



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau  
Institut für Anorganische Chemie



BGE TECHNOLOGY GmbH

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.3

für das Verbundvorhaben

### Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA - Phase 2):

### Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen

**Technische Universität Bergakademie  
Freiberg**

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau  
Gustav-Zeuner-Str. 1a  
D-09596 Freiberg

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla

**BGE TECHNOLOGY GmbH**

Eschenstraße 55  
D-31224 Peine

Projektleiter: Philipp Herold

Dieser Teilbericht ergänzt und vervollständigt die Ausführungen des Zusammenfassenden Abschlussberichts für das Vorhaben ELSA - Phase 2.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02E11193A/B gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

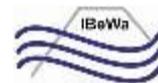
Freiberg - März 2021

Unter der Mitarbeit der folgenden FuE-Auftragnehmer:

Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig (IfG)



Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik,  
Wilsnack & Partner, Freiberg (IBeWa)



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM)



TS Bau GmbH, Niederlassung Jena  
Geschäftsbereich Bergbau



Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und  
Sicherungsgesellschaft mbH



GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH  
& Co. KG



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>INHALTSVERZEICHNIS.....</b>	<b>3</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>4</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>6</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>7</b>
<b>VERZEICHNIS DER AUSFÜHRLICHEN TEILBERICHTE .....</b>	<b>8</b>
<b>1 VORBEMERKUNGEN.....</b>	<b>9</b>
1.1 ARBEITSSCHRITTE UND BETEILIGTE PERSONEN.....	9
1.2 VORBEMERKUNG ZU EINIGEN BODENMECHANISCHEN PARAMETERN.....	10
<b>2 ELEMENTE AUS MGO-BETON MIT DER 3-1-8-BINDEMITTELPHASE IN ORTBETONBAUWEISE (AP 4.3) .....</b>	<b>12</b>
2.1 GROßBOHRLOCHVERSUCH 1 .....	12
2.1.1 Einleitung.....	12
2.1.2 Versuchsbeschreibung .....	12
2.1.3 Messergebnisse .....	15
2.1.4 Rückbau und Nachuntersuchungen .....	20
2.2 GROßBOHRLOCHVERSUCH 2 .....	21
2.2.1 Einleitung.....	21
2.2.2 Einbau des Versuchs .....	22
2.2.3 Messergebnisse nach der Betonage .....	28
2.2.4 Druckbeaufschlagung der Druckkammer und Nachuntersuchungen .....	33
2.3 ZUSAMMENFASSENDE WERTUNG ZUM ARBEITSSCHRITT 4.3.....	37
<b>3 VEGÜTUNG DURCH INJEKTIONEN (AP 4.4) .....</b>	<b>38</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>39</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Kontur des zylindrischen Hohlraumes mit der Vorbereitung der Kontur für die Plattendruckgeber.....	13
Abbildung 2: Versuchshohlraum mit den ersten eingebauten Plattendruckgeber und einem Betondehnungsgeber .....	13
Abbildung 3: Stand nach Einbau der Messgeber .....	13
Abbildung 4: Stand nach Beginn der Betonage .....	13
Abbildung 5: Tatsächliche Anordnung aller im MgO-Beton eingebauter Sensoren.....	14
Abbildung 6: Konsistenz des MgO-Betons C3 bei der Betonage.....	15
Abbildung 7: Betonagearbeiten .....	15
Abbildung 8: Temperaturanzeige aller Messgeber in den ersten Tagen .....	16
Abbildung 9: Temperaturverlauf bis zum Ende der Abkühlphase .....	17
Abbildung 10: Gemessene spezifische Dehnungen im MgO-Beton .....	18
Abbildung 11: Gemessener Druck und gemessene Temperatur (TB-Si) im MgO-Beton – BS2 und BS3 als Kontaktdruck, BS1 und BS4 als axialer Druck.....	18
Abbildung 12: Gemessener Druck und Temperaturen (TB-Si) im MgO-Beton in den ersten 14 Tagen – BS2 und BS3 als Kontaktdrücke, BS1 und BS4 als axialer Druck .....	19
Abbildung 13: Etappen des Rückbaus des Bohrlochversuches mit MgO-Beton .....	20
Abbildung 14: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Permeabilitätsmessung in der Kontur zum Gebirge mit dem Kontaktdruckverlauf .....	21
Abbildung 15: Lage der per Bohrlochkamera aufgezeichneten Anhydritlagen (links) und schematischer Aufbau des Großbohrloches mit Druckkammerbohrung (rechts).....	22
Abbildung 16: Aufbau des zweiten Großbohrlochversuches mit der Instrumentierung .....	23
Abbildung 17: Druckkammer und Kontrollkammer beim zweiten Großbohrlochversuch.....	24
Abbildung 18: Loch-an-Loch-Bohren.....	25
Abbildung 19: Bohrkern Großbohrloch.....	25
Abbildung 20: Austrittspunkt Schrägbohrung .....	25
Abbildung 21: Ansatzpunkt Schrägbohrung .....	25
Abbildung 22: Einbringen MgO-Beton C3 .....	27
Abbildung 23: Ende der Betonage .....	27
Abbildung 24: Temperatur an allen Messgebern in den ersten Stunden der Betonage .....	28
Abbildung 25: Temperaturverlauf im zweiten Großbohrlochversuch .....	29
Abbildung 26: Gemessene spezifische Dehnungen im MgO-Beton .....	30
Abbildung 27: Vergleich der abgeschätzten Verformung an der Bauwerksoberfläche, berechnet aus den axialen Dehnungen der Betondehnungsaufnehmer (Schwingsaitenaufnehmer) und gemessen mit dem Extensometer I-1 im Mittelpunkt der Luftseite.....	31
Abbildung 28: Gemessener Druck und Temperatur (T-Si) im MgO-Beton – S2 und S4 als Kontaktdruck, S1 und S3 als axialer Druck .....	32
Abbildung 29: Flutung der Druckkammer in 3 Schritten.....	33
Abbildung 30: Ganglinien Lösungsdruck (schwarz)+ Gasdruck (rot) für Druckbeaufschlagung, Volumenstrom (blau) .....	34
Abbildung 31: Ganglinien Volumenstrom (blau) und aufsummiertes Lösungsvolumen (rot).....	34

---

Abbildung 32: Ganglinien abgeschätzte strömungstechnisch wirksame Bauwerkslänge (delta LC3), Lösungsdruck (pL) und Bauwerkspermeabilität (kL,C3).....	35
Abbildung 33: Lösungspermeabilität (kL) und Ganglinie der strömungstechnisch wirksamen Bauwerkslänge (delta LC3), Beschriftung der Lösungspermeabilität mit dem wirkenden Lösungsdruck (pL).....	35
Abbildung 34: In situ ermittelte Gaspermeabilität im Bauwerk in Abhängigkeit von der Bohrungsteufe .....	36

---

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Rezepturanpassung bei der Betonage .....	15
Tabelle 2: Eingesetzte Modifikationen der C3-Rezeptur in den Betonageabschnitten .....	26
Tabelle 3: Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5:2009-08 im oberen Betonierabschnitt .....	27

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AP	Arbeitspaket, Arbeitspunkt
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
C3	Bezeichnung der Rezeptur eines MgO-Betons, in dem die 3-1-8-Bindemittelphase vorliegt
ELSA	Akronym für " <u>E</u> ndlager- <u>S</u> ch <u>a</u> chtverschlüsse"
FKZ	Förderkennzeichen (im vorliegenden Fall Projektnummer eines vom BMWi geförderten FuE-Vorhabens)
FuE	Forschung und Entwicklung
GBLV 1	Großbohrlochversuch 1, erster in-situ-Versuch zur Untersuchung eines Magnesiabaustoffs der Rezeptur C3
GBLV 2	Großbohrlochversuch 1, zweiter in-situ-Versuch zur Untersuchung eines Magnesiabaustoffs der Rezeptur C3
h	Höhe, Entfernung
IfBuS	Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg
IfAC	Institut für Anorganische Chemie, TU Bergakademie Freiberg
Ma%	Masse %
TU BAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg
TZF	Temperatur-Zeit-Fenster
ZT	Zitronensäuretest (Verfahren zur Bestimmung der Reaktivität von MgO)
ZTW	Zitronensäuretestwert

## VERZEICHNIS DER AUSFÜHRLICHEN TEILBERICHTE

Die Ergebnisse des Vorhabens "ELSA – Phase 2" sind in folgenden Teilberichten dokumentiert:

Teilbericht zum Arbeitspaket 1:	Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein
Teilbericht zum Arbeitspaket 3:	Ergebnisse der Laborversuche
Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.1:	Halbtechnischer Feldversuch zu Füllsäulen aus verdichtetem Steinsalz
<b>Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.3:</b>	<b>Halbtechnische Versuche zu Elementen aus MgO-Beton mit der 3-1-8-Bindemittelphase in Ortbetonbauweise</b>
Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5:	Halbtechnische Versuche zur Weiterentwicklung von Asphalt dichtungen
Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.6:	Halbtechnische Untersuchungen zum Bentonitdichtelement im Tongestein
Teilbericht zum Arbeitspaket 5:	Modellierung

Der vorliegende Teilbericht behandelt ausführlich die in den Arbeitsschritten 4.3 bis 4.4 des Arbeitspakets 4 *Halbtechnische Versuche* erarbeiteten Ergebnisse. Der Bericht ergänzt den Abschnitt 4.3 des *Zusammenfassenden Abschlussberichts*. Die TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau war in diesem Arbeitspaket federführend.

Der AP 3 bildet die Grundlage für die halbtechnischen Versuche im AP 4. Die Ergebnisse zum AP 4 werden in den jeweiligen Teilberichten erläutert. Auf einen gesonderten Teilbericht zum Arbeitspaket 2: „Planung für halbtechnische Versuche in situ“ wurde verzichtet. Wichtige Informationen aus dem AP 2 werden in den Teilberichten zum AP 4 beschrieben. Die Teilberichte zum AP 1 und zum AP 5 wurden federführend von der BGE TECHNOLOGY GmbH erstellt.

# 1 VORBEMERKUNGEN

## 1.1 Arbeitsschritte und beteiligte Personen

Im Teilbericht werden folgende Arbeitsschritte erläutert:

- Arbeitsschritt 4.3: Halbtechnische Versuche zu Elementen aus MgO-Beton mit der 3-1-8-Bindemittelphase in Ortbetonbauweise,
- Zum Arbeitsschritt 4.4 Vergütung durch Injektionen wurden keine Arbeiten im Rahmen des AP 4 durchgeführt.

An der Bearbeitung des Vorhabens und der Erstellung der Berichte waren folgende Personen beteiligt:

BGE TECHNOLOGY GmbH  
(vormals DBE TECHNOLOGY GmbH)

Michael Jobmann  
Philipp Herold  
Dr. Christian Müller  
Paola Rocio Leon Vargas

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der  
TU Bergakademie Freiberg

Prof. Dr. Wolfram Kudla  
Dr. Uwe Glaubach (bis Mai 2016)  
Dr. Matthias Gruner  
Martin Hofmann  
Jan Aurich (seit Oktober 2016)  
Volker Beyer (seit November 2016)

Institut für Anorganische Chemie der  
TU Bergakademie Freiberg

Dr. Daniela Freyer  
Dr. Melanie Pannach  
Dr. Iris Paschke  
Regina Moßig

Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig (IfG)

Dr. Klaus Salzer  
Dr. Till Popp  
Christopher Rölke  
Michael Wiedemann

Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser  
und Deponietechnik,  
Wilsnack & Partner, Freiberg (IBeWa)

Dr. Thomas Wilsnack  
Dr. Friedemann Grafe (bis Juni 2019)  
Dr. Uwe Glaubach (seit Juni 2016)  
Thomas Viertel  
Constance Schrickel  
Anke Schieweg

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM)

Dr. Katja Emmerich  
Dr. Rainer Schuhmann  
Franz Königer

TS Bau GmbH, Niederlassung Jena  
Geschäftsbereich Bergbau

Olaf Einicke  
Jürgen Schrade  
Toni Schmidt

Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH	Thomas Kießling Christian Baum Jens Sturm
--	---

GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG	Erik Fillinger Jens Biegler
---	--------------------------------

Weiterhin haben an einzelnen Maßnahmen mitgewirkt:

TERRA-MIX Bodenstabilisierungs GmbH	Martin Müller
-------------------------------------	---------------

IBU-tec advanced materials AG	Dr. Steffen Römhild
-------------------------------	---------------------

Stephan Schmidt Meißen GmbH	Thomas Wolf
-----------------------------	-------------

TU Bergakademie Freiberg im Rahmen studentischer Arbeiten	Robin Schulze Steve Lindner Robin Hoffmann Bastian Matzke Phillip Knabe
--	---

## 1.2 Vorbemerkung zu einigen bodenmechanischen Parametern

Das vorliegende FuE-Vorhaben ist eine interdisziplinäre Aufgabe, bei der Wissenschaftler unterschiedlicher Ingenieurdisziplinen zusammenarbeiten. Hierbei müssen einerseits die speziellen Begriffe und Normen zu den jeweiligen Materialien in der jeweiligen Ingenieurdisziplin berücksichtigt werden. Andererseits muss auf Widersprüche oder unterschiedliche Definitionen geachtet werden. In diesem Bericht wird versucht, den gleichen physikalischen Sachverhalt durch einen einzigen übergeordneten Begriff zu beschreiben, auch wenn der gleiche Sachverhalt in den verschiedenen Fachdisziplinen unterschiedlich definiert ist.

Bei DIN- oder EN-Normen wird auf den Gültigkeitsbereich geachtet und dieser nicht auf andere Materialien übertragen, wenn dies zu unterschiedlichen Betrachtungsweisen führt.

Der Wassergehalt wird einheitlich nach DIN EN ISO 17892-1 definiert:

$$w = \frac{m_w}{m_{tr}} \cdot 100 \quad \text{Formel 1}$$

$m_w$  Masse des bei einer Temperatur von 105 °C (Trocknung bis Massekonstanz) verdampften Wassers (Differenz aus der Masse vor und nach der Trocknung) [g], [kg]

$m_{tr}$  Masse des getrockneten Rückstandes [g], [kg]

Bei Bentonit werden auch abweichende Trocknungstemperaturen verwendet, jedoch der Wassergehalt nach Formel 1 berechnet.

