der seitlichen Scherkraft angeordnet ist.

Die Proben wurden in den Scherboxen so fixiert, dass eine Verkipfung bzw. Spiel im Einbettungsmittel ausgeschlossen war. Dies wurde durch die Verwendung eines hochfesten Ankerbetons (z.B. Intoplan HH42) gewährleistet.

Über den vorgegebenen freien Spalt (variabel zwischen 0,5 und 3 cm) kann die eingebaute Probe dann einer definierten Scherung unterzogen werden.

Die zwei Regelkanäle, vertikal und horizontal, können jeweils Kraft- oder Weg-gesteuert sein, womit sich verschiedene Scherversuchsabläufe realisieren lassen:

- *Scherversuch unter konstanter Normalspannung (CNL)*
- *Scherversuch unter konstanter Normalsteifigkeit (CNS)*
- *Dilatanzfreier Scherversuch.*

Hier wurde ausschließlich der CNL-Scherversuch durchgeführt.

Anlage 1.9 Permeabilitätsmessungen an Kernproben

Für die Ermittlung der Permeabilität wurde die Methode des instationären Zweikammerversuches angewendet. Abbildung 286 gibt eine schematische Übersicht des Versuchsaufbaus. Abbildung 288 zeigt die Versuchsanordnung für die Durchführung der Versuche zur Ermittlung der Permeabilität. Die Permeabilitätsmessung beruht auf der modellgestützten Auswertung des zeitabhängigen Strömungsprozesses durch einen zylindrischen Prüfkörper. Der Strömungsprozess wird durch einen Druckimpuls in der Eingangskammer ausgelöst. Der über den Versuchszeitraum in der Eingangs- und Ausgangskammer gemessene Druck beschreibt den Strömungsprozess und bildet die wesentliche Grundlage für die modellgestützte Identifikation der Permeabilität aus den Versuchsdaten.

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

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

Die Auswertung jedes Versuches erfolgt über die Zusammenführung der genannten Versuchskennnisse in einem numerischen Modell. In Abhängigkeit vom Prüfkörperaufbau ist die Auswertung auf der Basis eines zwei- oder dreidimensionalen Modells für einen Strömungsraum mit Zylindergeometrie entsprechend Abbildung 287 möglich. Die räumliche Diskretisierung des Modells kann in Abhängigkeit von der Prüfkörpergeometrie, dem Probenaufbau und den Detailkenntnissen zu der jeweiligen Probe individuell angepasst werden.

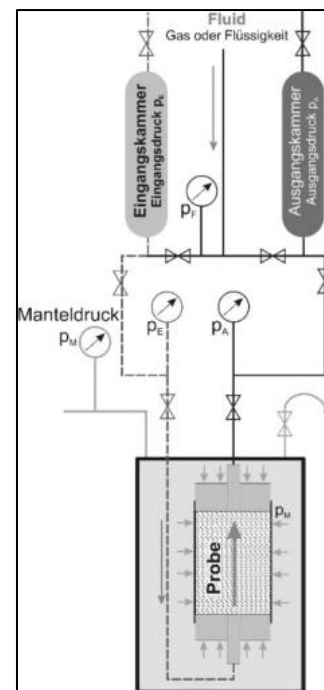


Abbildung 286: Schematische Übersicht des Versuchsaufbaus

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

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

Die Permeabilität wird ermittelt, indem der berechnete Druck in der Ein- und Ausgangskammer an den gemessenen Druck in der Ein- und Ausgangskammer angepasst wird. Die Anpassung erfolgt über die Variation der Parameter Permeabilität und Porosität. Wurde in begleitenden Untersuchungen die Porosität des Materials ermittelt, wird diese als Startwert der Parameteridentifikation verwendet. Liegen keine Ergebnisse für die Porosität vor, werden Erfahrungswerte für die untersuchten Materialien als Startwerte verwendet. Die Zielfunktion bei der Parameteridentifikation ist die Minimierung der Fehlerquadratsumme bei der Anpassung des berechneten Druckverlaufes an den gemessenen Druckverlauf. In Abbildung 289 ist beispielhaft ein Anpassungsergebnis dargestellt.

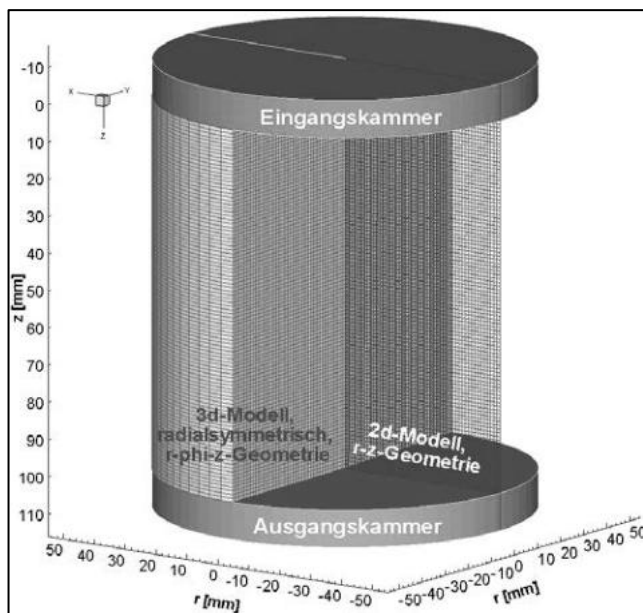


Abbildung 287: Schematische Darstellung des numerischen Modells

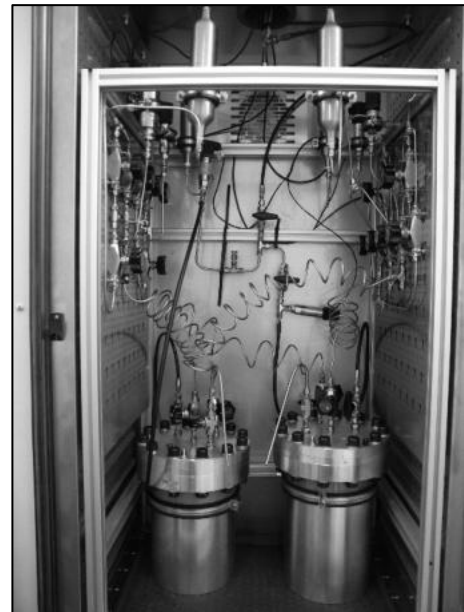


Abbildung 288: Zweikammerversuchsanlage für Gas

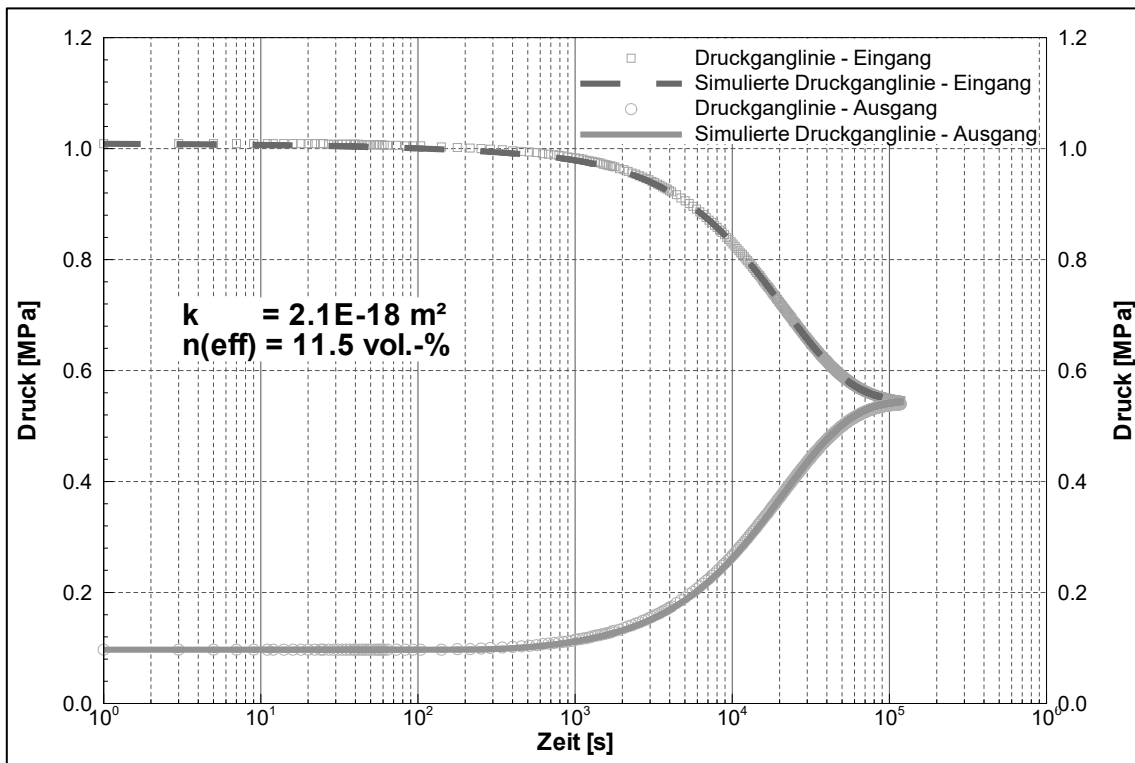


Abbildung 289: Beispiel für das Ergebnis einer modellgestützten Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien (kein Bezug zu projektbezogenen Auswertungen)

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

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

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

Gaspermeabilität k_G

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

Für die Gaspermeabilitätsuntersuchung kann unter den Laborbedingungen von der Strömung eines gegenüber dem Feststoff und dem Porenfluid nahezu inerten Mediums ausgegangen werden (z.B. N₂)²⁴.

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

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

- Reduzierung der Porosität,
- Verschiebung der Porengrößenverteilung, was für klimatisiert gelagerte Proben zur Erhöhung der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit führt,
- Reduzierung der Permeabilität,
- Festigkeitsüberschreitung und Rissbildung²⁵ in der Bindemittelmatrix und/oder im Zuschlag von Zementbasierten Baustoffen.

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

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

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

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

Lösungspermeabilität k_L

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

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

Aus den vorliegenden Erfahrungen für die Durchströmung von hydraulisch abbindenden Material mit mineralisierter Lösung ist davon auszugehen, dass Wechselwirkungen zwischen der Lösung und dem hydraulisch abbindenden Material (u.a. Lösungs- und Kristallisationsprozesse mit Volumenzunahme → Kristallisationsdruck, Reaktionen mit Volumenabnahme oder Zunahme) auftreten können. Diese führen zu einer Veränderung des

²⁴ bei Vernachlässigung der Trocknung und ggf. einsetzender Wechselwirkungen zwischen Gas- und Porenlösung

²⁵ Beim Ausbau der Prüfkörper konnte keine Rissbildung visuell beobachtet werden.

Porengefüges durch Volumenvergrößerung und/oder -reduzierung sowie daraus resultierend zu einer Beeinflussung des Porenraumes und der Permeabilität.

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

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

Anlage 2 In situ Permeabilitätsuntersuchungen

Der Strömungsprozess einer flüssigen oder gasförmigen Phase⁽²⁶⁾ (Fluid) in einem Porenraum wird bestimmt:

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

Auf der Grundlage der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit werden folgende Permeabilitäten unterschieden:

- absolute Permeabilität k_{abs} bei einer Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit von $S_L=0$ (absolute Gaspermeabilität $k_{G, abs}$) oder $S_L=1$ (absolute Flüssigkeitspermeabilität $k_{L, abs}$)⁽²⁷⁾,
- effektive Gas- und Flüssigkeitspermeabilität $k_{G, eff}$ bzw. $k_{L, eff}$ in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit $0 < S_L < 1$ und
- relative Permeabilität $k_{G, rel}$ bzw. $k_{L, rel}$.