Der für Beton oder andere Baustoffe verwendete Begriff "Feuchtegehalt" wird nicht verwendet, auch nicht für MgO-Beton. Der Begriff "Feuchtemessung" wird, wenn es notwendig ist, beibehalten, weil er in der Technik umgangssprachlich bekannt ist. Es wird jedoch nicht bei jeder Feuchtemessung oder Feuchtedetektion der Wassergehalt bestimmt.

Der in der Bodenmechanik übliche Parameter "Porenanteil" wird als ein für alle Materialien in der Modellierung verwendeter Parameter einheitlich und übergeordnet als Porosität bezeichnet. Sie ist übereinstimmend wie folgt definiert:

$$n = \frac{V_p}{V_0} \cdot 100 = 1 - \frac{\rho_{tr}}{\rho_0} \cdot 100$$

Formel 2

n	Porosität	[%]
$V_p$	Porenvolumen	[m <sup>3</sup> ], [cm <sup>3</sup> ]
$V_0$	Gesamtvolumen	[m <sup>3</sup> ], [cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{tr}$	Trockendichte des Materials	[kg/m <sup>3</sup> ], [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	Korndichte des Materials	[kg/m <sup>3</sup> ], [g/cm <sup>3</sup> ]

Bei Asphalt ist der Begriff Hohlraumgehalt üblich. Es ist aber de facto eine Porosität.

Die Korndichte ist die Dichte des trockenen Partikels (Kornes).

Wenn als Porenvolumen nur die mit Luft gefüllten Poren betrachtet werden, wird die so errechnete Porosität als luftegefüllte Porosität bezeichnet.

Die Begriffe "Dichtheit" oder "dicht" werden nach Möglichkeit vermieden und nur dort verwendet, wenn sie Bezug zu einem Kriterium (Dichtheitskriterium – siehe [Kudla et al. 2013]) haben.

## **2 ELEMENTE AUS MGO-BETON MIT DER 3-1-8-BINDEMITELPHASE IN ORTBETONBAUWEISE (AP 4.3)**

### **2.1 Großbohrlochversuch 1**

#### **2.1.1 Einleitung**

Im Rahmen des Vorhabens 02E10880 wurde ein langzeitstabiler MgO-Baustoff mit der 3-1-8-Bindemittelphase entwickelt [Freyer et al. 2015]. Neben der chemischen Langzeitbeständigkeit gegen  $MgCl_2$ -haltige Lösungen standen das Expansionsverhalten und das zeitabhängige Verformungsverhalten (Relaxationsverhalten) dieses Baustoffes im Focus der Untersuchungen.

Im Zuge des Forschungsvorhabens ELSA II wurde im Jahr 2014 ein erster halbtechnischer in-situ-Versuch in der Grube Sondershausen durchgeführt. Dabei wurde in einem zylindrischen Hohlraum mit einer Länge von  $L = 2$  m und einem Durchmesser von  $D = 1$  m ein MgO-Betonkörper der Rezeptur C3 (3-1-8-Bindemittelphase) hergestellt.

Zu den Zielen des Versuchs zählten:

- Messung der Temperatur während der Abbindereaktion an der Kontur zum Gebirge und im Kern,
- Messung des Kontaktdrucks zum Gebirge bei gleichzeitiger Messung der Dehnung im Beton,
- Messung der Feuchte im MgO-Beton,
- Messung des Expansionsdrucks und der Dehnung im MgO-Beton.

Weiterhin wurde untersucht:

- Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des MgO-Betons (Bohrkerne),
- Die Permeabilität des MgO-Betons (Labormessungen an Bohrkernen und in-situ-Messungen in Bohrlöchern),
- Die Permeabilität der Kontaktzone (in-situ-Messungen in Bohrlöchern) sowie
- Die Haftfestigkeit zwischen Gebirge und MgO-Beton (Bohrkerne).

#### **2.1.2 Versuchsbeschreibung**

##### **2.1.2.1 Erstellung des Hohlraumes**

Der zylindrische Hohlraum (geplante Abmessungen  $L = 2$  m,  $D = 1$  m) wurde in der Sohle des Versuchsortes 2 am geplanten Ansatzpunkt durch Loch-an-Loch-Bohren hergestellt.

Dazu wurde zunächst die Sohle in dem Bereich des zu erstellenden Hohlraumes begradigt. Im Anschluss daran wurde eine Schablone in der Sohle verankert. An die Schablone wurde eine druckluftbetriebene Kernbohrmaschine befestigt. Mit der Kernbohrmaschine wurden Bohrungen mit einem Durchmesser von 100 mm auf eine Länge von 2,0 m, bzw. leicht übermäßig, gestoßen. Nachdem alle Bohrungen gestoßen waren, wurde der innere Kern mit 1 m Durchmesser gebrochen. Im Kern wurde ein Lasthaken mit einem Spreizhülsenanker eingebaut und der Kern mit einem Radlader herausgehoben. Nach dem Herausheben des Kerns wurde die Bohrlochsohle nachgearbeitet und begradigt sowie die Kanten der Mantelfläche so nachbearbeitet, dass sie fest sind.

Der tatsächliche (gemittelte) Durchmesser des zylindrischen Hohlraumes betrug 1,1 m, was einem mittleren Querschnitt von  $0,95$  m<sup>2</sup> entspricht. Die gemittelte Tiefe betrug 209,6 cm.

### 2.1.2.2 Einbau der Sensoren

Der Einbau der Messensoren war aufgrund der beengten Bedingungen sehr aufwendig und benötigte zwei Wochen. Ein sehr hoher Schwierigkeitsgrad ergab sich aus der Vielzahl unterschiedlicher Messsensoren, die passgenau an den vorgegebenen Positionen eingebaut wurden und aus den Anschlusskabeln, die nach oben herausgeführt wurden. Weiterhin wurde abgesichert, dass während der Betonage keine Lageänderung der Messsensoren eintrat.

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen den Zustand der Kontur des zylindrischen Hohlraumes zu Beginn des Einbaus der Messgeber. Für die an der Kontur befindlichen Plattendruckgeber (Messung des Kontaktdruckes) wurde die Konturfläche so vorbereitet, dass der Plattendruckgeber an der Gebirgskontur gebettet bzw. angekoppelt ist. Die abgehenden Kabel wurden so nach oben herausgeführt, dass sie andere Messgeber oder die Betonage nicht beeinflussen.

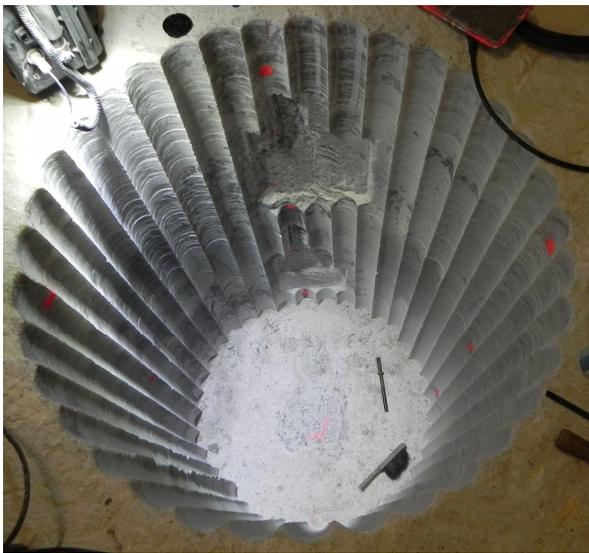


Abbildung 1: Kontur des zylindrischen Hohlraumes mit der Vorbereitung der Kontur für die Plattendruckgeber



Abbildung 2: Versuchshohlraum mit den ersten eingebauten Plattendruckgeber und einem Betondehnungsgeber

Die im inneren des MgO-Betons befindlichen Messgeber wurden durch Hilfsmittel so befestigt, dass sie auch während der Betonage lagestabil (siehe Abbildung 2 bis Abbildung 4) blieben.

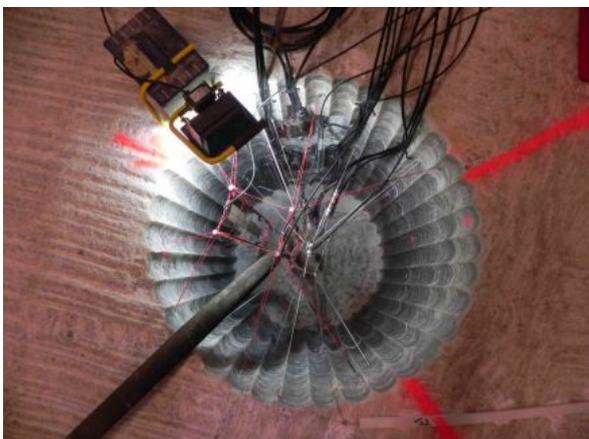


Abbildung 3: Stand nach Einbau der Messgeber



Abbildung 4: Stand nach Beginn der Betonage

Im Bauwerk wurden folgende Sensoren verbaut (siehe Abbildung 16):

- 6 Thermoelemente (T1 bis T6)
- 4 Plattendruckgeber (S1 bis S4, inkl. Temperaturmessung T-S1 bis T-S4)
- 4 Betondehnungsgeber (D1 bis D6, inkl. Temperaturmessung T-D5 und T-D6)
- 1 TDR-Feuchtigkeitssensor

Die Thermoelemente sind ein Eigenbau der TU BAF. Die Plattendruckgeber (Betonspannungsgeber) sowie die Betondehnungsgeber (Schwingsaitendehnungsaufnehmer) wurden von der Firma Glötzl bezogen. Der TDR-Sensor wurde vom KIT-CMM bereitgestellt.

Nach Abschluss des Einbaus wurden alle Messsensoren mit den entsprechenden Datenerfassungssystemen verbunden. Die Messwerterfassung erfolgte über drei Datenströme (TDR-Kabelsensoren zur Feuchterfassung, Plattendruckgeber und Dehnungsgeber, separate Temperaturegeber), die untereinander zeitlich synchronisiert wurden.

Eine Übersicht der Lage aller eingebauten Sensoren zeigt Abbildung 5.

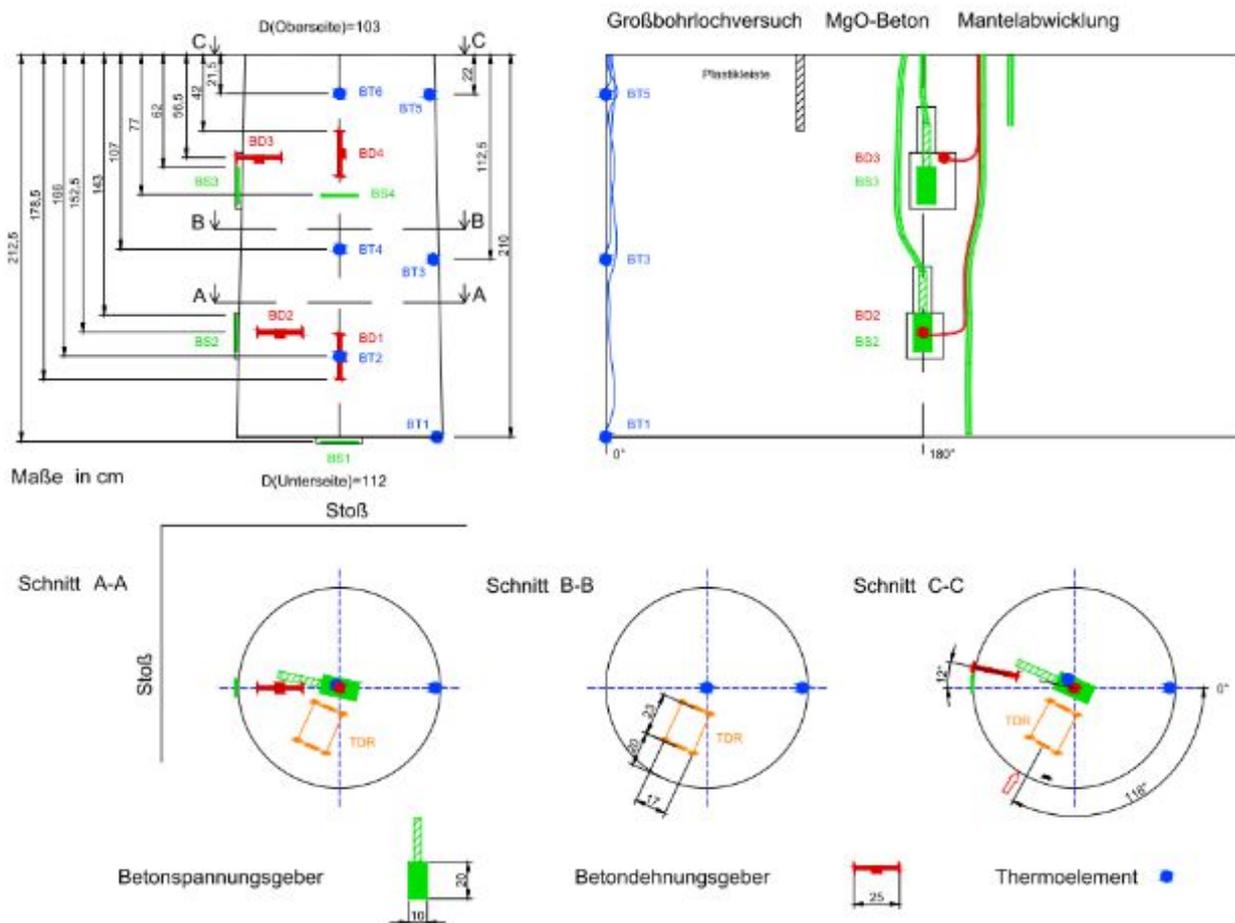


Abbildung 5: Tatsächliche Anordnung aller im MgO-Beton eingebauter Sensoren

### 2.1.2.3 MgO-Beton

Für die Betonage musste die Chargengröße des Mixers (max. 350 Liter), an die aus der Rezeptur resultierenden Mengenanteile der Komponenten und optional die Verpackungseinheiten angeglichen werden. Alle festen Bestandteile wurden in 25 kg – Säcken angeliefert.

Ursprünglich war eine Chargengröße von ca. 740,5 kg Frischbeton geplant. Es stellte sich jedoch heraus, dass durch die fließfähige Konsistenz des Frischbetons (siehe Abbildung 6) Material beim Mischen herausgeschleudert wurde und somit das Volumen der Mischerfüllung verringert werden musste. Der verwendete geringere Mengenansatz (368,2 kg Frischbeton) ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Rezepturanpassung bei der Betonage

Komponente	Grundrezeptur	Mengenansatz	Realisierte Rezeptur
MgO (L4/200)	6,75 %	25 kg	6,79 %
Quarzmehl M300	21,51 %	79,7 kg	21,63 %
Zuschlag 0-8 mm	55,91 %	207,0 kg	56,23 %
Lösung	15,83 %	56,5 kg	15,35 %

Insgesamt wurden ca. 3,7 t MgO-Beton der Rezeptur C3 verbaut. Die Betonage begann am 04.06.2014 um 7:42 Uhr und endete ca. 11:00 Uhr. Die Betonierarbeiten verliefen aus technischer Sicht erfolgreich.

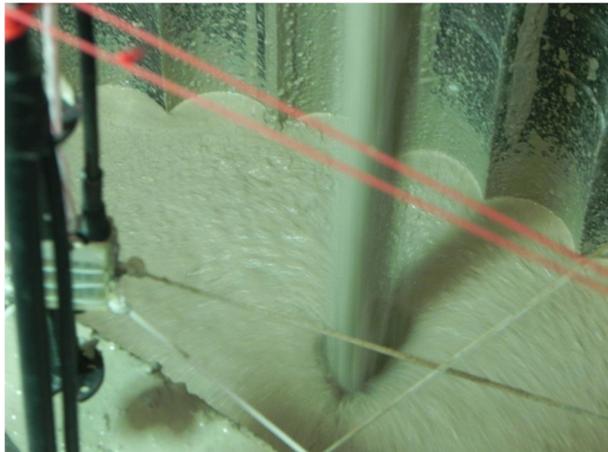


Abbildung 6: Konsistenz des MgO-Betons C3 bei der Betonage

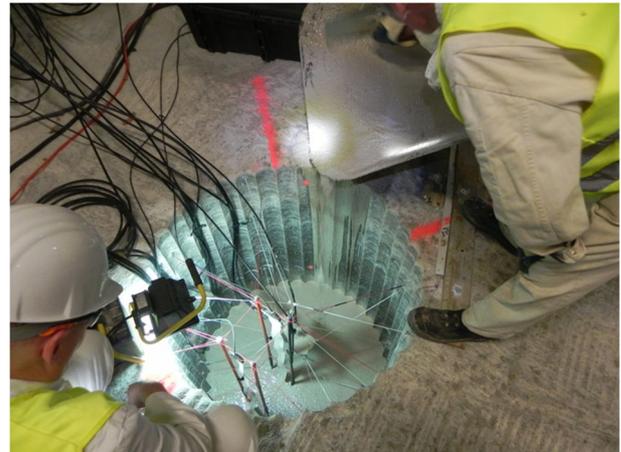


Abbildung 7: Betonagearbeiten

## 2.1.3 Messergebnisse

### 2.1.3.1 Temperaturmessungen

Die Temperatur im MgO-Beton wurde insgesamt durch 14 Messsensoren registriert. Dies sind einmal 6 Thermoelemente (Bezeichnung "BT") und zusätzlich in anderen Messsensoren integrierte Temperatursensoren (Bezeichnung "T-BS" für die Temperaturanzeige der Plattendruckgeber, Bezeichnung "T-BD" für die Temperaturanzeige der Dehnungsgeber). Weiterhin wurde die Lufttemperatur in der Umgebung der Messwerterfassungsanlage ("T-Messbox") registriert.

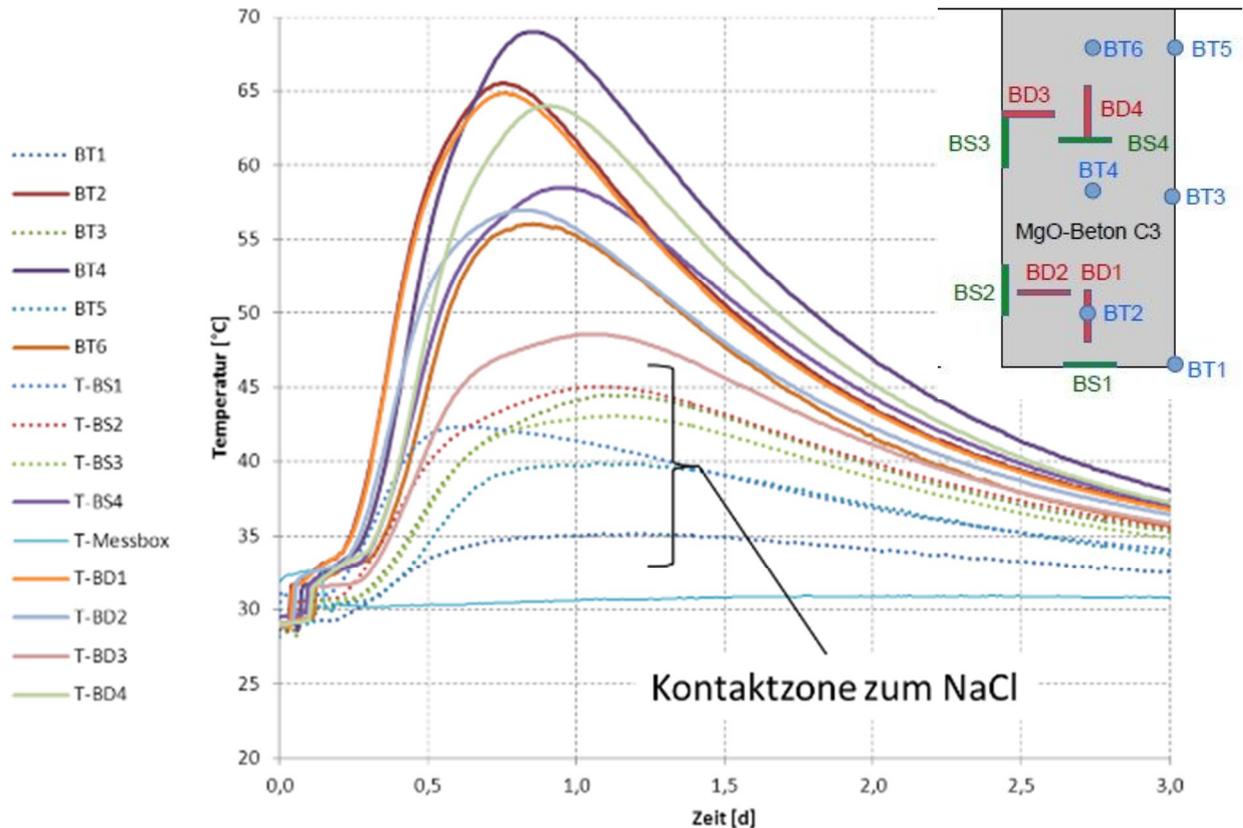


Abbildung 8: Temperaturanzeige aller Messgeber in den ersten Tagen

Abbildung 8 zeigt den Temperaturverlauf während der Betonage und der ersten Tage danach. Bereits beim Einfüllen des Betons ist ein geringer Ausschlag von wenigen Grad entsprechend dem Füllstand zu sehen. Das Ende der Betonage war bei 0,137 d (ca. 11:00 Uhr bzw. nach 3 h und 18 Minuten).

Die Abbindereaktion ist durch eine Temperaturerhöhung ab ca. 0,3 d (nach ca. 7 h) erkennbar. Das Temperaturmaximum wird nach 0,7 – 0,9 Tagen (17 – 22 h) erreicht. Die Maximaltemperatur ist von den Randbedingungen der Wärmeableitung abhängig. Die Messensoren an der Kontur (punktierter Linien) zeigen generell geringere Temperaturen als im Inneren. Die geringste Maximaltemperatur (35 °C) zeigte der Sensor BT1. Die höchste Maximaltemperatur (ca. 69 °C) zeigte der Sensor BT4 im zentralen Kern des Betonkörpers. Die Umgebungstemperatur betrug 29 °C. Die Anfangstemperatur des Frischbetons lag bei 31,5 °C. Daraus resultiert eine maximale Temperaturerhöhung infolge der Abbindereaktion von  $\Delta T = 37,5 - 40$  K. Für die Betonrezeptur C3 beträgt die maximale Temperaturerhöhung unter adiabatischen Bedingungen  $\Delta T_{\text{Max}} = 54,7$  K (siehe Abschnitt 3.3). Durch das kleine Betonvolumen im Verhältnis zur Gesamtoberfläche (0,22 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) bzw. zur Oberfläche der Steinsalzkontur (0,24 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) mit seiner hohen Wärmeleitfähigkeit sind die Temperaturverhältnisse auch im Kern des MgO-Betonkörpers durch den Wärmeabtransport in das Gebirge bestimmt.

Nach der Abbindereaktion wurde die Umgebungstemperatur von 29 °C nach ca. 14 Tagen erreicht (siehe Abbildung 9). Danach traten keine weiteren Temperaturänderungen, außer den jahreszeitlich bedingten, auf.

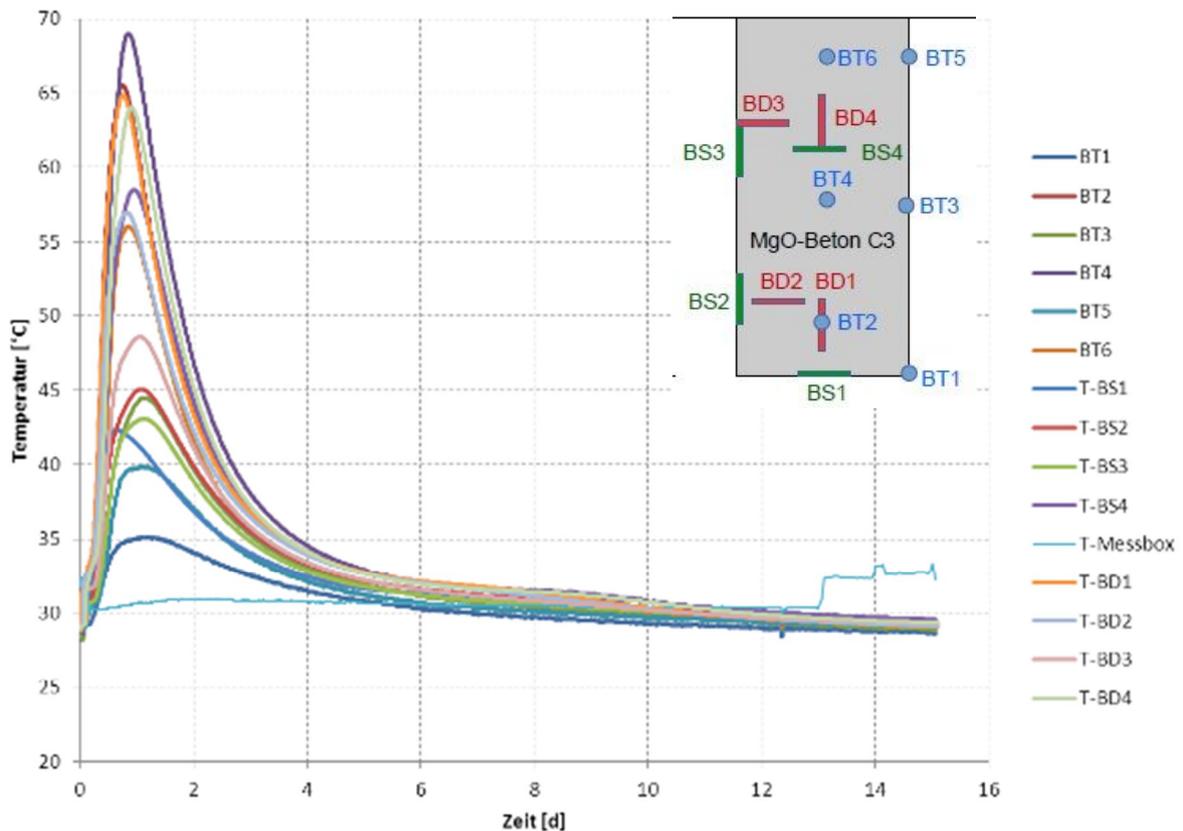


Abbildung 9: Temperaturverlauf bis zum Ende der Abkühlphase

### 2.1.3.2 Dehnungsmessungen

Die mit den Betondehnungsgebern gemessenen Verschiebungen wurden in Dehnungen (in [mm/m]) umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass sich nach der Abbindereaktion, spätestens nach Temperaturkonstanz, ein Gleichgewichtszustand einstellt. Lediglich der in der oberen Messebene befindliche Geber BD4 zeigt in axialer Richtung eine gewisse Zunahme. Die Dehnung in axialer Richtung ist in der oberen Messebene nach spätestens 150 Tagen bei einem Wert von ca. 2,4 mm/m zum Stillstand gekommen.

Die Geber in der unteren Messebene zeigen bei Werten um 0 mm/m praktisch keine Dehnung.

In der oberen Messebene zeigt der in radialer Richtung wirkende Geber einen Endwert von ca. 1,1 mm/m. Nach einer partiellen Entlastung der Salzkontur infolge des Nachschnittes in diesem Bereich erhöht sich die Dehnung auf ca. 1,5 mm/m.

Die in Abbildung 10 ersichtliche Punktwolke wird als Artefakt gewertet. Eine Analyse der Rohdaten bei der Firma GGB erbrachte keine Anhaltspunkte für reale Ereignisse. Es handelt sich wahrscheinlich um vereinzelte Störsignale.