Die relative Permeabilität beschreibt den Zusammenhang von effektiver Phasenpermeabilität und Flüssigkeitssättigung⁽²⁸⁾ und wird durch Gleichung (1) beschrieben:

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

$k_{Ph, rel}$	-	relative Permeabilität der Fluidphase	[-]
$k_{Ph, eff}$	-	effektive Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
$k_{Ph, abs}$	-	absolute Permeabilität der Fluidphase	[m ²]
S_L	-	volumetrische Sättigung des Porenraumes mit <u>Flüssigkeit</u>	[-]
X	-	Wertebereich S_L ($0 \leq X \leq 1$)	[-]

Die Abbildung 290 zeigt schematisch den Zusammenhang von relativer Permeabilität der Fluidphasen und der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit [41].

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

⁽²⁶⁾ mit anderen Fluiden nicht mischbares Fluid – Wasser, Öl, Gas

⁽²⁷⁾ theoretisch $k_{G, abs} = k_{L, abs}$; praktisch durch vielfältige Einflüsse $k_{G, abs} \neq k_{L, abs}$

⁽²⁸⁾ i. d. R. in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit betrachtet, da die Flüssigkeit als die benetzende Phase angesehen wird

- Eine Prüfung der Lösungsgehalte/Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit ermöglicht die Interpretation der ermittelten Gaspermeabilität hinsichtlich einer Beeinflussung der Permeabilität durch die Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit. Wurden signifikante Lösungsgehalte/Sättigungen des Porenraumes mit Flüssigkeit ermittelt, gelten die ermittelten Permeabilitätswerte für diese Sättigungsverhältnisse des Porenraumes und werden als effektive Gaspermeabilitäten bezeichnet. In diesem Fall sind ggf. Permeabilitätsuntersuchungen mit Flüssigkeit durchzuführen.
- Erfolgt keine Prüfung des Lösungsgehaltes bzw. der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit, so ist ein Einfluss einer Flüssigkeitssättigung auf die ermittelte Permeabilität nicht auszuschließen. In dieser Situation wird die ermittelte Permeabilität als effektive Permeabilität bezeichnet.

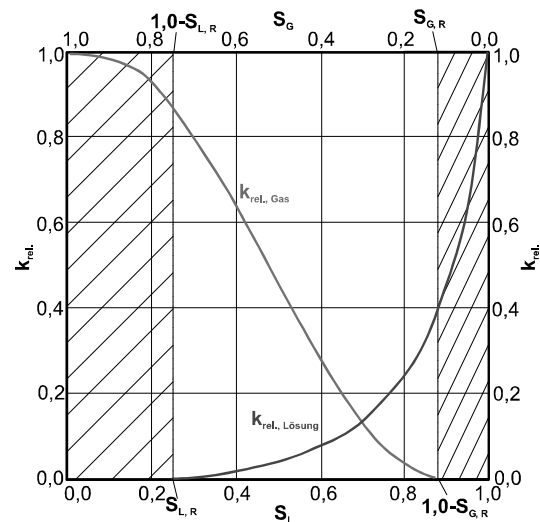


Abbildung 290: Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit aquatischer Salzlösung nach [41]

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

Anlage 2.1 Methodik in situ Permeabilitätsmessungen

In situ-Permeabilitätstests stellen in situ durchgeführte, strömungstechnische Versuche dar, bei denen ein instationärer Strömungsprozess im Porenraum des zu untersuchenden Baustoffes angeregt und sein zeitlicher Verlauf erfasst wird. Sie lassen sich grundsätzlich mit unterschiedlichen Strömungsfluiden durchführen. Es kommen dabei verschiedene Gase und Flüssigkeiten (i. d. R. Salzlösungen im Salinar) zum Einsatz. Die Auswahl des Strömungsfluids erfolgt anwendungs- und aufgabenbezogen.

Gas, insbesondere Druckluft, stellt ein gegenüber dem Strömungsraum inertes Strömungsfluid dar und fand in der Vergangenheit bei der in situ-Permeabilitätsbestimmung in Salinargesteinen vielfach Anwendung (z. B. [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]).

Da die in situ ermittelte Permeabilität grundsätzlich von der Sättigung des durchströmten Porenraumes mit Flüssigkeit bestimmt wird und in Abhängigkeit von den konkreten Standortbedingungen das Vorhandensein von Flüssigkeit im Porenraum nie vollständig auszuschließen ist, stellen die ermittelten Permeabilitäten effektive Permeabilitäten dar, welche sich auf Grund der Porenraumsättigung um Größenordnungen verändern können.

Die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen können prinzipiell durchgeführt werden als:

- Impulstest/pulse test (IT),
- Test mit konstantem Druck/constant pressure test (CP) und
- Test mit konstanter Rate/constant rate test (CR).

Anlage 2.2 Bohrlochpackertests

Anlage 2.2.1 Testmethode und Versuchsregime

Die oben genannten Versuchsregime unterscheiden sich im zeitlichen Verlauf der Druckbeaufschlagung. Beim Impulstest wird ein definiertes Volumen im Testintervall (Prüfraum) durch hydraulisch setzbare Packerelemente von der Umgebung abgeschlossen und dann mit einem Druckimpuls beaufschlagt. Für den Versuch mit konstantem Druck/konstanter Rate wird der Prüfraum permanent mit einem konstanten Druck bzw. konstanter Rate (Volumenstrom) beaufschlagt und der Druck und der in das Gebirge abströmende Volumenstrom kontinuierlich gemessen.

Für alle Versuchsregime erfolgt die Erfassung des Druckverlaufes im Testintervall (Prüfraum, PR) und, je nach Packerausrüstung, auch in 2 weiteren durch Packer abgeschlossenen Volumina (Kontrollräume, KR) in der Bohrung (z. B. für Vierfachpacker entsprechend Abbildung 291). Die Versuchsausrüstung wird in Anlage 2.2.3 näher erläutert.

Die in situ-Permeabilitätstests in einem Testintervall werden zweistufig durchgeführt. Dabei wird in einem ersten Impulstest das Durchlässigkeitsniveau für das untersuchte Testintervall ermittelt (Vorversuch). Bei einem schnellen Druckabfall innerhalb weniger Sekunden wird der Hauptversuch mit konstantem Druck durchgeführt. Bei geringer Druckabfallrate wird der Impulstest fortgesetzt.

Die Versuchsdaten werden kontinuierlich über den gesamten Versuchsverlauf aufgezeichnet, wobei die Mess- und Erfassungsfrequenz dem Druckverlauf so angepasst werden, dass Bereiche großer Veränderungen mit einem kurzen Messtakt dokumentiert werden (Messtakt minimal 0,1 s).

Die Anordnung der Prüf- und Kontrollräume (Intervalle) und das angewendete Druckregime führen zu einer zylinder- bis kugelförmigen Strömung im Gebirge (schematisch dargestellt in Abbildung 291). In Abhängigkeit von der Permeabilität des Gebirges und einer nicht auszuschließenden sekundären Auflockerungszone um die Messbohrung kommt es zu Druckreaktionen in den Kontrollräumen und in der Folge zu sich überlagernden Strömungsprozessen (Interferenz). Abbildung 292 und Abbildung 293 zeigen Beispiele für gemessene Druckverläufe und die rechnerische Anpassung bei Impulstests und konstanten Drucktests.

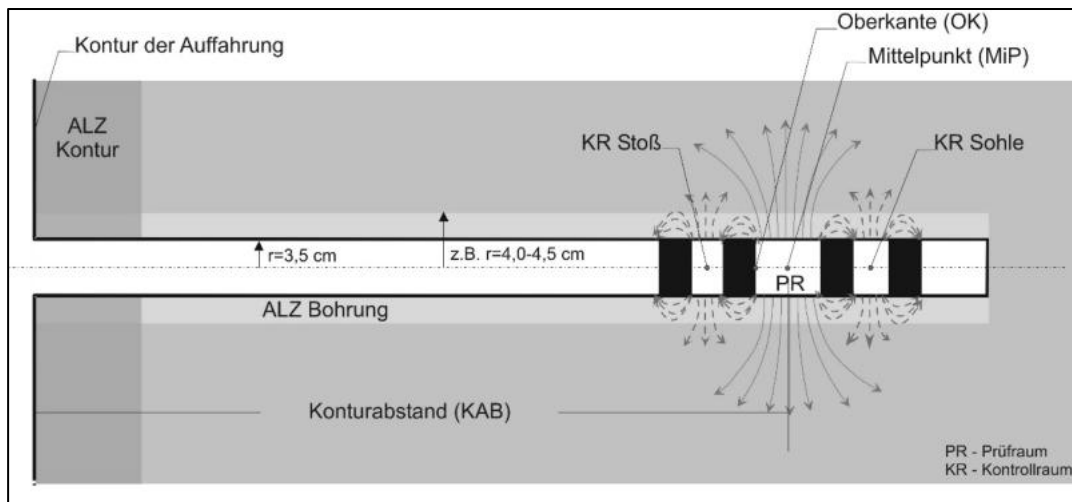


Abbildung 291: Schematische Darstellung der Gas- bzw. Lösungsströmung (Vierfachpacker)

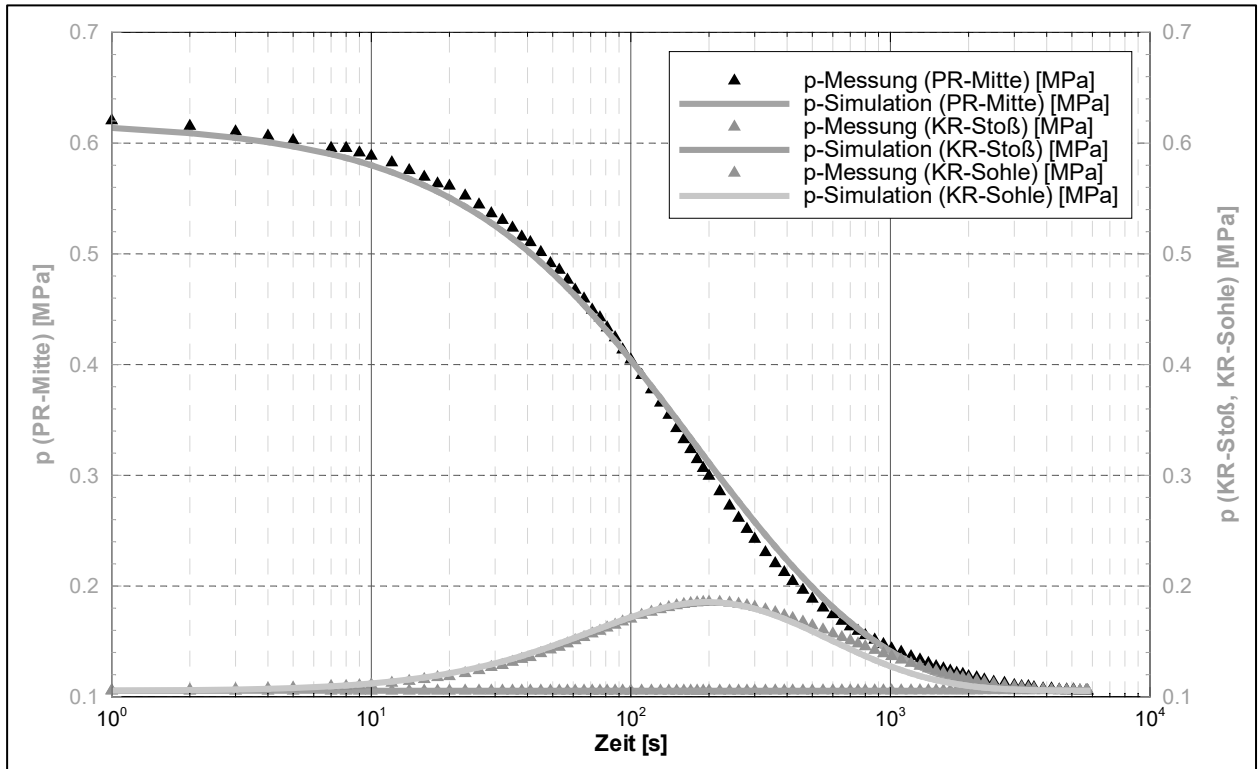


Abbildung 292: Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Impulstestes mit einem Vierfachpacker