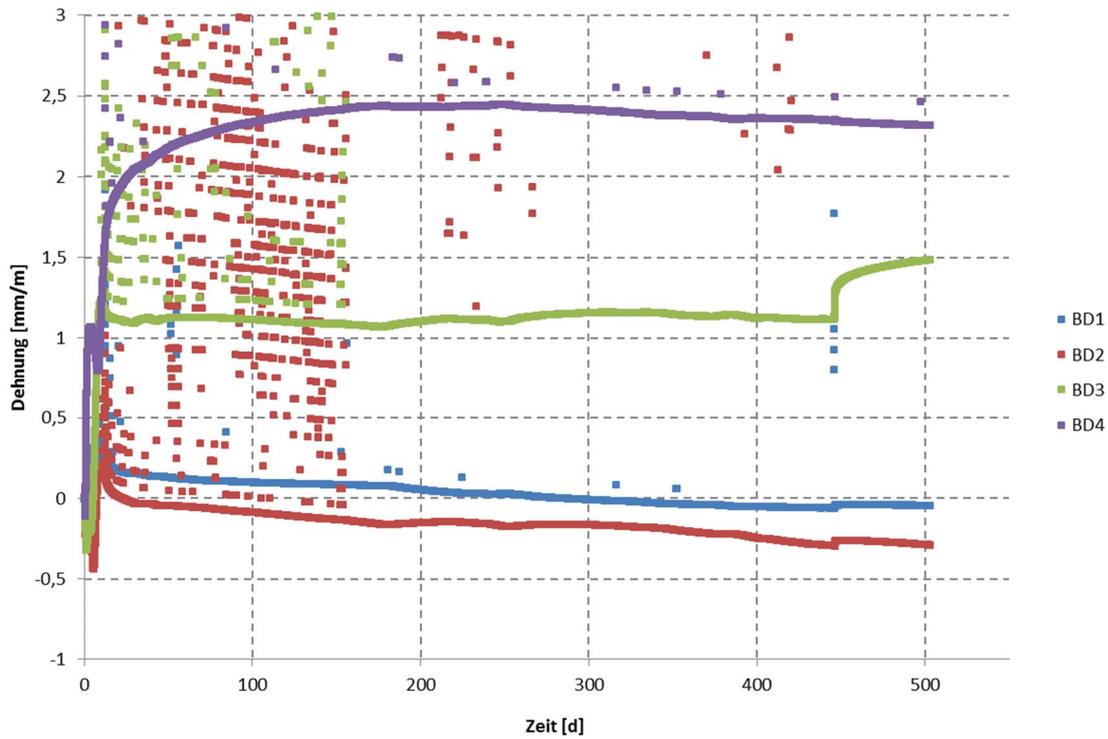


Abbildung 10: Gemessene spezifische Dehnungen im MgO-Beton

### 2.1.3.3 Druckmessungen

Die Ergebnisse der Druckmessungen in zwei Messebenen zeigt Abbildung 11.

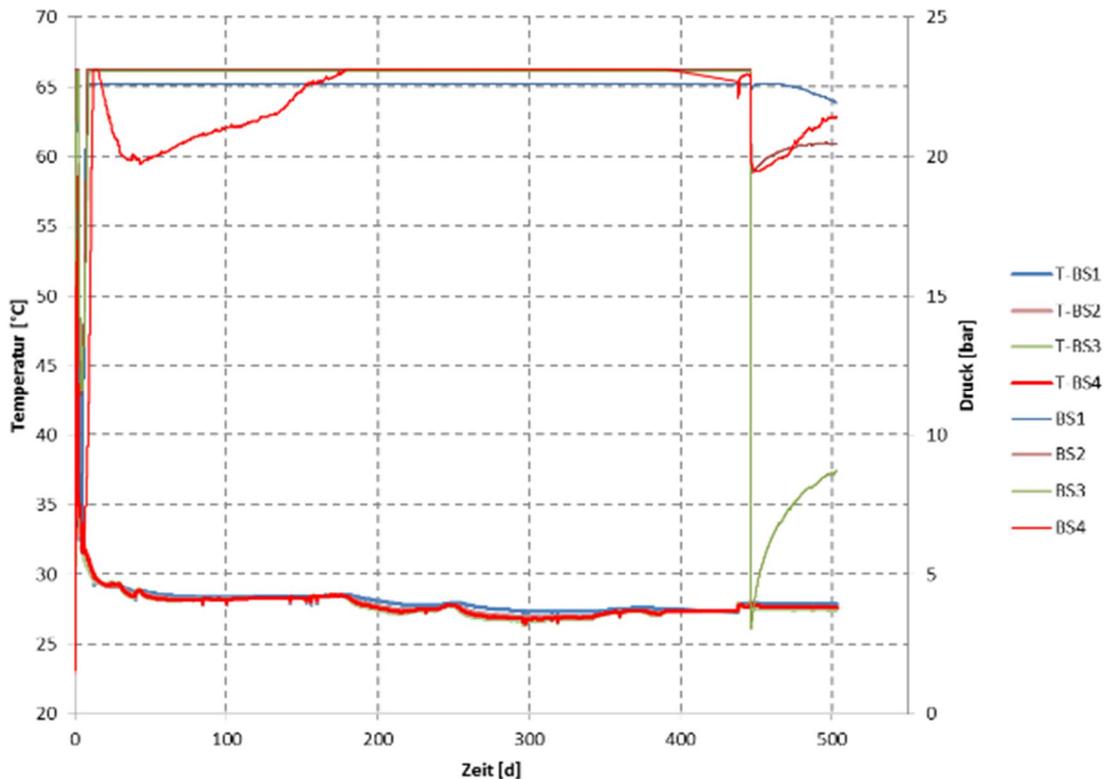


Abbildung 11: Gemessener Druck und gemessene Temperatur (TB-Si) im MgO-Beton – BS2 und BS3 als Kontaktdruck, BS1 und BS4 als axialer Druck

Die erste sofortige Druckentwicklung ist durch die Temperaturentwicklung (thermische Expansion bei begrenztem Volumen) bedingt. Mit der Abkühlung des Betons findet eine Rückdehnung statt, die zu einem Rückgang der Einspannung und damit des Drucks führt. Nach ca. 4,5 bis 5 Tagen wird eine sekundäre Druckentwicklung beobachtet. Da der Beton schon weitestgehend abgekühlt ist, handelt es sich hier um eine Druckentwicklung, die durch chemische Reaktionen im Beton bedingt ist (siehe Abbildung 12).

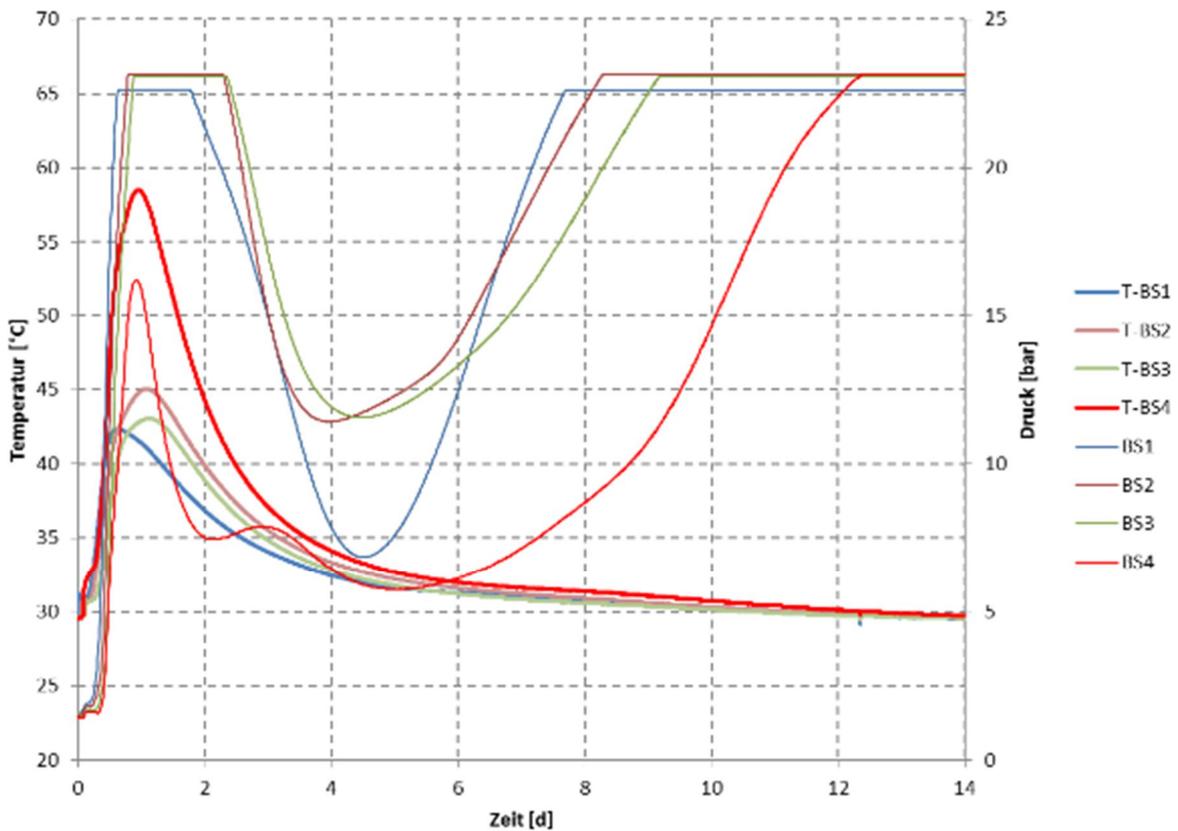


Abbildung 12: Gemessener Druck und Temperaturen (TB-Si) im MgO-Beton in den ersten 14 Tagen – BS2 und BS3 als Kontaktdrücke, BS1 und BS4 als axialer Druck

Dieser Prozess ist bereits im Labormaßstab eingehend beobachtet und untersucht worden. Bei der vorliegenden C3-Rezeptur bildet sich zuerst ein Primärgefüge aus der 5-1-8-Phase mit enthaltender Porenlösung, bei höheren Temperaturen ( $> 80\text{ °C}$ ) auch aus der 9-1-4-Phase sowie amorpher Bestandteile. Kinetisch zeitverzögert setzt sich die verbliebene Porenlösung mit der 5-1-8-Primärphase zur endgültigen 3-1-8-Phase um [Freyer et al. 2015]. Bei diesem Prozess nimmt das Volumen zu, was zur Ausbildung eines Expansionsdrucks führt.

Im vorliegenden Fall setzt diese Expansionsdruckentwicklung ca. 5 Tage nach Beginn der Betonage ein. Bei der Auswahl des Messbereiches der Druckgeber (20 bar) war es das Ziel, den diskutierten Druckabfall genau zu erfassen. Deshalb war der Maximaldruck auf 22 bar beschränkt. Dadurch konnte ein Druck über 22 bar nicht mehr gemessen werden.

Vorteilhaft ist, dass bis zur künstlichen Entlastung der Kontur auf Höhe der oberen Messebene die radial wirkenden Kontaktdrücke dauerhaft  $> 22\text{ bar}$  lagen. In axialer Richtung wurde in der oberen Messebene (Sensor BS4) eine zwischenzeitliche Entlastung auf 20 bar beobachtet (siehe Abbildung 11). Die Nähe dieses Sensors zur offenen Oberfläche des Pfropfens (77 cm von der Oberkante führt zu einem später ansteigenden und wahrscheinlich geringeren Expansionsdruck

(siehe Abbildung 12), höheren Dehnungen und damit stärkerem Druckabfall nach der Entlastung (siehe Abbildung 11).

#### 2.1.4 Rückbau und Nachuntersuchungen

Nach Abschluss der Beobachtungsphase wurde ein Teil des umliegenden Gebirges mit Hilfe einer Fräse freigelegt. In Abbildung 13 ist der Ablauf dieser Arbeiten dargestellt. Zuerst wurde zur Strecke hin in Abschnitten ein Zugang freigefräst. Danach wurde in Richtung des Kontaktdruckgebers das Gebirge abgefräst. Damit verringerte sich der Kontaktdruck. Nachdem an der Kontur ein Steg von ca. 40 cm stehen blieb, wurde der Freischnitt beendet und in der Bohrung ein weiteres Mal die Gaspermeabilität gemessen.

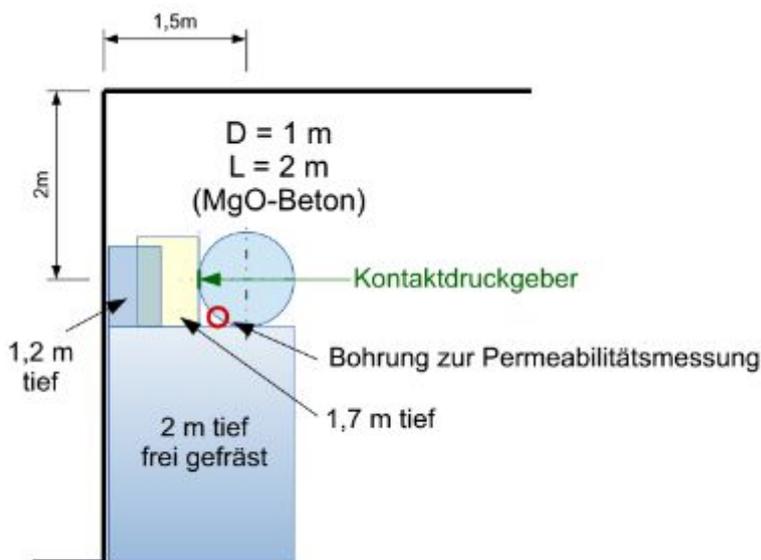


Abbildung 13: Etappen des Rückbaus des Bohrlochversuches mit MgO-Beton

Den Kontaktdruck vor und nach der ersten Etappe des partiellen Freischnitts zeigt Abbildung 14. Der Abfall des Kontaktdruckes ist in der oberen Messebene (BS3) signifikant, aber auch durch den Geber BS2 in der unteren Messebene messbar. Gleichzeitig reagierten die sich im Kern befindlichen Messgeber, die den Druck in axialer Richtung anzeigen.

Der Druck am Messgeber BS3 stieg demnach von ca. 3 bar auf ca. 8 bar an, was wahrscheinlich auf Spannungumlagerungen im umliegenden Steinsalz zurückzuführen ist. Durch die partielle Entlastung des Pfropfens vom "Gebirgsdruck" stieg die Permeabilität an. Allerdings ist dieser Anstieg nur bedingt vergleichbar (siehe Abbildung 14), da die Kontaktdruckmessung und die Permeabilitätsmessung nicht an der gleichen Stelle durchgeführt wurden.

Im weiteren Verlauf wurde der Bereich der Bohrung freigeschnitten und der Bereich um den Kontaktdruckgeber BS3 in der oberen Messebene frei gelegt, um zu prüfen, ob der Kontaktdruck auf den Wert "0" zurückgeht.

Danach wurde Kernmaterial für weitere Untersuchungen gewonnen.

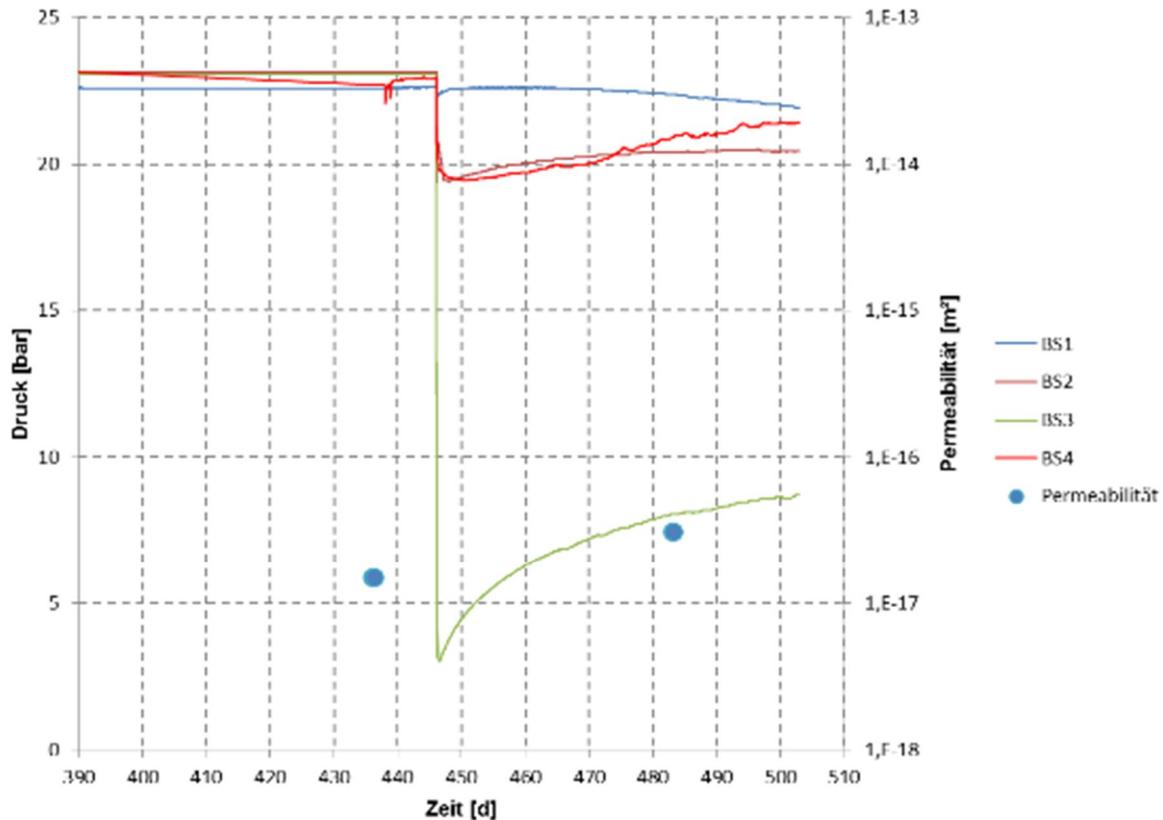


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Permeabilitätsmessung in der Kontur zum Gebirge mit dem Kontaktdruckverlauf

## 2.2 Großbohrlochversuch 2

### 2.2.1 Einleitung

Da die Ergebnisse zum Verlauf der Kristallisationsdruckentwicklung im ersten durchgeführten Großbohrlochversuch in der Grube Sondershausen mit einem Durchmesser von  $D = 1$  m nicht zufriedenstellend waren (Kristallisationsdruck hat Messbereich der Geber überschritten), wurde in der Grube Teutschenthal ein Wiederholungsversuch in einem etwas größeren Maßstab ( $L = 3$  bis  $4$  m) und mit längerer Beobachtungszeit geplant.

Weiterhin wurde im zweiten halbtechnischen in-situ-Versuch im Bohrlochtiefsten eine Druckkammer eingebaut, die einen pneumatischen Dichtigkeitstest (effektive Gaspermeabilität) und eine nachfolgende Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung über einen längeren Zeitraum ermöglichte. Dazu wurde ein Pumpstand durch den FuE-Auftragnehmer IBeWa installiert.

Begleitende Laborversuche zum zweiten Großbohrlochversuch werden im Teilbericht zum AP 3 beschrieben. Der Focus lag dabei auf der zeitabhängigen Expansionsdruckentwicklung in einem vorgegebenen Temperatur-Zeit-Fenster bei gleichzeitiger Bestimmung des Phasenbestandes sowie auf mechanischen Untersuchungen bezüglich der Druck- und Spaltzugfestigkeit an Proben. Diese wurden während der Betonage des in-situ-Versuchs aus den Frischbetonchargen entnommen. Auf eine Wiederholung der Ergebnisse aus dem AP3 wird an dieser Stelle verzichtet.

## 2.2.2 Einbau des Versuchs

### 2.2.2.1 Vorerkundung

Die Ergebnisse der Vorerkundung am Versuchsstandort sind im Abschnitt 2.3 des Teilberichtes zum Arbeitsschritt 4.1 beschrieben.

Zur Bestätigung der Ergebnisse wurde durch IBeWa die Gaspermeabilität in der Zugangsbohrung zur Druckkammer (siehe Abbildung 15) gemessen. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf den Einfluss der bei der Auffahrung festgestellten Anhydriteinlagerungen gelegt. Diese liegen überwiegend als horizontal verlaufende, mehrfach unterbrochene, dünne Bänder vor. Die Anhydriteinlagerungen traten verstärkt im Bereich ab 2 m unter der Streckensohle auf. Im oberen Bereich des Bohrloches stand hingegen kaum Anhydrit an.

Im Arbeitsbereich der Druckkammerbohrung wurde gezielt oberhalb der 1. und unterhalb der 2. Anhydritschicht (zwischen 3,56 m und 4,18 m Bohrlochteufe) die effektive Gaspermeabilität untersucht. Im Ergebnis wurde eine Gaspermeabilität im Bereich  $< 1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$  bis  $3,8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  gemessen, so dass von einer ausreichend dichten Umgebung ausgegangen werden kann. Auf Grundlage der Untersuchungen der Gaspermeabilität wurde die Position des Kontrollraums des Packers zwischen der 1. und 2. Anhydritschicht festgelegt. Im Bereich zwischen der 2. und 3. Anhydritschicht wurde eine effektive Gaspermeabilität von  $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  bis  $1,3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  gemessen. Die Anhydritlagen sind in Abbildung 15 eingezeichnet.

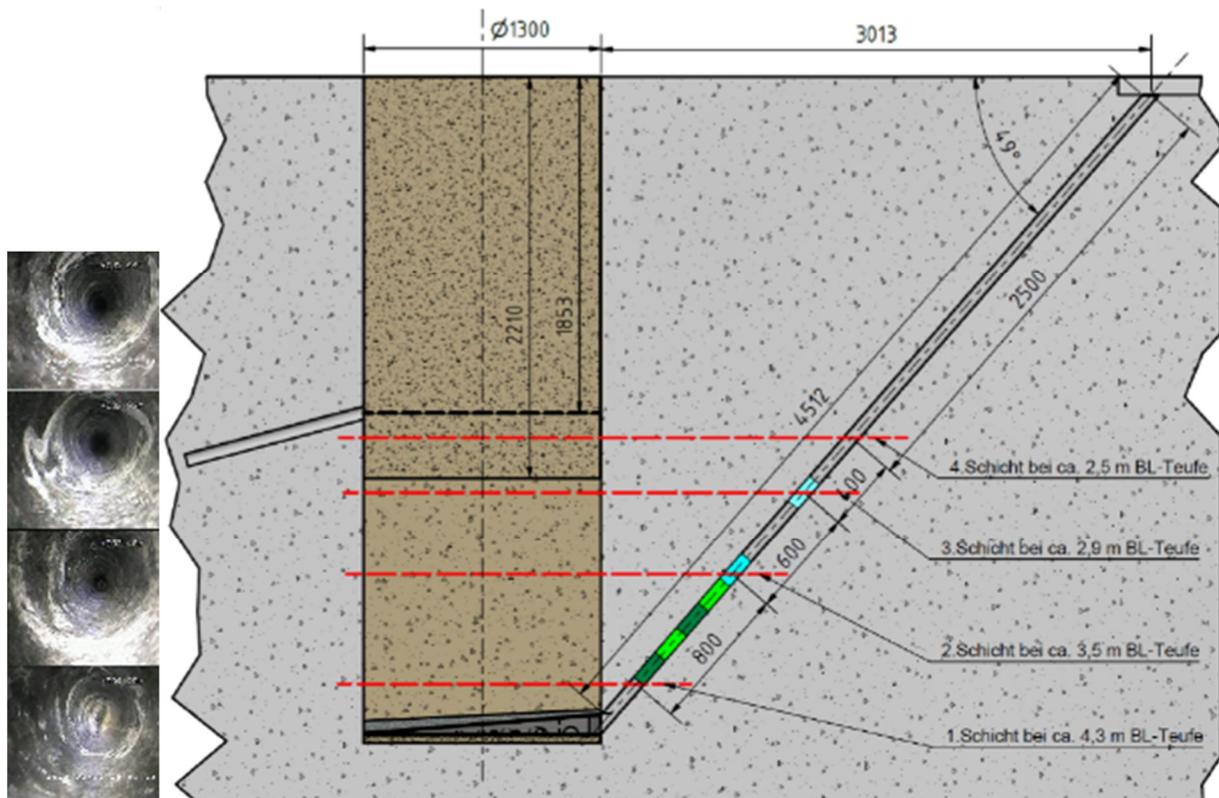
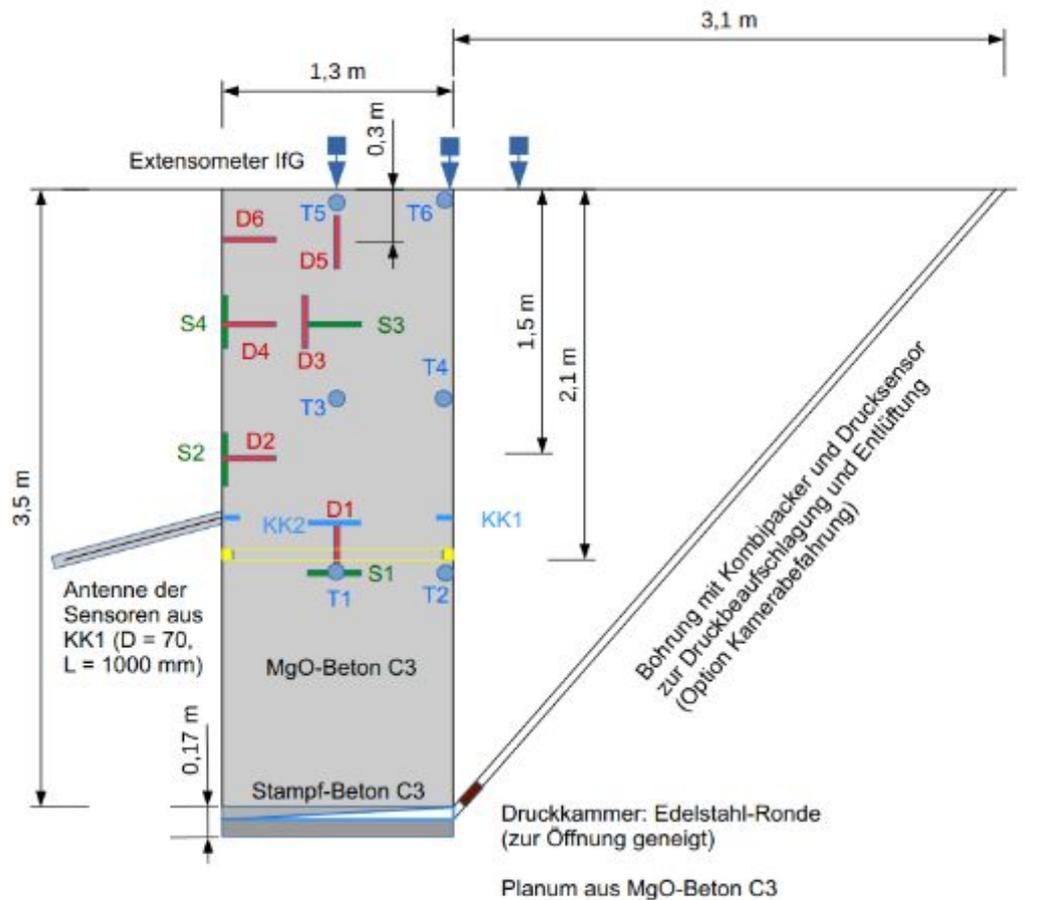


Abbildung 15: Lage der per Bohrlochkamera aufgezeichneten Anhydritlagen (links) und schematischer Aufbau des Großbohrloches mit Druckkammerbohrung (rechts)

### 2.2.2.2 Realisierter Aufbau

Den Aufbau des zweiten Großbohrlochversuchs zeigen Abbildung 16 und Abbildung 17. Das Versuchsbauwerk besteht aus einem auf MgO basierendem Betonelement der Rezeptur C3 mit der Bindemittelphase 3-1-8. Das Bohrloch, indem das Bauwerk errichtet wurde, ist ca. 3,7 m tief und besitzt einen Durchmesser von 1,3 m. Als Höhenreferenz dient ein horizontal eingerichteter

Stahlkranz an der Bohrlochoberfläche. Die Bohrlochsohle ist aufgrund der Herstellungstechnologie uneben und im Mittel 3,67 m unter der Referenzebene. Im Bohrlochtieften wurde ein Planum aus MgO-Beton (C3 Rezeptur) hergestellt, welches die Unregelmäßigkeiten der Steinsalzsohle ausgleicht und bis ca. 3,63 m Teufe reicht. Darüber wurde eine dünne Schicht Dünnbettmörtel aufgetragen, in die eine Druckkammer aus Edelstahl eingebettet wurde.