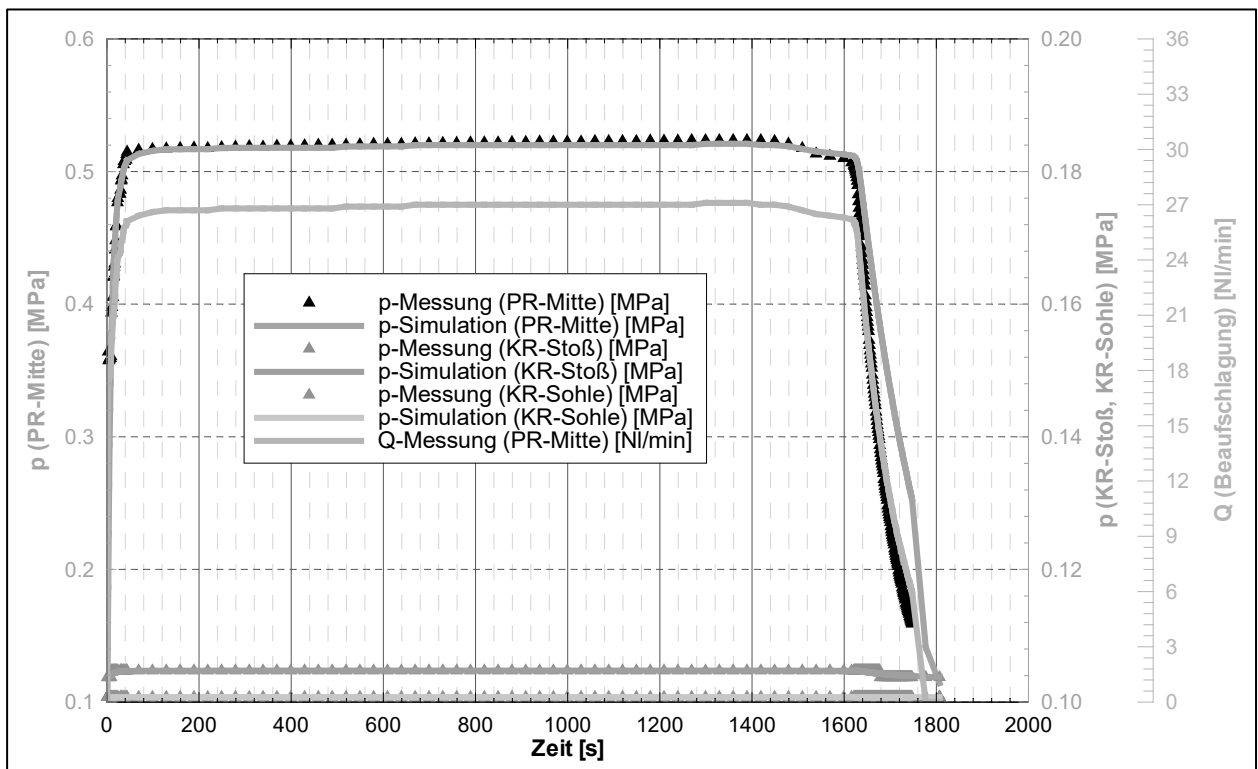


Abbildung 293: Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Tests mit konstantem Druck (CP) mit einem Vierfachpacker

Anlage 2.2.2 Versuchsdurchführung

Ausgehend von der Beschreibung des Messverfahrens und der Versuchseinrichtung in Anlage 2.2 und Anlage 2.2.3 werden die einzelnen Schritte der im Projekt angewendeten, unterschiedlichen Versuchsregime für die Ermittlung der Gaspermeabilität und der Permeabilität für Salzlösung nachfolgend in einer Kurzbeschreibung vorgestellt.

Impulstest (Gas)

Die Impulstests für die Gaspermeabilitätsbestimmung werden in folgenden Teilschritten durchgeführt:

- Dichtheitstest des Packers und der Messausrüstung in einem Stahlrohr,
- Einbau des Packers im Testintervall, ggf. Sicherung der Packergarnitur im Bohrloch (Einfachpacker),
- hydraulisches Setzen des Packers; Beobachtungsphase zur Gewährleistung eines vollständigen Setzens des Packers,
- Druckimpuls auf die Prüfkammer des Packers,
- zeitabhängige Messung des Prüfdruckes und der Druckreaktion in den Kontrollräumen sowie des Luftdruckes, des Packerdruckes und der Temperatur,
- modellgestützte Auswertung der gemessenen Druckverläufe unter Berücksichtigung der Kenntnisse zum Standort und zum Testverlauf.

Test mit Salzlösung und konstantem Drucktest

Die Tests für die Lösungspereabilitätsbestimmung werden in folgenden Teilschritten durchgeführt:

- Dichtheitstest des Packers und der Messausrüstung in einem Stahlrohr,
- wenn nicht natürlich gegeben, wird das Bohrloch mit Salzlösung aufgefüllt (Ermittlung dynamische Viskosität im Vorfeld notwendig) → Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit,
- „schwimmender“ Einbau des Packers im Testintervall, ggf. mechanische Sicherung des Packers im Bohrloch (z.B. Beaufschlagung der Bohrung),
- hydraulisches Setzen des Packers; Beobachtungsphase zur Gewährleistung eines vollständigen Setzens der Packer,
- Evakuieren der Salzlösung in den Kammern und den Leitungen des Packers mit Vakuumpumpe (Entfernung von Restgas),
- Druckbeaufschlagung des Testintervalls über die Prüfkammer des Packers; Verwendung einer Versuchsapparatur mit Gasdruckspeicher und Phasentrenner zur Gewährleistung eines konstanten Flüssigkeitsdruckes,
- zeitabhängige Messung des Prüfdruckes, des Volumenstromes, der Druckreaktion in den Kontrollräumen, des Luftdruckes, des Packerdruckes und der Temperatur,
- in Abhängigkeit vom Versuchsverlauf erfolgt die analytische oder modellgestützte Auswertung der gemessenen Druckverläufe unter Berücksichtigung der Kenntnisse zum Testintervall und zum Messverlauf.

Anlage 2.2.3 Versuchsausrüstung

Für die in situ-Untersuchung der Permeabilität stehen bei der IBeWa Packergarnituren (4-fach, 2-fach und 1-fach) für Bohrungsdurchmesser von 42 mm und 70 mm, sowie spezielle 2-fach-Packergarnituren für Bohrungsdurchmesser von 36 - 46 mm, 66 – 76 mm, 95 – 105 mm und 127 – 137 mm zur Verfügung. Die Intervalllängen betragen 0,04 m - 1,0 m. Einige Packer sind mit zentralem Durchgang zur Beaufschlagung des Bohrlochtiefsten ausgestattet.

Für Permeabilitätsmessungen über einen längeren Bohrungsabschnitt als Testintervall (Beaufschlagung der Bohrung) kommen i.d.R. Mehrfachpackersysteme mit zentralem Durchgang zum Einsatz. Diese werden im Bohrloch hydraulisch verspannt und der vor der Packergarnitur entstandene Druckraum (bis zum Bohrlochtiefsten) beaufschlagt. Die Länge des Prüflintervalls ist variabel und richtet sich nach der Entfernung des ersten Packersegmentes vom Bohrloch-

tiefsten. Bei dem beschriebenen Versuchsaufbau ist in jedem Fall eine Sicherung der Packer-garnitur durch ein Widerlager am Bohrlochansatz (Überwurfjoch und Gebirgsanker) erforderlich.

Die Bohrlochpacker werden über Edelstahldruckleitungen (Testfluid) und Druckschläuche (Hydrauliköl) mit der mobilen Messanlage verbunden. Diese besteht aus einer Druckbeaufschlagungseinrichtung sowohl für Hydrauliköl (Setzen der Packer im Bohrloch) als auch für das Strömungsfluid (Fluiddruckbehälter zur Beaufschlagung des Prüfraumes), einem Pufferspeicher (Hydrauliköl und Testfluid), den Messinstrumenten (i. d. R. Sensoren zur Überwachung von Öldruck, Druck im Prüfraum, Drücke in den beiden Kontrollräumen, Luftdruck, Lufttemperatur sowie zusätzlich des Volumenstroms der Druckbeaufschlagung des Prüfraumes bei Tests mit konstantem Druck (CP)) und der Datenerfassung (Datenlogger, Feld-Laptop). Die Abbildung 294 und Abbildung 295 zeigen den schematischen Versuchsaufbau und die Messausrüstung.