- Thermoelement (Eigenbau, 3 Mittig, 3 Kontur )
- Dehnungsaufnehmer (GGB, an den Spannungsaufnehmern)
- Spannungsaufnehmer (bis 100 bar, GGB, 2 Kontur, 2 Mittig)
- ▬ TDR-Kabel, an der Kontur befestigt (KIT-CMM)
- Kontrollkammer, KK1 (Stahlrohr) und KK2 (Porendruckaufnehmer)

Abbildung 16: Aufbau des zweiten Großbohrlochversuches mit der Instrumentierung

Über die Druckkammer wurde ein Filtertuch 3-lagig, ca. 1 mm dick gelegt, um ein Eindringen von Flüssigkeit während der Betonarbeiten zu verhindern. Darüber folgt eine 2 cm bis 6 cm starke Stampfbetonschicht (ebenfalls auf Basis der C3 Rezeptur). Das Filtertuch und die

Stampfbetonschicht wurden an der Kontur rund 8 cm bündig nach oben gezogen, damit während der Betonage Flüssigkeit über die Randbereiche nicht abfließt.

Der obere Bereich des Großbohrloches ist vollständig mit MgO-Beton verfüllt und schließt bündig mit der Oberkante des Stahlkranzes ab.

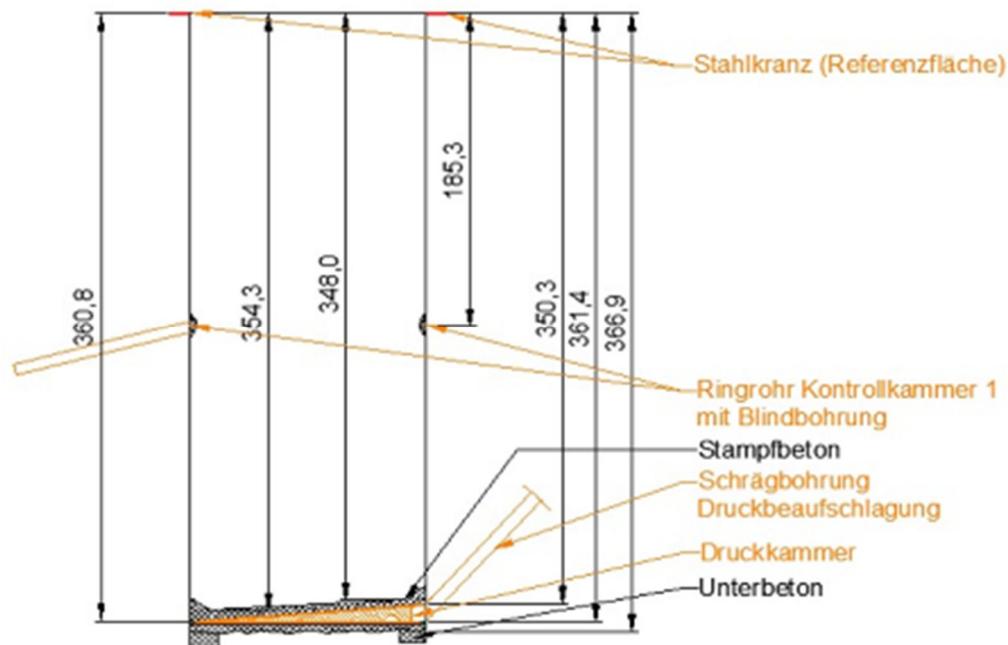


Abbildung 17: Druckkammer und Kontrollkammer beim zweiten Großbohrlochversuch

### 2.2.2.3 Hohlraumerstellung

Wie beim ersten Großbohrlochversuch wurde auf die Technologie des „Loch-an-Loch-Bohrens“ zurückgegriffen. Das Bohrgerät wurde schrittweise kreisförmig um den Mittelpunkt versetzt. Die Bohrkronen hatte 150 mm Durchmesser, wodurch sich der Ansatzpunkt auf einem Radius von 570 mm bewegte und sich ein Durchmesser des Großbohrloches von 1,3 m ergab. Durch das Umsetzen des Bohrgerätes um jeweils 10° entstand eine Rippenstruktur an der Kontur, welche in einem späteren Arbeitsgang entfernt wurde. Der Hohlraum wurde von der Firma TS-Bau in der Zeit vom 15.05.2018 bis 24.09.2018 hergestellt und angepasst (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19).

Die Schrägbohrung zur Druckkammer wurde am 29. und 30.08.2018 erstellt. Ausführender war ebenfalls die Fa. TS Bau. Die Bohrung verläuft im 45° Winkel zur Bohrlochachse nach unten. Der Austrittspunkt liegt bei 360 cm bis 350 cm Teufe (siehe Abbildung 20). Das Bohrloch besitzt einen Durchmesser von 70 mm. Der Ansatzpunkt der Schrägbohrung wurde mit einem Holzkasten umgeben und dieser einbetoniert (siehe Abbildung 21). Darüber wurde ein Holzbrett zum Schutz der Bohrung gelegt. Zusätzlich konnte ein Gummistöpsel in das Bohrloch gesteckt werden, wodurch Fremdkörper nicht mehr in das Bohrloch und die spätere Druckkammer gelangen konnte. Die Druckkammer und die Schrägbohrung wurde mit einer Kabelkamera mehrfach zur Kontrolle überprüft.



Abbildung 18: Loch-an-Loch-Bohren



Abbildung 19: Bohrkern Großbohrloch



Abbildung 20: Austrittspunkt Schrägbohrung



Abbildung 21: Ansatzpunkt Schrägbohrung

Nach dem Stoßen der Schrägbohrung konnte am 24.09.2018 das Planum der Druckkammer in der gewünschten Höhe zum Austrittspunkt hergestellt werden. Für das Planum wurde ein MgO-Beton C3 verwendet (siehe Tabelle 2).

Der Einbau der Druckkammerkonstruktion begann am 27.09.2018. Das Großbohrloch wurde zunächst gesäubert und von Staub befreit. Danach wurde die Grundplatte der Druckkammer herabgelassen und versuchsweise auf das Planum gelegt. Anschließend wurde die Grundplatte wieder herausgehoben und ein auf der C3 Rezeptur basierender Dünnbettmörtel (siehe Tabelle 2) angerührt. Der Dünnbettmörtel enthält keinen Quarzsand/Quarkies-Zuschlag und wurde an einem Eimer in das Bohrloch herabgelassen und flächig auf dem Planum verteilt. Durch die flüssige Konsistenz verteilte sich der Baustoff gleichmäßig über den gesamten Querschnitt.

Die Druckkammer wurde durch IBeWa konzipiert. Sie wurde von Mitarbeitern des IfBuS und TS Bau eingebaut.

#### 2.2.2.4 MgO-Beton

Die Betonage des MgO-Betons C3 erfolgte anlog zum ersten Großbohrlochversuch, allerdings in mehreren Abschnitten.

Ausgangsstoff für die Bindemittelphase des C3-Betons ist ein Magnesiumoxid der Sorte Luvomag MO L4-200 der Firma Lehmann & Voss. Das Material besitzt einen Anteil von 95% MgO und ist ein Verschnitt aus mehreren Chargen chinesischen Ursprungs. Die vorgegebene Reaktivität nach dem Zitronensäuretest liegt bei 150 s bis 250 s (bei pH=7). Im Versuch wurden die Chargen Nr.

181215 für den „Stampfbeton“ und Nr. 194272 sowie Nr. 205348 für alle anderen Betonagearbeiten verwendet.

Der Zuschlag bestand aus einer Gesteinskörnung 0/8 mm der Firma Quickmix und einem Quarzmehl der Sorte M300 der Firma Euroquarz. Die Gesteinskörnung war ein Sand-Kies-Gemisch aus dem Werk Ostrau. Das Quarzmehl ist ein inerter Mehlkornzuschlag aus kristallinem Quarz, welcher die Sedimentationsstabilität der Bindemittelsuspension gewährleistet.

Als Anmachlösung diente eine NaCl-gesättigte 5 molale MgCl<sub>2</sub>-Lösung. Lieferant der S30 Lösung war die Firma DEUSA.

Der im Versuchsbauwerk eingesetzte Beton basierte auf der von der TU BAF entwickelten C3 Ortbetonrezeptur. Die Zusammensetzung der einzelnen Betonageabschnitte ist in der folgenden Tabelle 2 aufgeführt:

Tabelle 2: Eingesetzte Modifikationen der C3-Rezeptur in den Betonageabschnitten

<b>Betonage- abschnitt</b>	<b>Anteil Quarzkorn 0/8 mm</b>	<b>Anteil Quarzmehl M300</b>	<b>Anteil MgO Lehmann &amp; Voss L4/200</b>	<b>Anteil MgCl<sub>2</sub>- Lösung DEUSA S30, NaCl gesättigt</b>
Planum	55,92 %	21,51 %	6,75 %	15,82 %
Dünnbettmörtel	0 %	15,30 %	48,90 %	35,80 %
Stampfbeton	53,45 %	24,95 %	6,47 %	15,13 %
Hauptbeton Charge 1-3	55,92 %	21,51 %	6,75 %	15,82 %
Hauptbeton Charge 4-19	55,01 %	22,00 %	6,88 %	16,12 %
Hauptbeton Charge 20-31	55,77 %	20,91 %	6,97 %	16,34 %

Das Versuchsbauwerk weist eine Gesamthöhe von rund 3,5 m auf. Daher wurde die Betonage aus arbeitstechnischen und sicherheitstechnischen Gründen in zwei Abschnitte geteilt. Der untere Abschnitt füllt das Großbohrloch über ca. 1,3 m Höhe aus. Dadurch wurde eine Arbeitsebene bei 2,2 m Teufe geschaffen, von der aus die Messgeber leichter eingebaut werden konnten.

Der untere Abschnitt wurde nicht instrumentiert, um einen Einfluss von Sensorkabeln und der Sensoren selbst auf das hydraulische Verhalten des Betonkörpers im Bereich zwischen der Druckkammer und den Kontrollkammern zu verhindern.

Direkt auf das Filtertuch der Druckkammer wurde zuerst eine als Stampfbeton (siehe Tabelle 2) bezeichnete Mischung aufgebracht. Der Stampfbeton enthielt einen erhöhten Anteil an Quarzmehl. In der Bindemittelphase wurde ein reaktiveres MgO eingesetzt, was zu einer beschleunigten Abbinde Reaktion führte. Das MgO-zu-Lösung-Verhältnis wurde beibehalten. Ziel war es ein Abfließen von Anmachlauge in die Druckkammer zu verhindern, welche nachträglich nicht mehr aus der Druckkammer zu entfernen gewesen wäre und das Kammervolumen zu einem undefinierten Anteil eingenommen hätte.

Der untere Hauptabschnitt wurde in der Zeit vom 18.10.2018 bis 06.11.2018 betoniert (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). Der obere Betonierabschnitt wurde nach dem Einbau der

Messtechnik am 13.12.2018 in der Spätschicht begonnen und in der Nachtschicht auf den 14.12.2018 abgeschlossen.

Zur Qualitätsüberwachung wurde baubegleitend stichprobenartig das Ausbreitmaß des Baustoffes nach DIN EN 12350-5:2009-08 bestimmt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5:2009-08 im oberen Betonierabschnitt

Charge	Ausbreitmaß f [mm]
13	640
14	590
16	558
18	535
20	580
23	585
24	600
29	610
30	643
31	620

Da das Ausbreitmaß bis zur 18. Charge abnahm, wurde die Rezeptur ab der 20. Charge vor Ort angepasst. Der Anteil an Quarzmehl wurde um 5 kg verringert, was die Anfangssteifigkeit des Baustoffs reduzierte (siehe auch Tabelle 2).



Abbildung 22: Einbringen MgO-Beton C3



Abbildung 23: Ende der Betonage

### 2.2.2.5 Einbau der Sensoren

Im Bauwerk wurden folgende Sensoren verbaut (siehe Abbildung 16):

- 6 Thermoelemente (T1 bis T6)
- 4 Plattendruckgeber (S1 bis S4, inkl. Temperaturmessung T-S1 bis T-S4)
- 6 Betondehnungsgeber (D1 bis D6, inkl. Temperaturmessung T-D5 und T-D6)
- 1 TDR-Feuchtigkeitssensor
- 1 Kontrollkammer entlang der Kontur (KK1, inkl. Bohrung für Funksender)
- 1 Kontrollkammer in der Mitte des Versuchskörpers (KK2)
- 3 Extensometer (I1 bis I3), nachfolgend wurden 3 weitere Extensometer installiert

Die Bauart der Messgeber entspricht der im ersten Großbohrlochversuch verwendeten Messgeber. Bei den Plattendruckgebern (Betonspannungsgeber der Firma Glötzl) wurde der Messbereich bis 100 bar erhöht. Bei den Betondehnungsgebern (Schwingsaitendehnungsaufnehmer der Firma Glötzl) wurde der maximal vom Hersteller angebotene Messbereich gewählt. Dies waren -300 bis 300  $\mu\text{m}$  bei 250 mm Sensorlänge für D1 bis D4, -150 bis 450  $\mu\text{m}$  bei 125 mm Sensorlänge für D5 sowie -150 bis 450  $\mu\text{m}$  bei 250 mm Sensorlänge für D6. Die zusätzlich installierten Geber zur Feuchteindikation (TDR-Sensor, Druckkammer 1, Druckkammer 2) dienten der Interpretation der Ergebnisse der vorgesehenen Flüssigkeitsdruckbelastung.

Luftdruck und Luftfeuchte am Versuchsort wurden mit einem Luftdruckgeber sowie einem Feuchtesensor am Streckenstoß gemessen. Die Luftfeuchte wurde mit einem Sensor der Firma B+B Thermo-Technik GmbH bestimmt. Der Messbereich wird mit 0 % bis 100 % RH, die Genauigkeit mit  $\pm 0,2\%$  RH angegeben. Der Luftdruck wurde mit Hilfe eines separat angebrachten Druckgebers (ebenfalls B+B Thermo-Technik GmbH) gemessen. Der Messbereich liegt zwischen 0 bar und 2 bar. Der Restfehler wird mit  $< \pm 0,4\%$  angegeben.

Die Messtechnik wurde vom 4. bis 10.12.2018 eingebaut.

## 2.2.3 Messergebnisse nach der Betonage

### 2.2.3.1 Temperaturmessungen

Die Temperatur im MgO-Beton wurde insgesamt durch 12 Messkanäle gemessen. Dies sind einmal 6 Thermoelemente (Bezeichnung "T") und zusätzlich in anderen Messsensoren integrierte Temperatursensoren (Bezeichnung "T-S" für die Temperaturanzeige der Plattendruckgeber, Bezeichnung "T-D" für die Temperaturanzeige der Dehnungsgeber). Weiterhin wurde die Umgebungstemperatur ("T-Umgeb.") registriert.