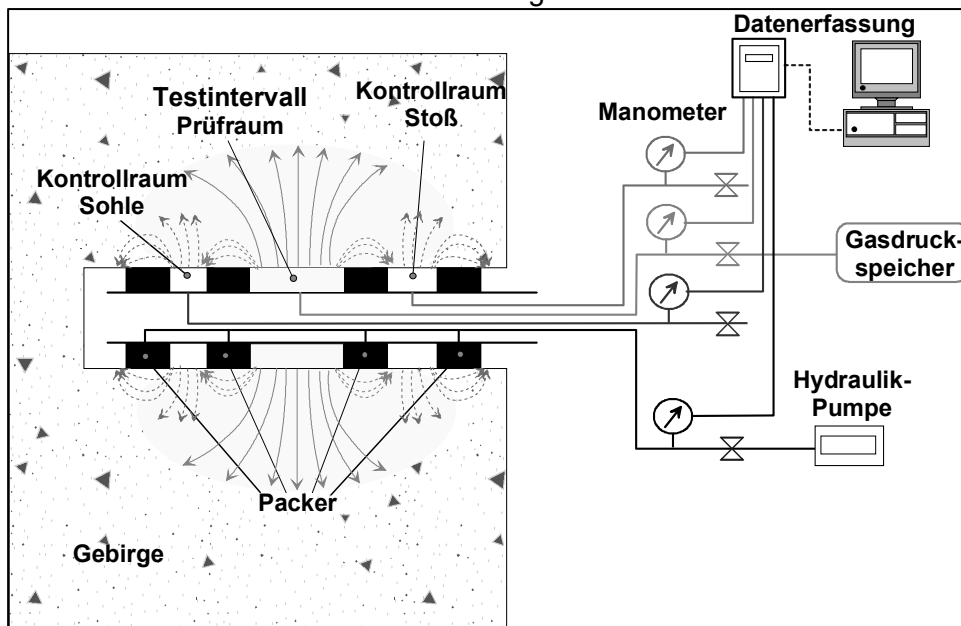


Abbildung 294: Schematischer Versuchsaufbau

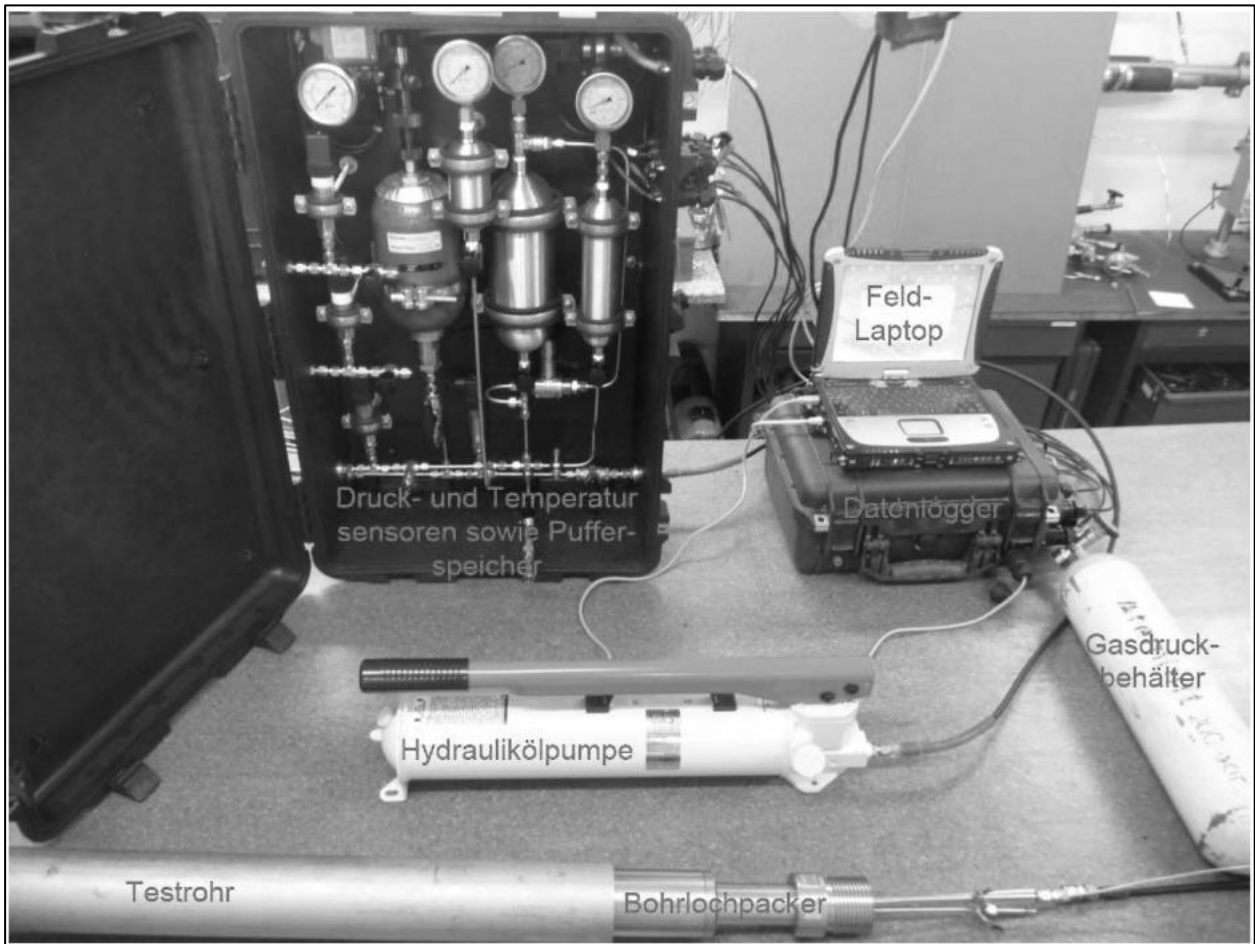


Abbildung 295: Messausrüstung eines Bohrlochpackertests (hier beim Dichttest)

Die Durchführbarkeit der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen ist abhängig von der Tiefe der Testintervalle, der Qualität der Messbohrung und dem Bohrungsdurchmesser und muss daher standortbezogen geprüft und konzipiert werden. Messungen in tieferen Bohrungen ($L > 25$ m) können für Gas und teilweise auch für Flüssigkeit bis in eine Tiefe von ca. 75 m durchgeführt werden. Dies erfordert eine Anpassung der Versuchsausrüstung und des Messkonzeptes.

Die verwendete Packerausrüstung wird vor jedem Einsatz und/oder nach jeder Montage bzw. Wartungsarbeiten einer Dichtheitsprüfung (Dichttest) mit einer Testdauer von 8 h bis 20 h für Gas unterzogen. Dabei wird zur Detektion von Undichtigkeiten bei Bedarf mit Tetrafluorethan dotiertes Gas eingesetzt. Bereits geringste Spuren ($> 1,5$ ppm) dieses Gases können durch den verwendeten Detektor identifiziert werden und geben einen Hinweis auf eine Undichtheit des Packersystems bzw. eine Umströmung des Packers.

Für die Erfassung der zeitlichen Druckentwicklung in den Prüf- und Kontrollräumen und den Packern wurden piezoresistive Drucksensoren mit Messbereichen von 0,4 MPa und 2,0 MPa Überdruck (Genauigkeit: i. d. R. 0,1 % bis 0,2 % vom Messbereich) verwendet.

Anlage 2.2.4 Auswertung

Für die Ermittlung der Permeabilität wird für jeden Versuch ein zweidimensionales Modell mit r - ϕ - z Geometrie (r - z Schnitt) aufgebaut, welches die Kenntnisse zum geometrischen Aufbau des Strömungsraumes sowie die Eigenschaften des Strömungsfluides berücksichtigt. Der Modellraum wird beliebig fein diskretisiert, wobei in x -Richtung der Radius ausgehend von der Bohrungsachse und in y -Richtung die Entfernung von der Kontur (Stoß) aufgetragen werden (Abbildung 296). Mit dem durch die IBeWa im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens weiterentwickelten und verifizierten Programmsystem ModOFP (Version 4.0, Stand

von 2016) wird die partielle Differentialgleichung für die instationäre, isotherme Strömung für Gas bzw. für eine Flüssigkeit gelöst.

Der Anpassungsprozess wird mit einer gewählten Permeabilität gestartet. Durch den Suchprozess wird eine Permeabilität ermittelt, für welche die gemessenen und berechneten Druckganglinien die beste Übereinstimmung zeigen. Die Zielfunktion der Anpassung ist die Minimierung der Fehlerquadratsumme für die gemessenen und berechneten Druckverläufe als Lösung von Gleichung (21).

$$J = + \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (p_{i,B} - p_{i,M})^2}{N - 1}} \Rightarrow \text{Min.} \quad (21)$$

J	-	Gütekriterium	[Pa]
N	-	Anzahl Messpunkte, $p = f(t)$	[-]
$p_{i,B}$	-	Druck berechnet	[Pa]
$p_{i,M}$	-	Druck gemessen	[Pa]

In Abbildung 296 ist beispielhaft für einen 4-fach Packertest das Modell zur Abbildung der radialsymmetrischen Fluidströmung mit der Diskretisierung und der berechneten räumlichen Druckverteilung dargestellt.

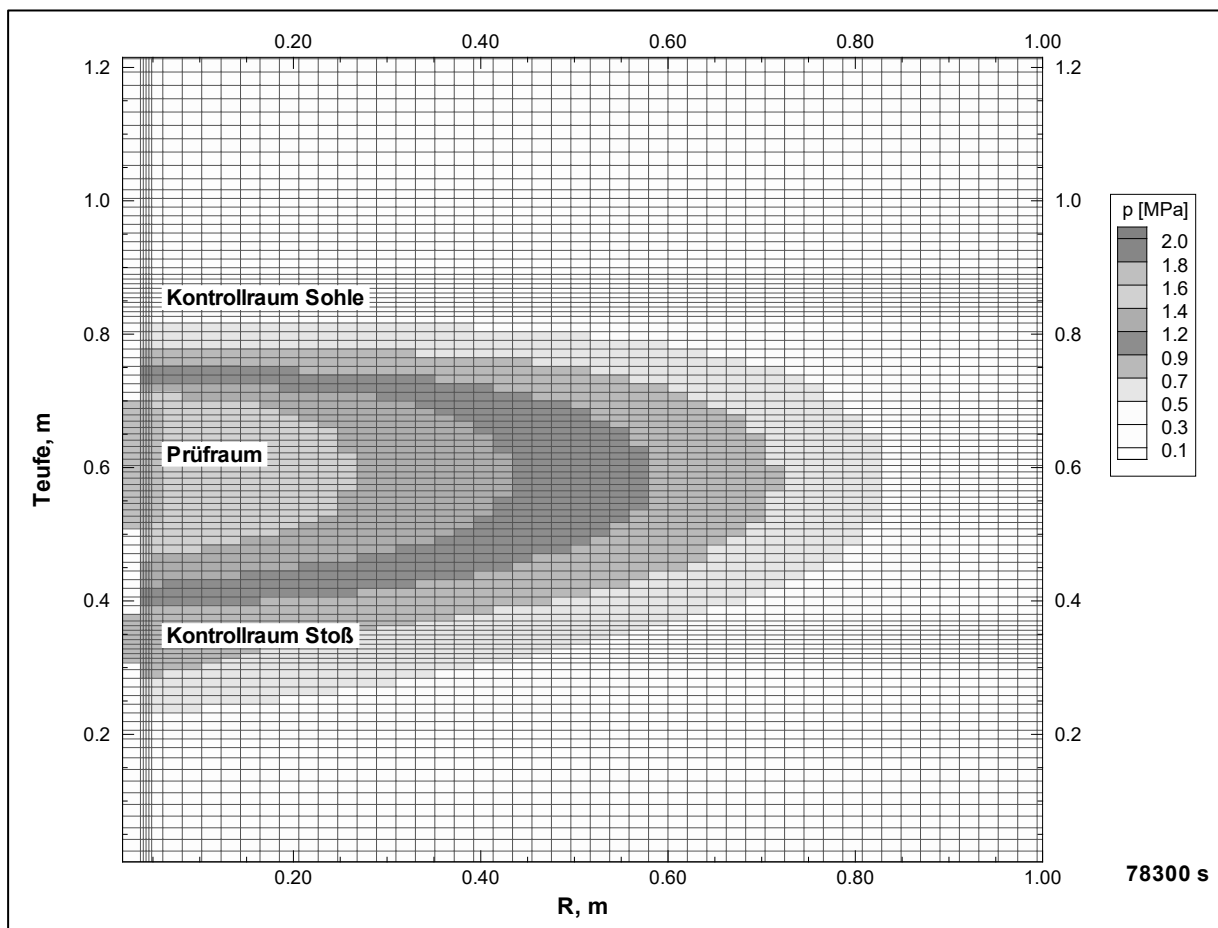


Abbildung 296: Testauswertung - Modelldiskretisierung und räumliche Druckverteilung

Anlage 3 Untersuchungsprogramme

Nachfolgend werden tabellarisch die Untersuchungsprogramme für verschiedene Parameter und die entsprechenden Proben aufgelistet.

Anlage 3.1 in situ-Permeabilitätsuntersuchungen GV2

Anlage 3.1.1 Untersuchungsprogramm B45

Bohrung	Messpunktname	Packer-AG	OK	MP	UK	p_{0i}	$p_{\text{Prüf., relativ}}$	Prüf-Medium	Gestein Material	Abbildung
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[bar]	[bar]	[-]	[-]	[-]
B45 (GV2) (L=2,36 m; a=11,5°; d=70 mm)	B45_043_INT_G1	Abschluss-packer	0.43	1.40	2.36	200	8	Gas	D4-Beton	
	B45_043_INT_L1		0.43	1.40	2.36	200	4	Lösung	D4-Beton	
	B45_040_G1	20 cm Prüfraum	0.40	0.50	0.60	200	8	Gas	D4-Beton	
	B45_060_G1		0.60	0.70	0.80	200	8	Gas	D4-Beton	
	B45_080_G1		0.80	0.90	1.00	200	8	Gas	D4-Beton	
	B45_100_G1		1.00	1.10	1.20	200	8	Gas	D4-Beton	
	B45_120_G1		1.20	1.30	1.40	200	8	Gas	D4-Beton	
	B45_140_INT_G1		20 cm Prüfraum	1.40	1.88	2.36	201	8	Gas	

Anlage 3.1.2 Untersuchungsprogramm in der Bohrung B46

Bohrung	Messpunktname	Packer-AG	OK	MP	UK	p_{0i}	$p_{\text{Prüf., relativ}}$	Prüf-Medium	Gestein Material	Abbildung	Besonderheit
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[bar]	[bar]	[-]	[-]	[-]	[-]
B46 (GV2) (L=3,20 m; a=11,5°; d=70 mm)	B46_043_INT_G1	Abschluss-packer	0.43	1.82	3.20	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_043_INT_L1		0.43	1.82	3.20	200	4	Lösung	D4-Beton		
	B46_020_G1	20 cm Prüfraum	0.20	0.30	0.40	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_036_G1		0.40	0.50	0.60	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_056_G1		0.60	0.70	0.80	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_096_G1		0.80	0.90	1.00	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_096_G1		1.00	1.10	1.20	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_116_G1		1.20	1.30	1.40	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_136_G1		1.40	1.50	1.60	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_156_G1		1.60	1.70	1.80	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_176_G1		1.80	1.90	2.00	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_196_G1		2.00	2.10	2.20	200	8	Gas	D4-Beton		
	B46_020_G1		33 cm Prüfraum	2.20	2.30	2.40	200	8	Gas		D4-Beton

Anlage 3.2 Untersuchungsprogramm der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen am GSBV1, GSBV2, GSBV3 und GSBV4