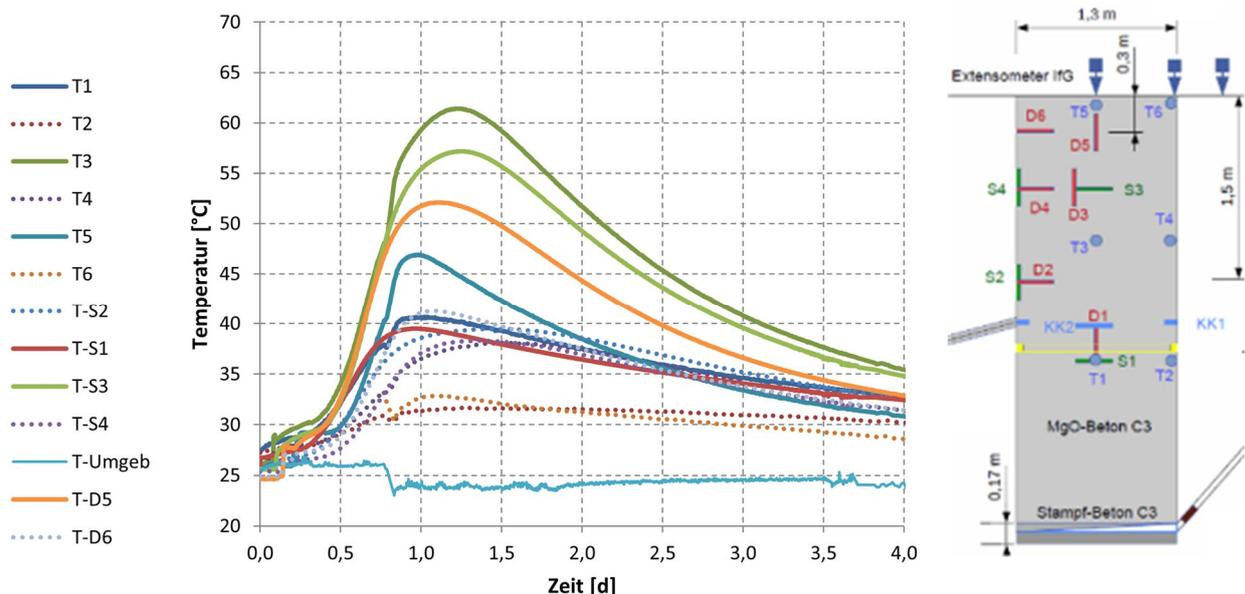


Abbildung 24: Temperatur an allen Messgebern in den ersten Stunden der Betonage

Abbildung 24 zeigt den Temperaturverlauf in den ersten Tagen nach der Betonage. Nach dem Einfüllen des Betons steigt die Temperatur wenige Grad entsprechend dem Füllstand im Bohrloch an. Das Ende der Betonage war bei 0,25 d (ca. 6 h nach Beginn der Betonage).

Der Beginn der Abbindereaktion ist durch eine Temperaturerhöhung ab ca. 0,3 d bis 0,4 d (nach ca. 7 h bis 9 h) erkennbar. Das Temperaturmaximum wird nach 0,8 d bis 1,25 d (19 h bis 30 h) erreicht. Die Maximaltemperatur ist von den Randbedingungen der Wärmeableitung abhängig. Die Messensoren an der Kontur (punktierte Linien) zeigen generell geringere Temperaturen. Die geringste Maximaltemperatur (31,5 °C) zeigt der Sensor T2 (Kontur, unten). Die höchste Maximaltemperatur (61,4 °C) zeigte der Sensor T3 im zentralen Kern des Betonkörpers. Die Umgebungstemperatur betrug anfangs ca. 24 °C. Die Anfangstemperatur des Frischbetons lag bei ca. 26 °C.

Daraus resultiert eine maximale Temperaturerhöhung infolge der Abbindereaktion von  $\Delta T = 35$  K bis 37 K. Für die Betonrezeptur C3 beträgt die maximale Temperaturerhöhung unter adiabatischen Bedingungen  $\Delta T_{\text{Max}} = 54,7$  K.

Durch das noch kleine Betonvolumen im Verhältnis zur Gesamtoberfläche von ca. 0,25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (GBLV 1: 0,22 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) bzw. zur Oberfläche der Steinsalzkontur von ca. 0,33 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (GBLV 1: 0,24 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) mit seiner hohen Wärmeleitfähigkeit ist die Temperatur im Kern des MgO-Betonkörpers durch den Wärmeabtransport in das Gebirge bestimmt.

Nach der Abbindereaktion wurde die Umgebungstemperatur von 24 °C nach 45 Tagen noch nicht ganz erreicht (siehe Abbildung 25). Jahreszeitlich bedingt, erhöht sich im Sommer die Umgebungstemperatur auf ca. 27 °C bis 30 °C. Nach ca. 100 Tagen wird ein Temperatenausgleich zwischen dem Bauwerk und der umgebenden Luft beobachtet.

### GBLV - Temperaturentwicklung

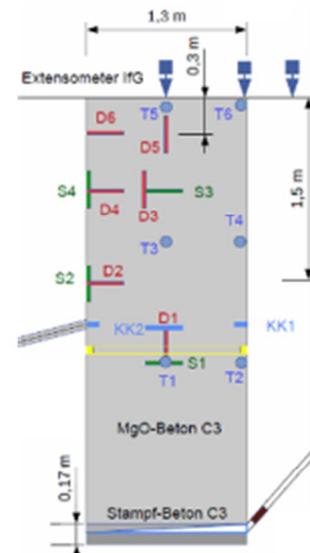
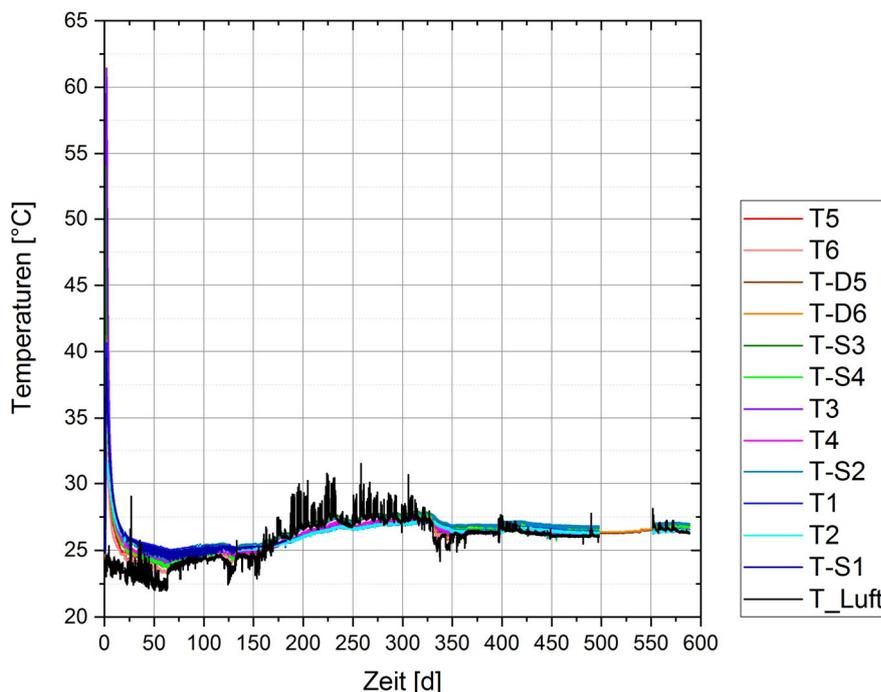


Abbildung 25: Temperaturverlauf im zweiten Großbohrlochversuch<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Im Zeitraum von 500 bis 550 Tagen fiel die Messwerterfassung an einem Datenlogger aus. Bedingt durch die Reiserestriktionen in Folge der Covid-19-Pandemie im Frühjahr 2020 wurde dieser Ausfall spät bemerkt und konnte erst später behoben werden. Für den Zeitraum liegen hierdurch nur die Daten der getrennt erfassten Dehnungsgeber und deren Thermoelemente vor.

### 2.2.3.2 Dehnungsmessungen

Die mit den Betondehnungsgebern gemessenen Verschiebungen wurden in Dehnungen (in [mm/m]) umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 dargestellt.

In axialer Richtung wurden oben (Sensor D5) und unten (Sensor D1) relativ hohe Dehnungen gemessen. Die angezeigten Werte liegen allerdings außerhalb des Messbereichs der Dehnungsgeber, sie sind jedoch noch plausibel. In der Mitte (Sensor D3) sind die Dehnungen auf 1 mm/m angestiegen. Sensor D3 fiel nach ca. einem Jahr Betriebszeit aus.

Die axialen Dehnungen (D1, D3, D5) können zur Verschiebung aufintegriert werden. Die Verschiebung stellt die Hebung der MgO-Beton-Oberfläche dar. Die aus den Dehnungsmessungen berechnete Verschiebung wurde mit der vom luftseitigen Extensometer gemessenen Verschiebung in der Mitte MgO-Beton-Oberfläche (I-1) verglichen (vgl. Abbildung 27). Die aus den gemessenen Dehnungen berechnete Verschiebung stimmt sehr gut mit der gemessenen Verschiebung von etwa 6 mm überein. Bei einem Vergleich der Verschiebungskurven muss berücksichtigt werden, dass die Extensometer auf der MgO-Oberfläche erst fünf Tage nach der Betonage installiert wurden.

In radialer Richtung (Sensoren D2, D4, D6) sind die gemessenen Dehnungen sehr gering (ca. 0,2 mm/m) und ändern sich vergleichsweise wenig. Streuwerte traten analog den Dehnungsmessungen im GBLV 1 auf, wurden jedoch als Artefakte durch Störsignale gewertet und aus der unten stehenden Grafik entfernt.

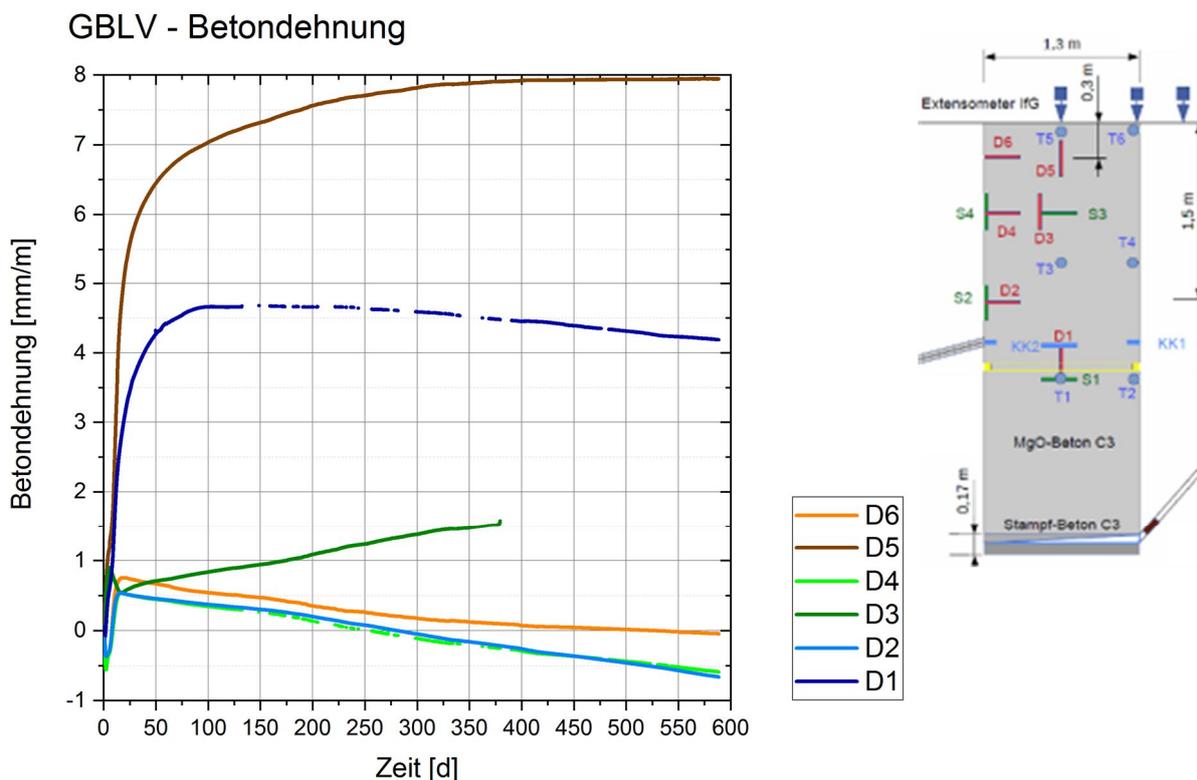


Abbildung 26: Gemessene spezifische Dehnungen im MgO-Beton

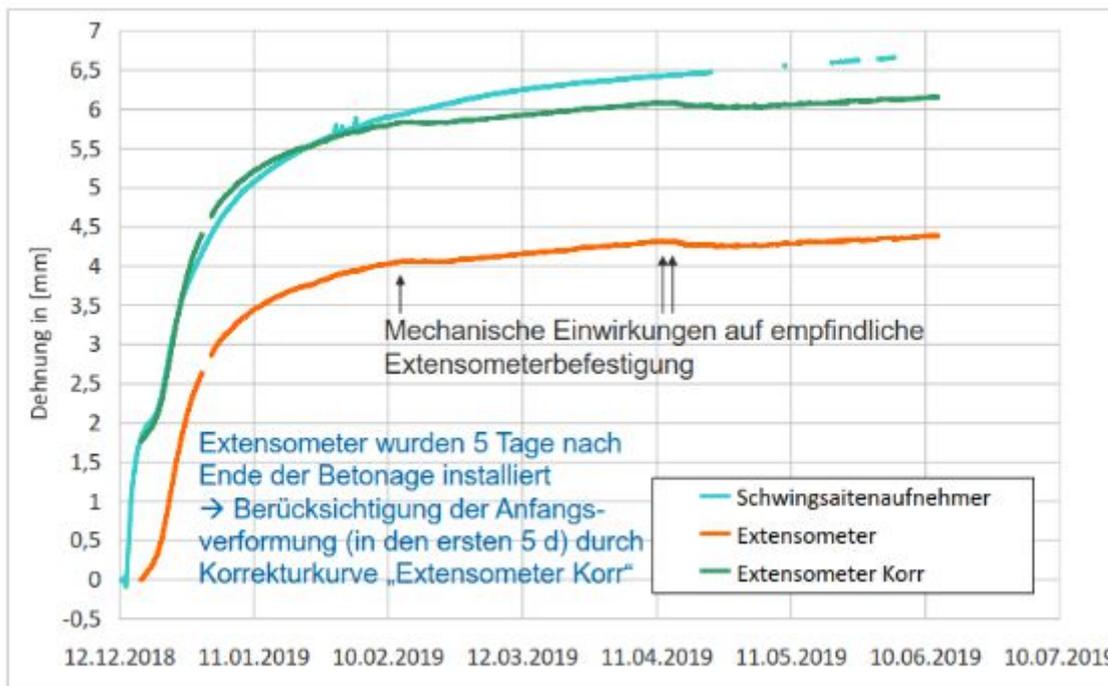


Abbildung 27: Vergleich der abgeschätzten Verformung an der Bauwerksoberfläche, berechnet aus den axialen Dehnungen der Betondehnungsaufnehmer (Schwingensaitenaufnehmer) und gemessen mit dem Extensometer I-1 im Mittelpunkt der Luftseite

### 2.2.3.3 Druckmessungen

Der mit dem Abbinden verbundene Druckanstieg (primärer Druckanstieg) ist durch die Temperaturentwicklung (thermisch bedingte Expansion bei behinderter Volumenausdehnung) bedingt. Mit der Abkühlung des Betons findet eine Kontraktion des MgO-Betons statt, die zu einem Rückgang des Einspannungszustands (Drucks) führt.