Anlage 3.2.1 Untersuchungsprogramm GSBV1 in der Bohrung B36

Messpunkt-name	Packer-AG	IL	PR	OK	MP	UK	p _{öi}	p _{Prüf, relativ}	Prüf-Medium	Gestein Material
[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]	[bar]	[bar]	[-]	[-]
GSBV1_0270_INT_G1	Abschluss-packer	0,85	Bohrung	0,270	0,695	1,120	200	5	Gas	Spritzbeton
GSBV1_0095_G1	11 cm Prüfraum	0,11	Mitte	0,095	0,150	0,205	200	5		Schicht
GSBV1_0100_G1	11 cm Prüfraum	0,11	Mitte	0,100	0,155	0,210	200	5		Schicht
GSBV1_0235_G1	11 cm Prüfraum	0,11	Mitte	0,235	0,290	0,345	200	5		BAG ²⁹
GSBV1_0295_G1	12 cm Prüfraum	1,11	Mitte	0,295	0,850	1,405	200	5		Schicht/BAG
GSBV1_0365_G1	13 cm Prüfraum	2,11	Mitte	0,365	1,420	2,475	200	5		BAG
GSBV1_0425_G1	11 cm Prüfraum	0,11	Mitte	0,425	0,480	0,535	200	5		Schicht/BAG
GSBV1_0485_G1	11 cm Prüfraum	0,11	Mitte	0,485	0,540	0,595	200	5		BAG
GSBV1_0580_G1	11 cm Prüfraum	0,11	Mitte	0,580	0,635	0,690	200	5		Schicht
GSBV1_0590_G1	11 cm Prüfraum	0,11	Mitte	0,590	0,645	0,700	200	5		Schicht

²⁹ Betonierabschnittsgrenze

Anlage 3.2.2 Untersuchungsprogramm GSBV2

Bohrung	Messpunktname	Packer-AG	IL	PR	OK	MP	UK	p _{öl}	p _{Prüf, relativ}	Prüf-Medium	Gestein Material
[-]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]	[bar]	[bar]	[-]	[-]
Bohrloch 1 (L=0,58 m; a=-90,0°; d=105 mm)	BL_1_0240	2-fach-Packer	0,240	Mitte	0,115	0,235	0,355	200	5	Gas	Spritzbeton
Bohrloch 2 (L=0,58 m; a=-90,0°; d=105 mm)	BL_2_0240	2-fach-Packer	0,240	Mitte	0,115	0,235	0,355	200	5	Gas	Spritzbeton
	BL_2_0080	2-fach-Packer	0,080	Mitte	0,115	0,155	0,195	200	5	Gas	Spritzbeton
Bohrloch 3 (L=0,58 m; a=-90,0°; d=105 mm)	BL_3_0080	2-fach-Packer	0,080	Mitte	0,115	0,155	0,195	200	5	Gas	Spritzbeton
Bohrloch A (L=0,58 m; a=-90,0°; d=70 mm)	BL_A_0080	2-fach-Packer	0,080	Mitte	0,115	0,155	0,195	200	5	Gas	Spritzbeton

Anlage 3.2.3 Untersuchungsprogramm GSBV3 in der Bohrung B36

Messpunkt- name	Packer- AG	IL	PR	OK	MP	UK	p _{0i}	p _{Prüf, relativ}	Prüf- Medium	Gestein Material
[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]	[bar]	[bar]	[-]	[-]
GSBV3_0310_ INT_G1	Abschluss- packer	0,63	Bohrun g	0,310	0,625	0,940	200	5	Gas	Spritz- beton
GSBV3_0085_ G1	2-fach- Packer	0,11	Mitte	0,085	0,140	0,195	200	5	Gas	Spritz- beton
GSBV3_0100_ G1	2-fach- Packer	0,11	Mitte	0,100	0,155	0,210	200	5	Gas	Spritz- beton
GSBV3_0225_ G1	2-fach- Packer	0,11	Mitte	0,225	0,280	0,335	200	5	Gas	Spritz- beton
GSBV3_0315_ G1	2-fach- Packer	0,11	Mitte	0,315	0,370	0,425	200	5	Gas	Spritz- beton
GSBV3_0320_ G1	2-fach- Packer	0,11	Mitte	0,320	0,375	0,430	200	5	Gas	Spritz- beton
GSBV3_0405_ G1	2-fach- Packer	0,11	Mitte	0,405	0,460	0,515	200	5	Gas	Spritz- beton

Anlage 3.2.4 Untersuchungsprogramm GSBV4

Bohrung	Messpunktname	Packer-AG	IL	PR	OK	MP	UK	p _{ö1}	p _{Prüf, relativ}	Prüf-Medium	Gestein Material
[-]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]	[bar]	[bar]	[-]	[-]
B31 (L= 1,3 m; a= 12,0°; d=100 mm)	BL_31_0080_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,080	0,165	0,250	200	5	Gas	Spritzbeton
	BL_31_0250_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,250	0,335	0,420				
	BL_31_0420_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,420	0,505	0,590				
	BL_31_0590_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,590	0,675	0,760				
	BL_31_0350_G1	2-fach-Packer	0,11	Mitte	0,350	0,405	0,460				
	BL_31_0180_G1	2-fach-Packer	0,11	Mitte	0,180	0,235	0,290				
	BL_31_0500_G1	2-fach-Packer	0,11	Mitte	0,500	0,555	0,610				
	BL_31_0600_INT_G1	Abschlusspacker	0,23	Bohrung	0,600	0,715	0,830				
	BL_31_0430_INT_G1	Abschlusspacker	0,4	Bohrung	0,430	0,630	0,830				
B32 (L= 1,3 m; a= 15,0°; d=100 mm)	BL_32_0080_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,080	0,165	0,250	200	5	Gas	Spritzbeton
	BL_32_0250_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,250	0,335	0,420				
	BL_32_0360_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,360	0,445	0,530				
	BL_32_0590_G1	2-fach-Packer	0,17	Mitte	0,590	0,675	0,760				
	BL_32_0350_G1	2-fach-Packer	0,11	Mitte	0,350	0,405	0,460				
	BL_32_0180_G1	2-fach-Packer	0,11	Mitte	0,180	0,235	0,290				
	BL_32_0500_G1	2-fach-Packer	0,11	Mitte	0,500	0,555	0,610				
	BL_32_0600_INT_G1	Abschlusspacker	0,2	Bohrung	0,600	0,700	0,800				
	BL_32_0430_INT_G1	Abschlusspacker	0,37	Bohrung	0,430	0,615	0,800				

Anlage 3.3 Untersuchungsprogramm Laboruntersuchungen

Anlage 3.3.1 Untersuchungsprogramm GSBV1

Proben- bezeichnung	Standort	Teufe Probe		IBeWa-Nr.	Lage zu BAG	Herstellung Probenkörper	Probenart	Durchmesser	Feuchtdichte	Lösungsgehalt	Reindichte	Porosität (μ-CT)	Porosität (Hg)	K _{Gas} , feucht (Manteldruck 1,1 MPa; Fluiddruck 0,6 MPa)	K _{Lösung} (NaCl mit MgCl ₂)	Porosität (Hg) nach K _{Lösung}	Bemerkungen	
		von	bis															
[-]	[-]	[m]		[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[-]	[g/cm ³]	[-]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	
B 35 0,27 - 0,72 m	GSBV-1	ca. 0,3 Randstück P302-7/2		P302-7/1		✓	BS			✓	✓						„kalter“ Betonierabschnitt (29,9cm -54,7cm)	
		0,31	0,41	P302-7/2	⊥	✓	KS	100	✓					✓			„kalter“ Betonierabschnitt	
		ca. 0,6 Randstück P302-7/4		P302-7/3		✓	BS				✓	✓						„heißer“ Betonierabschnitt (54,7cm – 72cm)
		0,55	0,62	P302-7/4	⊥	✓	KS	100	✓						✓			„heißer“ Betonierabschnitt
B 36 0 – 1,05 m	GSBV-1	ca. 0,05 Randstück P302-8/2		P302-8/1		✓	BS	95		✓	✓		✓					
		0,05	0,15	P302-8/2	⊥	✓	KS		✓					✓				
		ca. 0,85 Randstück P302-8/4		P302-8/3		✓	BS	95		✓	✓			✓				
		0,85	0,95	P302-8/4	⊥	✓	KS		✓						✓			

Anlage 3.3.2 Untersuchungsprogramm Laboruntersuchungen GSBV3

Proben- bezeichnung	Standort	Teufe Probe		IBeWa-Nr.	Lage zu BAG	Herstellung Probenkörper	Probenart	Durchmesser Probe	Feuchtdichte	Lösungsgehalt	Reindichte	Porosität (μ -CT)	Porosität (Hg)	k _{Gas, feucht} (Manteldruck 1,1 MPa; Fluiddruck 0,6 MPa)	k _{Lösung (NaCl mit MgCl₂)}	Porosität (Hg) nach k _{Lösung}	Bemerkungen		
		von	bis																
[-]	[-]	[m]		[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[-]	[g/c m ³]	[-]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]			
B36 0 – 0,8 m └ zu BAG	GSBV-3	ca. 0,1 Randstück P302-9/2		P302-9/1		✓	BS			✓	✓		x						
		0,11	0,21	P302-9/2	⊥	✓	KS	95	✓					✓	x				
		ca. 0,6 Randstück P302-9/4		P302-9/3		✓	BS			✓	✓		x						
		0,61	0,71	P302-9/4	⊥	✓	KS	95	✓					✓	x				
		0,46	0,52	P302-9/5			KS	50	✓					✓	✓			Langzeit- versuch✓	
		0,75	0,80	P302-9/6			KS	50	✓					✓	✓			Langzeit- versuch✓	
		Kernscheibe 20mm anstromseiti g von P302- 9/5		P302-9/7			KS	50			60°			x				✓	
		Kernscheibe 20mm anstromseiti g von P302- 9/6		P302-9/8			KS	50			60°			x				✓	

Anlage 3.3.3 Untersuchungsprogramm Labor SBV5A SBV7A

Proben- bezeichnung	Standort	Teufe Probe		IBeWa-Nr.	Lage zu BAG	Probenge- winnung	Probenart	Durchmesser Probe	Feuchtdichte	Lösungsgehalt	Reindichte	Porosität μ -CT	Porosität (Hg)	k _{Gas, feucht} (Manteldruck 1,1 MPa; Fluiddruck	k _{Lösung (NaCl mit MgCl₂)}	Porosität (Hg) nach k _{Lösung}	Bemerkungen
		von	bis														
[-]	[-]	[m]		[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[-]	[g/c m ³]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]		
Bx-o	SBV-5A	-	-	P302-11/1	⊥	✓	KS	100	✓				✓	(x)			
B14- u		-	-	P302-11/2	⊥	✓	KS	100	✓				✓	(x)			
B14- o		-	-	P302-11/3	⊥	✓	KS	100	✓				✓	(x)			
SBV-7A-7	SBV-7A	0,01	0,025	P302-12/1	⊥	✓	BS			✓	✓						
		0,025	0,085	P302-12/2	⊥	✓	KS	50	✓				✓			operativ nachträglich Trocknung 60 °C und nochmals k _G	
		0,16	0,175	P302-12/3	⊥	✓	BS			✓	✓						
		0,175	0,235	P302-12/4	⊥	✓	KS	50	✓				*				
SBV-7A-8	SBV-7A	0,005	0,02	P302-13/1	⊥	✓	BS			✓	✓						
		0,02	0,08	P302-13/2	⊥	✓	KS	50	✓				✓			operativ nachträglich Trocknung 60 °C und nochmals k _G	
		0,165	0,18	P302-13/3	⊥	✓	BS			✓	✓						
		0,18	0,24	P302-13/4	⊥	✓	KS	50	✓								
SBV- 7A-9	SBV-7A			P302-14	⊥		KS										
SBV- 7A- 10				P302-15	⊥		KS										

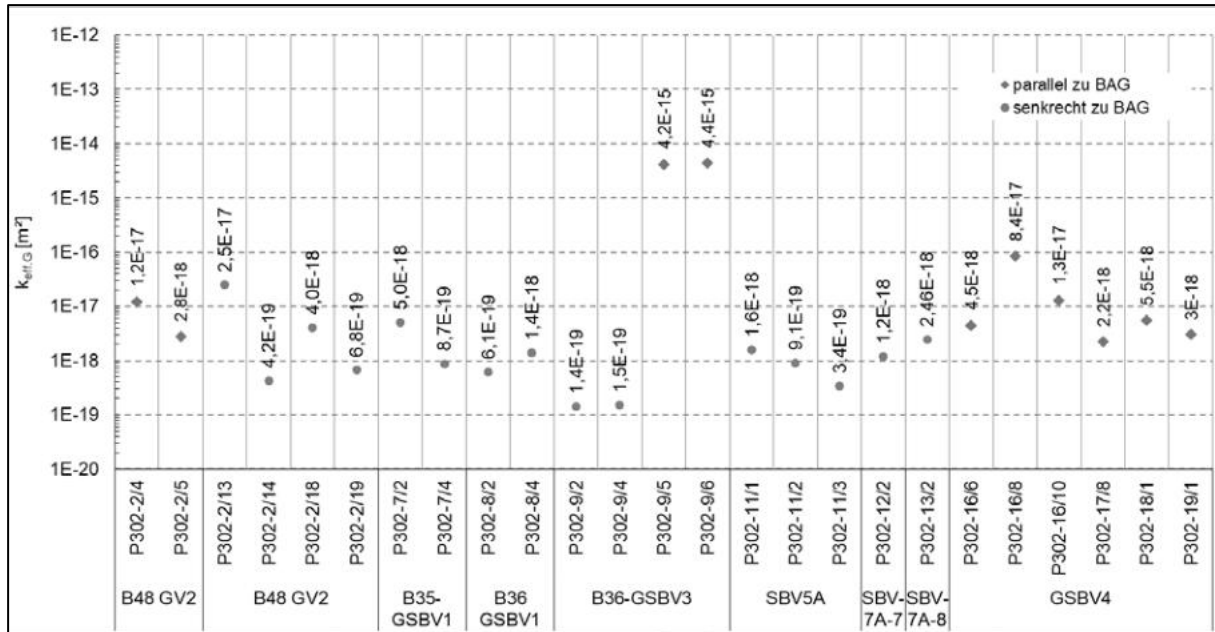
Anlage 3.3.4 Untersuchungsprogramm GSBV4

Proben- bezeichnung	Teufe Probe		IBeWa-Nr.	Lage zu BAG	Probenge- winnung	Probenart	Durchmesser Probe	Feuchtdichte	Lösungsgehalt	Reindichte	Porosität μ -CT	Porosität (Hg)	$k_{\text{Gas, feucht}}$ (Manteldruck 1,1 MPa; Fluiddruck 0,6 MPa)	$k_{\text{Lösung (NaCl mitMgCl}_2\text{)}}$	Porosität (Hg) nach $k_{\text{Lösung}}$	Bemerkungen	
	von	bis															[-]
B31 0 – 0,8 m \perp zu BAG	Randstücke P302-16/2		P302-16/1		✓	BS			✓	✓		✓					
	0,30	0,40	P302-16/2	\perp	✓	KS	95	✓					*				
	Randstücke P302-16/5		P302-16/3		✓	BS			✓	✓		✓					
	0,63	0,73	P302-16/4	\perp	✓	KS	95	✓					*				
	0,53	0,58	P302-16/5		✓	KS	50	✓					Versuch abge- brochen			Probenpräparation aus Schicht 5 „heißer Abschnitt“ T=78 °C) ~48-64 cm	
	0,47	0,52	P302-16/6		✓	KS	50	✓					✓			Probe mit geringer Permeabilität Probenpräparation aus Schicht 5 „heißer Abschnitt“ T=78 °C) ~48-64 cm	
	Kernscheibe 20mm anstromseitig P302-16/6		P302-16/7		x	KS	50										
	0,24	0,29	P302-16/8		✓	KS	50	✓				✓		✓		Langzeitversuch k_{L} -> Übergabe an HZDR μ -CT	
	Zylinder 24mm anstromseitig P302-16/8		P302-16/9		x	KS	24										
	0,32	0,38	P302- 16/10		✓	KS	50						✓			Probe nach k_{gas} zurückgestellt	
Kernscheibe 20 mm anstromseitig von P302- 16/11		P302- 16/11		*													
B32 0 – 0,8 m \perp zu BAG	Randstücke P302-17/2		P302-17/1	v	✓	BS			✓	✓		✓					
	0,10	0,20	P302-17/2	\perp	✓	KS	95	✓					*				
	Randstücke P302-17/5		P302-17/3		✓	BS			✓	✓		✓					
	0,34	0,44	P302-17/4	\perp	✓	KS	95	✓					*				
	0,20	0,25	P302-17/5		✓	KS	50	✓					Versuch abge- brochen			Probenpräparation aus Schicht 2 „heißer Abschnitt“ T=45 °C) ~16-32 cm,	
	0,25	0,30	P302-17/6		✓	KS	50	✓					Versuch abge- brochen			Probenpräparation aus Schicht 2 „heißer Abschnitt“ T=45 °C) ~16-32 cm,	
	0,60	0,65	P302-17/8		✓	KS	50	✓					✓ (1)			Probenpräparation aus Schicht 5 ~60 cm,	
B 1	0,20	0,26	P302-18/1		✓	KS	50					✓ (1)	*-(3)	* (5?)	Prüfbereich abgeleitet aus μ -CT		

Proben- bezeichnung	Teufe Probe		iBeWa-Nr.	Lage zu BAG	Probenge- winnung	Probenart	Durchmesser Probe	Feuchtdichte	Lösungsgehalt	Reindichte	Porosität μ -CT	Porosität (Hg)	$k_{\text{Gas, feucht}}$ (Manteldruck 1,1 MPa; Fluiddruck 0,6	$k_{\text{Lösung (NaCl mit MgCl}_2)}$	Porosität (Hg) nach $k_{\text{Lösung}}$	Bemerkungen
	von	bis														
[-]	[m]		[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[-]	[g/cm ³]	[-]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]
B19 0,43-	??	??	P302-19/1		✓	KS	50						✓			Prüfbereich abgeleitet aus μ CT
			P302-19/2		x	BS			✓ (60 °C)	✓ (60 °C)					?	



Anlage 4 Ergebnisse der Untersuchungen zur Gaspermeabilität an Kernproben


In dem nachfolgenden Diagramm ist die gemessene Gaspermeabilität an den verschiedenen Kernproben zusammengestellt.





Anlage 5 Beschreibung MgO-Lieferware


Anlage 5.1 Datenblätter der MgO-LW von Styromag

 STYROMAG® <i>Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH</i>		 STYROMAG® <i>Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH</i>																																																													
ANALYSENZERTIFIKAT <small>(ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1 nach EN 10204:2004)</small>		Physikalisch:																																																													
KUNDE / EMPFÄNGER : TU Bergakademie Freiberg/ GIS QUALITÄT / CHARGENNR. : G10 / 16 LIEFERDATUM : 03.03.2020		Bindezeit: AA8.6.1.5.* Beginn: 355 min Ende: 390 min Laugenaufnahme (MgCl ₂) 55,0 ml/100g Litergewicht AA8.6.1.6.* 717 g/l Siebanalyse: AA8.6.1.6.* R200 µm 0,2 % R90 µm 18,3 %																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Eigenschaften</th> <th>Prüfung</th> <th>Testmethode</th> <th>Werte</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Chemische:</td> <td>Glühverlust</td> <td>1050°C/1h</td> <td>3,8 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SiO₂</td> <td>AA8.2.1.3. - RFA*</td> <td>3,3 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fe₂O₃</td> <td>AA8.2.1.3. - RFA*</td> <td>2,8 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>CaO gesamt</td> <td>AA8.2.1.3. - RFA*</td> <td>3,3 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>CaO aktiv</td> <td>AA8.6.1.1.*</td> <td>0,6 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>MgO gesamt</td> <td>AA8.6.1.1.*</td> <td>85,8 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Summe Spuren</td> <td>max.</td> <td>1,0 %</td> </tr> <tr> <td>Mineralarten:</td> <td>Talk</td> <td>(aus SiO₂ berechnet)</td> <td>5,0 %</td> </tr> <tr> <td>(rechnerisch)</td> <td>Calcit CaCO₃</td> <td>(aus CaO-CaO_{akt} berechnet)</td> <td>4,8 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Magnesit MgCO₃</td> <td>(aus CaCO₃ und Glv.)</td> <td>3,2 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Magnesioferri MgFe₂O₄</td> <td>(aus Fe₂O₃ berechnet)</td> <td>3,5 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Calciumoxid</td> <td>= CaO aktiv</td> <td>0,6 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Summe Spuren</td> <td>max.</td> <td>1,0 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Periklas MgO</td> <td>rechn.</td> <td>81,9 %</td> </tr> </tbody> </table>		Eigenschaften	Prüfung	Testmethode	Werte	Chemische:	Glühverlust	1050°C/1h	3,8 %		SiO ₂	AA8.2.1.3. - RFA*	3,3 %		Fe ₂ O ₃	AA8.2.1.3. - RFA*	2,8 %		CaO gesamt	AA8.2.1.3. - RFA*	3,3 %		CaO aktiv	AA8.6.1.1.*	0,6 %		MgO gesamt	AA8.6.1.1.*	85,8 %		Summe Spuren	max.	1,0 %	Mineralarten:	Talk	(aus SiO ₂ berechnet)	5,0 %	(rechnerisch)	Calcit CaCO ₃	(aus CaO-CaO _{akt} berechnet)	4,8 %		Magnesit MgCO ₃	(aus CaCO ₃ und Glv.)	3,2 %		Magnesioferri MgFe ₂ O ₄	(aus Fe ₂ O ₃ berechnet)	3,5 %		Calciumoxid	= CaO aktiv	0,6 %		Summe Spuren	max.	1,0 %		Periklas MgO	rechn.	81,9 %	Zusätzliche Bestimmungen: Zitronensäureaktivität AA8.6.1.4.* 200 Sekunden Spez. Oberfläche nach BET AA8.6.1.7.* 19,11 m ² /g	
Eigenschaften	Prüfung	Testmethode	Werte																																																												
Chemische:	Glühverlust	1050°C/1h	3,8 %																																																												
	SiO ₂	AA8.2.1.3. - RFA*	3,3 %																																																												
	Fe ₂ O ₃	AA8.2.1.3. - RFA*	2,8 %																																																												
	CaO gesamt	AA8.2.1.3. - RFA*	3,3 %																																																												
	CaO aktiv	AA8.6.1.1.*	0,6 %																																																												
	MgO gesamt	AA8.6.1.1.*	85,8 %																																																												
	Summe Spuren	max.	1,0 %																																																												
Mineralarten:	Talk	(aus SiO ₂ berechnet)	5,0 %																																																												
(rechnerisch)	Calcit CaCO ₃	(aus CaO-CaO _{akt} berechnet)	4,8 %																																																												
	Magnesit MgCO ₃	(aus CaCO ₃ und Glv.)	3,2 %																																																												
	Magnesioferri MgFe ₂ O ₄	(aus Fe ₂ O ₃ berechnet)	3,5 %																																																												
	Calciumoxid	= CaO aktiv	0,6 %																																																												
	Summe Spuren	max.	1,0 %																																																												
	Periklas MgO	rechn.	81,9 %																																																												
Abnahmeprüfung:		Abnahmeprüfung:																																																													
*..... Interne Prüfverschrift		*..... Interne Prüfverschrift																																																													
Produktionsleiter M. Großmair Qualitätsmanager		Produktionsleiter M. Großmair Qualitätsmanager																																																													
Abnahmeprüfung ist maschinenfallend und ohne Unterschrift gültig		Abnahmeprüfung ist maschinenfallend und ohne Unterschrift gültig																																																													
*..... Interne Prüfverschrift		*..... Interne Prüfverschrift																																																													
Dokumentname / Datum: 20031_GTS_G10_16 an TU Freiberg mit Mineralphasen		Dokumentname / Datum: 20031_GTS_G10_16 an TU Freiberg mit Mineralphasen																																																													
STYROMAG Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH		STYROMAG Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH																																																													
Version: 12. April 2010		Version: 12. April 2010																																																													

 STYROMAG® <i>Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH</i>	
Physikalisch:	Bindezeit: AA8.6.1.5.* Beginn: 265 min Ende: 295 min Laugenaufnahme (MgCl ₂): 56,8 ml/100g AA8.6.1.6.* Litergewicht: 704 g/l AA8.6.1.6.* Siebanalyse: R200 µm 0,4 % R90 µm 21,2 %
Zusätzliche Bestimmungen:	Zitronensäureaktivität: AA8.6.1.4.* 251 Sekunden BET: AA8.6.1.7.* 21,25 m ² /g
D. Mocer Produktionsleiter M. Größmaier Qualitätsmanager Abnahmeprüfzeugnis ist maschinenfallend und ohne Unterschrift gültig *..... Interne Prüfverschrift	
STYROMAG Sprongweitz Steirische Magnesitindustrie GmbH	
Version: 12. April 2010	

 STYROMAG® <i>Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH</i>			
ANALYSENZERTIFIKAT (ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1 nach EN 10204:2004)			
KUNDE / EMPFÄNGER :	GTS		
QUALITÄT / CHARGENNR. :	G10 / 54		
LIEFERDATUM :	19.10.2020		
Eigenschaften	Prüfung	Testmethode	Werte
Chemisch:	Glühverlust	1050°C/1h	3,5 %
	SiO ₂	AA8.2.1.3. - RFA*	2,5 %
	Fe ₂ O ₃	AA8.2.1.3. - RFA*	2,7 %
	CaO	AA8.2.1.3. - RFA*	3,4 %
	CaO aktiv	AA8.6.1.1.*	0,6 %
	MgO gesamt	AA8.6.1.1.*	86,9 %
	Summe Spuren	max.	1,0 %
Mineralarten:	Talk	(aus SiO ₂ berechnet)	3,8 %
(rechnerisch)	Calcit CaCO ₃	(aus CaO-CaO ₂ berechnet)	5,0 %
	Magnesit MgCO ₃	(aus CaCO ₃ und Ghv.)	2,5 %
	Magnesioferrit MgFe ₂ O ₄	(aus Fe ₂ O ₃ berechnet)	3,4 %
	Calciumoxid	= CaO aktiv	0,6 %
	Summe Spuren	max.	1,0 %
	Perklas MgO	reclin.	83,7 %
D. Mocer Produktionsleiter M. Größmaier Qualitätsmanager Abnahmeprüfzeugnis ist maschinenfallend und ohne Unterschrift gültig *..... Interne Prüfverschrift			
STYROMAG Sprongweitz Steirische Magnesitindustrie GmbH			
Version: 12. April 2010			

 STYROMAG® <i>Styromagnesit Steirische Magnesiumindustrie GmbH</i>	
Physikalisch:	Bindezeit: AA8.6.1.5.* Beginn: 330 min Ende: 360 min Laugenaufnahme (MgCl ₂): 62,7 ml/100g Litergewicht: AA8.6.1.6* 796 g/l Siebanalyse: AA8.6.1.6* R200 µm 1,0 % R90 µm 22,8 %
Zusätzliche Bestimmungen:	Zitronensäureaktivität: AA8.6.1.4.* 362 Sekunden BET: AA8.6.1.7.* 13,11 m ² /g
<i>D. Moser</i> Produktionsleiter <i>M. Grieshammer</i> Qualitätsmanager Abnahmeprüfzeugnis ist maschinenfallend und ohne Unterschrift gültig *..... Interne Prüfverschrift	
Dokumentations- / Datenname: 210514 G10_74 an TU Freiberg mit Nebenphasen	
STYROMAG Styromagnesit Steirische Magnesiumindustrie GmbH	
Version: 12. April 2010	

 STYROMAG® <i>Styromagnesit Steirische Magnesiumindustrie GmbH</i>			
ANALYSENZERTIFIKAT (ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3..1 nach EN 10204:2004)			
KUNDE / EMPFÄNGER :	TU FREIBERG		
QUALITÄT / CHARGENNR. :	G10 / 74		
LIEFERDATUM :	14.09.2021		
Eigenschaften	Prüfung	Testmethode	Werte
Chemisch:	Glühverlust	1050°C/1h	2,5 %
	SiO ₂	AA8.2.1.3. - RFA *	2,9 %
	Fe ₂ O ₃	AA8.2.1.3. - RFA *	2,8 %
	CaO	AA8.2.1.3. - RFA *	3,1 %
	CaO aktiv	AA8.6.1.1.*	0,9 %
	MgO gesamt	AA8.6.1.1.*	87,7 %
	Summe Spuren	max.	1,0 %
Mineralarten:	Talk	(aus SiO ₂ berechnet)	4,4 %
(rechnerisch)	Calcit CaCO ₃	(aus CaO-CaO _{an} berechnet)	5,5 %
	Magnesit MgCO ₃	(aus CaCO ₃ und Glv.)	0,2 %
	Magnesioferrit MgFe ₂ O ₄	(aus Fe ₂ O ₃ berechnet)	3,2 %
	Calciumoxid	= CaO aktiv	0,9 %
	Summe Spuren	max.	1,0 %
	Periklas MgO	reclin.	84,8 %
<i>D. Moser</i> Produktionsleiter <i>M. Grieshammer</i> Qualitätsmanager Abnahmeprüfzeugnis ist maschinenfallend und ohne Unterschrift gültig *..... Interne Prüfverschrift			
Dokumentations- / Datenname: 210514 G10_74 an TU Freiberg mit Nebenphasen			
STYROMAG Styromagnesit Steirische Magnesiumindustrie GmbH			
Version: 12. April 2010			

Anlage 5.2 Pulverdiffraktogramme der MgO-LW:

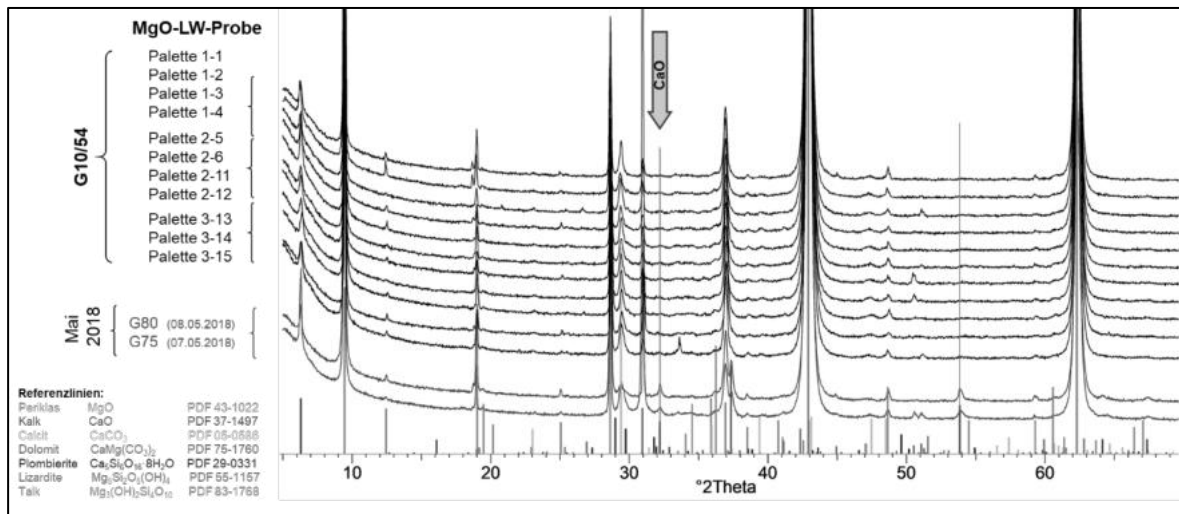


Abbildung 297: Vergleich der Pulverdiffraktogramme der MgO-LW-Proben der Charge G10/54 (Styromag) mit den MgO-LW-Proben G75 und G80 mit erhöhtem CaO-Gehalt (FuE-Projekt MgO-SEAL) (blaue Diffraktogramme).

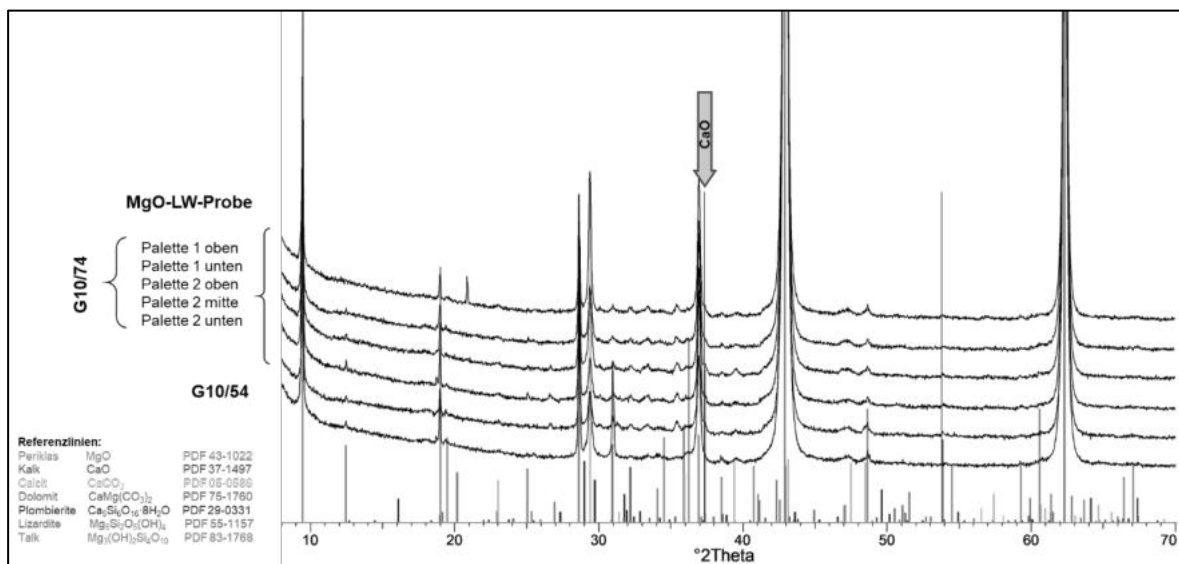
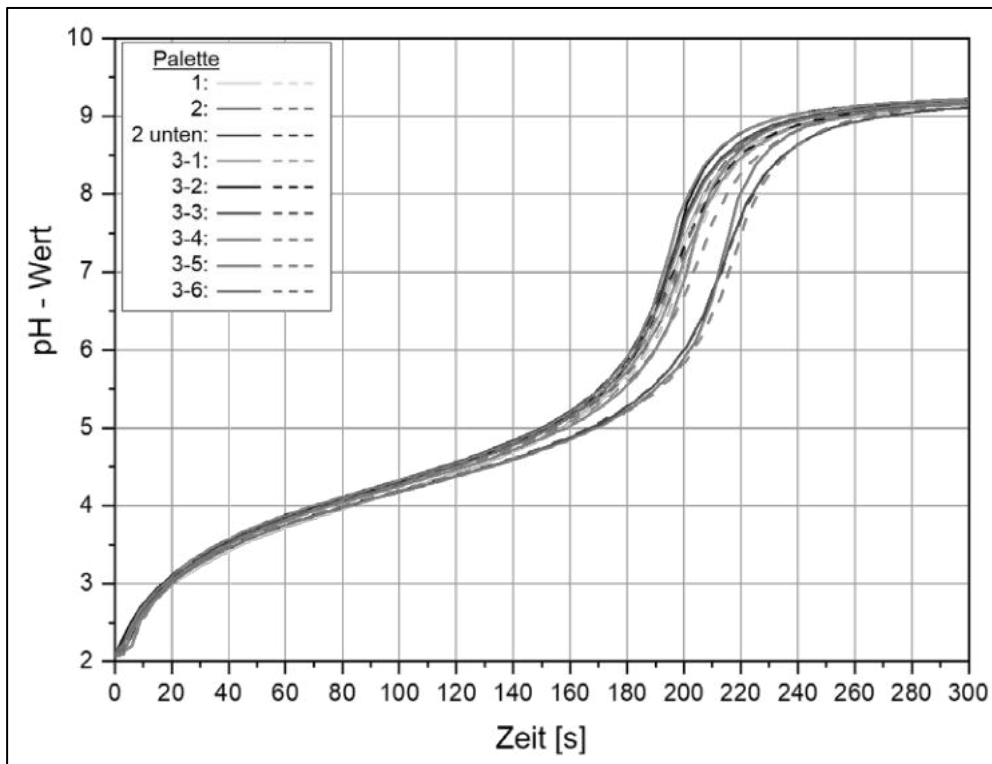
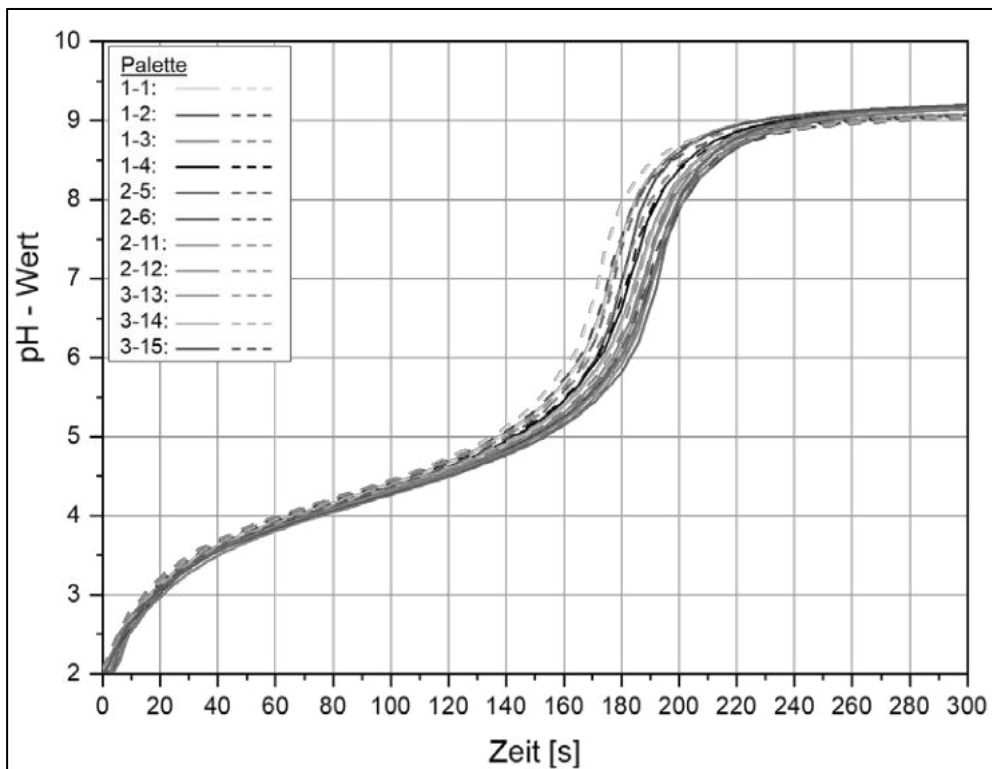


Abbildung 298: Vergleich der Pulverdiffraktogramme der MgO-LW-Proben der Charge G10/74.

Anlage 5.3 Messwertkurven zur MgO-LW-Reaktivitätsbestimmung (ZTW):**Abbildung 299: Zitronensäuretest der MgO-LW-Proben der Charge G10/16.****Abbildung 300: Zitronensäuretest der MgO-LW-Proben der Charge G10/54.**

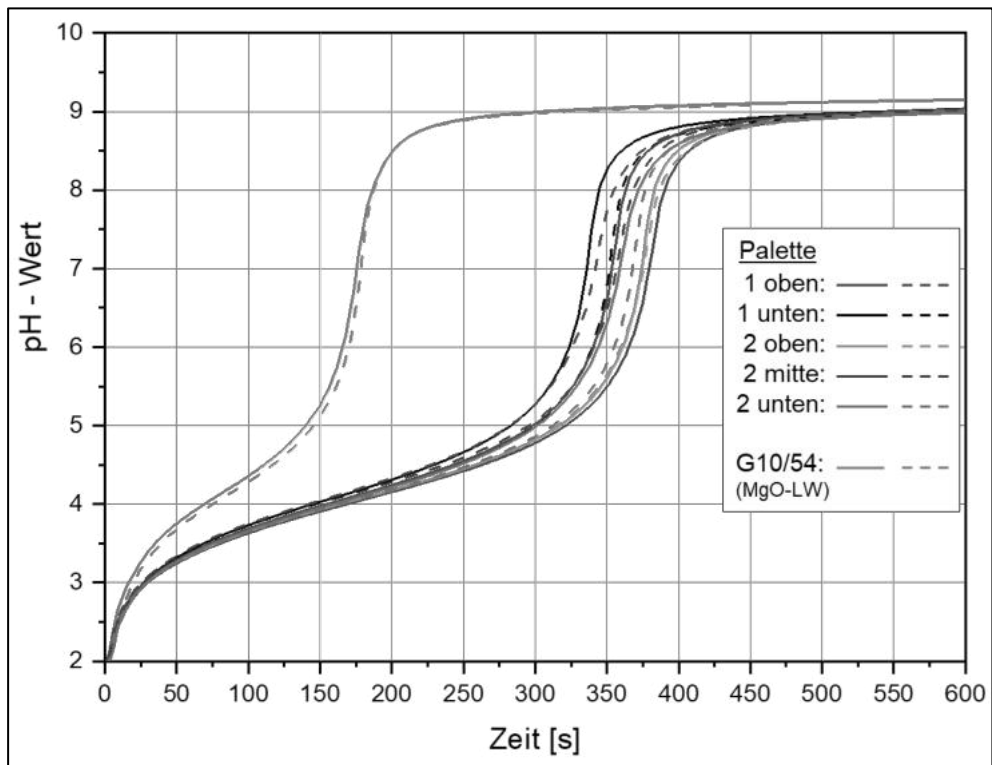


Abbildung 301: Zitronensäuretest der MgO-LW-Proben der Charge G10/74 (mit Vgl. zu G10/54).

Anlage 6 Sichtbare Fehlstellen in den Kernmarschen der Bohrungen B33, B34 und B35 aus dem GSBV4

Fehlstellen am Bohrkern B33

Nr. der Fehlstelle	Kernstück	Einstufung nach Erscheinungsbild der Fehlstelle A- sehr groß, B- mittelgroß, C- klein	Position der Fehlstelle - Tiefe im Betonkörper [cm]	Länge der Fehlstelle [cm]	Weite der Fehlstelle [mm]	Öffnungsgrad des Spaltes
26	B33-4	C	94...95	1	1	offen
25	B33-3	A	76...78	1	-	Loch
24	B33-2	C	63	2,5	-	kleine Löcher
23	B33-2	C	59	1	1	offen
22	B33-2	C	56	1	1	offen
21	B33-2	C	51	4	-	kleine Löcher
20	B33-2	C	46	2	<1	gering geöffnet
19	B33-2	C	48	1,5	1	gering geöffnet
18	B33-2	C	48...49	1	1	offen
17	B33-1	C	40	2	1	gering geöffnet
14	B33-1	C	35	1,5	4	Loch
13	B33-1	B	35...36	5	2	offen
12	B33-1	C	34	2	<1	gering geöffnet
15	B33-1	C	32...33	1	3	Loch
16	B33-1	C	32	2	-	kleine Löcher
11	B33-1	C	30	2	2	offen
10	B33-1	A	27	6	1	offen
9	B33-1	C	26	2	<1	gering geöffnet
8	B33-1	C	23...24	1,5	5	Loch
7	B33-1	C-B	24	3	1	offen
6	B33-1	B	21...22	4	1	offen
5	B33-1	C	14	1,5	1	offen
4	B33-1	C-B	10	3	1	gering geöffnet
3	B33-1	C	9	1	4	Loch
2	B33-1	C	8	1	1	gering geöffnet
1	B33-1	C	8	2	<1	gering geöffnet

Fehlstellen am Bohrkern B34

Nr. der Fehl- stelle	Kern- stück	Einstufung nach Erscheinungs- bild der Fehlstelle A- sehr groß, B- mittelgroß, C- klein	Position der Fehlstelle - Tiefe im Betonkörper [cm]	Länge der Fehlstelle [cm]	Weite der Fehlstelle [mm]	Öffnungsgrad des Spaltes
26	B34-4	C	86	2	<1	offen
25	B34-3	C	85	2	<1	gering geöffnet
24	B34-3	C	85	2	<1	gering geöffnet
23	B34-3	C	83	2	2	gering geöffnet
22	B34-3	B	75	5	1	offen
21	B34-3	C	75	2	2	offen
20	B34-3	C	67	3	<1	offen
19	B34-2	C	59	2	<1	offen
18	B34-2	C	56	2	<1	offen
17	B34-2	C	55	1	1	offen
16	B34-2	C	50	2	3	Loch
15	B34-1	C	37	1,5	2	offen
14	B34-1	C	32	3	1	offen
13	B34-1	C	28,5	2,5	1	offen
12	B34-1	C	27	3	3	gering geöffnet
11	B34-1	C	23	3	<1	gering geöffnet
10	B34-1	B	21	3	3	offen
9	B34-1	C	20	3	1	offen
8	B34-1	C	15...16	3,5	<1	gering geöffnet
7	B34-1	C	13	2	<1	gering geöffnet
6	B34-1	C	9	3	1	offen
5	B34-1	C	8	1,5	1	offen
4	B34-1	C zusammen	8	1,5	1	offen
3	B34-1	B	8	2	-	Loch
2	B34-1	A = A	6...7	3,5	2	offen
1	B34-1	A	6...8	4	2	offen

Fehlstellen am Bohrkern B35

Kernstück:	Nr. der Fehlstelle	Kernstück	Einstufung A- sehr groß, B- mittelgroß, C- klein	Position der Fehlstelle - Tiefe im Betonkörper [cm]	Länge der Fehlstelle [cm]	Weite der Fehlstelle [mm]	Öffnungsgrad des Spaltes
B35-4	29	B35-4	C	98,5	1	1	offen
	28	B35-4	C	93	1	<1	gering geöffnet
	27	B35-4	C	92	2	<1	gering geöffnet
	26	B35-4	C	92	1,5	<1	gering geöffnet
B35-3	25	B35-4	C	92	3,5	1	offen
	24	B35-4	C	90	5	1	gering geöffnet
	23	B35-4	C	87	1,5	<1	gering geöffnet
	22	B35-4	C	85,5	2	1	offen
	21	B35-4	C	84	3	1	offen
	20	B35-4	C	80,5	2	1	gering geöffnet
	19	B35-4	C	77	1,5	1	offen
	18	B35-4	C	76,5	2,5	<1	gering geöffnet
	17	B35-4	C	76,5	1,5	1	gering geöffnet
	16	B35-4	C	73	1	1	offen
B35-2	15	B35-3	C	67	3	1	mehrere Löcher
	14	B35-3	C	52	1	1	offen
B35-1	13*	Bruchfl.*	B	55,5	4,5	1	offen
	12	B35-2	C	55	2	1	offen
	11	B35-2	C	49	1	2	Loch
	10	B35-2	C	42	1	1	offen
	9	B35-2	B	41,5	4	1	offen
	8	B35-2	B	34	1	1	offen
	7	B35-1	B	31	6	4	gering geöffnet
	6	B35-1	C	31	2	<1	gering geöffnet
Kernstück:	5	B35-1	C	29	2	<1	gering geöffnet
	4	B35-1	C	23	2,5	4	geschlossen
	3	B35-1	C	5	7	1	gering geöffnet
	2	B35-1	B	6	4	2	offen
	1	B35-1	C	4	3	2	mehrere Löcher

*) Fehlstelle an Bruchfläche zwischen Kernstück 2 und 3. Die Fehlstelle ist im Video der Kamerabefahrung sichtbar.