Nach ca. 10 Tagen wird eine sekundäre Druckentwicklung beobachtet. Da der Beton schon weitestgehend abgekühlt ist, ist der sich einstellende Druck durch die Phasenbildung im Beton bedingt.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.3.3 beschrieben, wurde dieser Prozess bereits im Labormaßstab eingehend untersucht. Bei der vorliegenden C3-Rezeptur bildet sich zuerst ein Primärgefüge aus der 5-1-8-Phase mit enthaltener Porenlösung. Bei höheren Temperaturen ( $> 80\text{ °C}$ ) besteht das Primärgefüge auch aus der 9-1-4-Phase und aus amorphen Bestandteilen. Kinetisch zeitverzögert setzt sich die verbliebene Porenlösung mit der 5-1-8-Primärphase zur langzeitstabilen 3-1-8-Phase um [Freyer et al. 2015]. Bei diesem Prozess nimmt das Volumen zu. Dies führt bei behinderter bzw. verhinderter Volumenausdehnung zu einem Expansionsdruck.

Im ersten Großbohrlochversuch in der Grube Sondershausen konnte die Expansionsdruckentwicklung leider nicht quantifiziert werden, da der Expansionsdruck den Messbereich (2 MPa) der verwendeten Sensoren überschritt.

Beim zweiten Großbohrlochversuch in der Grube Teutschenthal setzte die Entwicklung des Expansionsdrucks ca. 10 Tage nach Beginn der Betonage ein (siehe Abbildung 28). In radialer Richtung stieg der Druck bis auf ein Maximum von 5,5 MPa (Sensor S4 in der oberen Messebene) bzw. 6,2 MPa (Sensor S2 in der unteren Messebene) an und verblieb danach auf diesem Niveau. Ob damit ein Gleichgewichtszustand und ein Abschluss der Kristallisation der 3-1-8-Bindemittelphase erreicht ist, kann nicht abschließend festgestellt werden, da das Projektende

erreicht wurde. Ebenso ist unklar, ob die Kontaktdrücke sich infolge einer angenommenen Gefügerelaxation zukünftig verringern werden. Die geringen Schwankungen sind durch Temperaturänderungen bedingt.

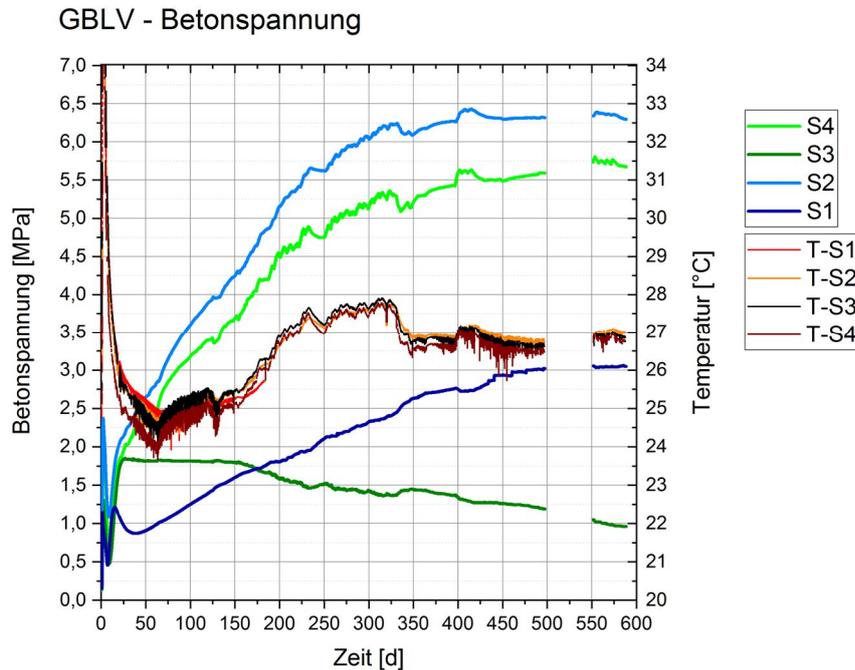


Abbildung 28: Gemessener Druck und Temperatur (T-Si) im MgO-Beton – S2 und S4 als Kontaktdruck, S1 und S3 als axialer Druck<sup>2</sup>

Aufgrund des hohen radialen Kontaktdrucks und dessen weiterer Erhöhung sollte geklärt werden, inwiefern der gemessene Kontaktdruck durch den Gebirgsdruck beeinflusst wurde. Es wurde eingeschätzt, dass die radialen Spannungen im Gebirge für ein schon jetzt vorliegendes konvergenzbedingtes Aufkriechen des Gebirges auf den MgO-Beton noch nicht ausreichend waren. Aufgrund des komplexen Sachverhaltes wurde für eine endgültige Aussage eine Hydrofracmessung durch das IfG Leipzig am Versuchsort durchgeführt. Als Ergebnis der Hydrofracmessung wurde im Bereich des Großbohrlochversuches 2 (bei 4 m Bohrlochteufe) eine kleinste Hauptnormalspannung von knapp 4 MPa ermittelt. Somit ist der gemessene hohe radiale Kontaktdruck mit großer Wahrscheinlichkeit durch den Expansionsdruck des MgO-Betons C3 verursacht.

In axialer Richtung ist der gemessene Druck geringer. Im Kern hat sich in axialer Richtung ein Expansionsdruck bei ca. 1 MPa (Sensor S3 - Mitte) eingestellt. Zuvor war ein maximaler Druck von 1,8 MPa gemessen worden. Der Druck am Sensor S1 ist nach 500 Tagen auf einen Wert von ca. 3,0 MPa angestiegen. Offen ist, ob der Druck sich wieder verringert.

#### 2.2.3.4 Feuchtemessung

Die Signale des an der Kontur in der Mitte des Bauwerks (siehe Abbildung 16) zur Feuchtedetektion positionierten TDR-Kabelsensoren verzeichneten auch nach einer Druckbeaufschlagung von 175 Tagen (3.2.2020 bis 27.7.2020) keine Änderung, da die Umgebung "trocken" war. Allerdings war die Auswertung erschwert, da in der Umgebung des

<sup>2</sup> Im Zeitraum von 500 bis 550 Tagen war die Messwerterfassung der Drucksensoren ebenfalls vom Anlagenausfall betroffen (s.o.) Nennenswerte Informationsverluste traten jedoch nicht ein.

Versuchsortes wahrscheinlich elektrische Störsignale auftraten. Die Ursache der Störsignale konnte nicht geklärt werden.

## 2.2.4 Druckbeaufschlagung der Druckkammer und Nachuntersuchungen

In Arbeitsbereich der Druckkammerbohrung (zwischen 3,5 m und 4,3 m Bohrlochteufe) betrug die Gaspermeabilität  $3,8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  bis  $< 10^{-22} \text{ m}^2$  (Messungen von IBeWa), so dass von einer "technisch dichten" Umgebung ausgegangen werden kann.

Im ersten pneumatischen Vortest wurde eine effektive Gaspermeabilität des Gesamtsystems "Bauwerk aus MgO-Beton C3 im Steinsalz" zwischen  $3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  und  $3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  ermittelt.

Der zweite pneumatische Vortest vom 03.09.2019 zeigte eine deutlich geringere effektive Gaspermeabilität des Gesamtsystems "Bauwerk aus MgO-Beton C3 im Steinsalz" von  $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ .

Im Ergebnis des dritten pneumatischen Vortests am 03.12.2019 verringerte sich die effektive Gaspermeabilität des Gesamtsystems weiter auf  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . Auf Basis dieser Ergebnisse wurde danach mit der Befüllung der Druckkammer mit Lösung begonnen.

Durch integrale Ultraschallmessungen (IfG) wurde im Bereich der Sohle eine konturnahe ALZ mit einer Mächtigkeit von ca. 30 cm festgestellt. Im Ergebnis der Gaspermeabilitätsmessungen (IfG) in der Bohrung der Hydrofracmessung wurde im Bereich der Anhydriteinschlüssen eine Permeabilität von  $10^{-18} \text{ m}^2$  und im kompakten Steinsalz eine Permeabilität von  $3 \cdot 10^{-20}$  und  $10^{-22} \text{ m}^2$  gemessen. Dies ist für das geschichtete Steinsalz typisch. Die gemessene Permeabilität stimmt in der Größenordnung mit den Messergebnissen von IBeWa in der zentralen Vorbohrung des Großbohrloches überein (siehe oben:  $3,8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  bis  $< 10^{-22} \text{ m}^2$ ).

Im Zeitraum vom 12.12.2019 bis 02.02.2020 (53 Tage) wurde die Druckkammer mit gesättigter NaCl-Lösung befüllt und der Füllstand kontrolliert zwischen 200 mm und 520 mm gehalten, um eine dauerhafte Überstauung der Druckkammer sicherzustellen. Im Zuge der Überstauung wurden insgesamt  $2300 \text{ cm}^3$  gesättigte NaCl-Lösung nachgefüllt (Abbildung 29). Im Zeitraum von 53 Tagen sind ca.  $2917 \text{ cm}^3$  gesättigte NaCl-Lösung in das Bauwerk eingedrungen.

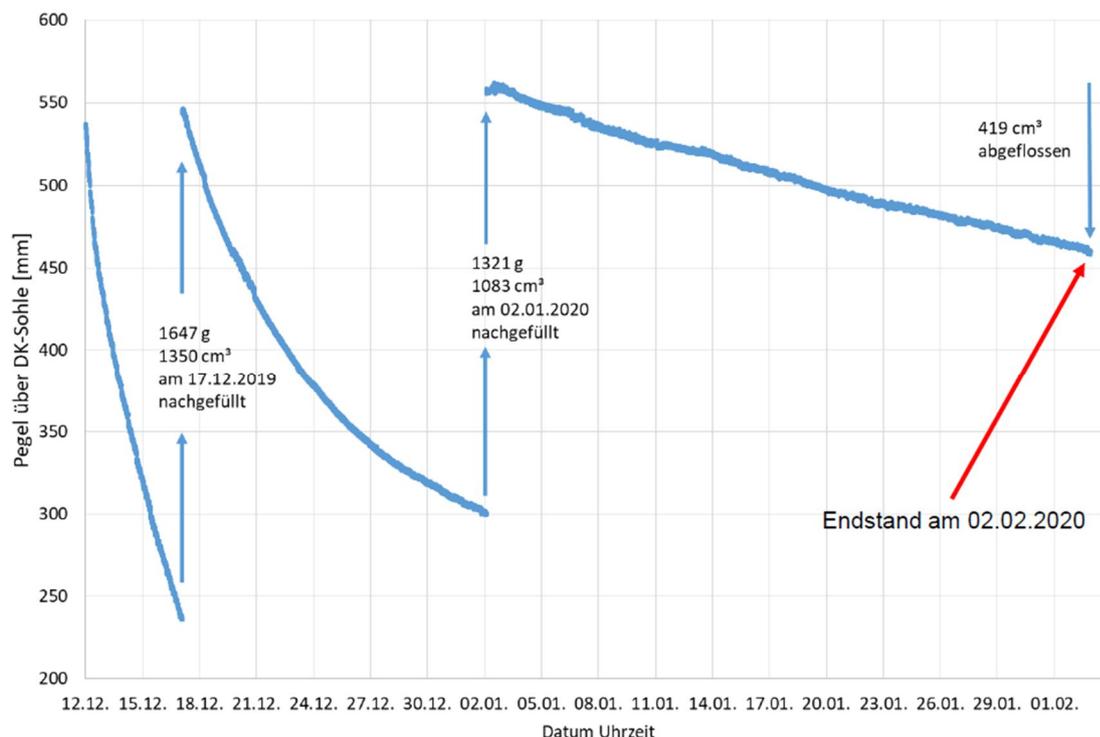


Abbildung 29: Flutung der Druckkammer in 3 Schritten

Am 03.02.2020 wurde der Packer in der Druckbeaufschlagungsbohrung gesetzt, um mit der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung zu beginnen. Diese begann am 03.02.2020 mit einem Flüssigkeitsdruck von 0,15 bar. In 15 Etappen wurde der Druck innerhalb von 3300 h (entspricht 137,5 Tagen) auf 20 bar erhöht. Es wurden über 137,5 Tage ca. 14 Liter gesättigte NaCl-Lösung in das Bauwerk eingepresst. Die Druck- und Volumenstromganglinien sind in Abbildung 30 und Abbildung 31 dargestellt.

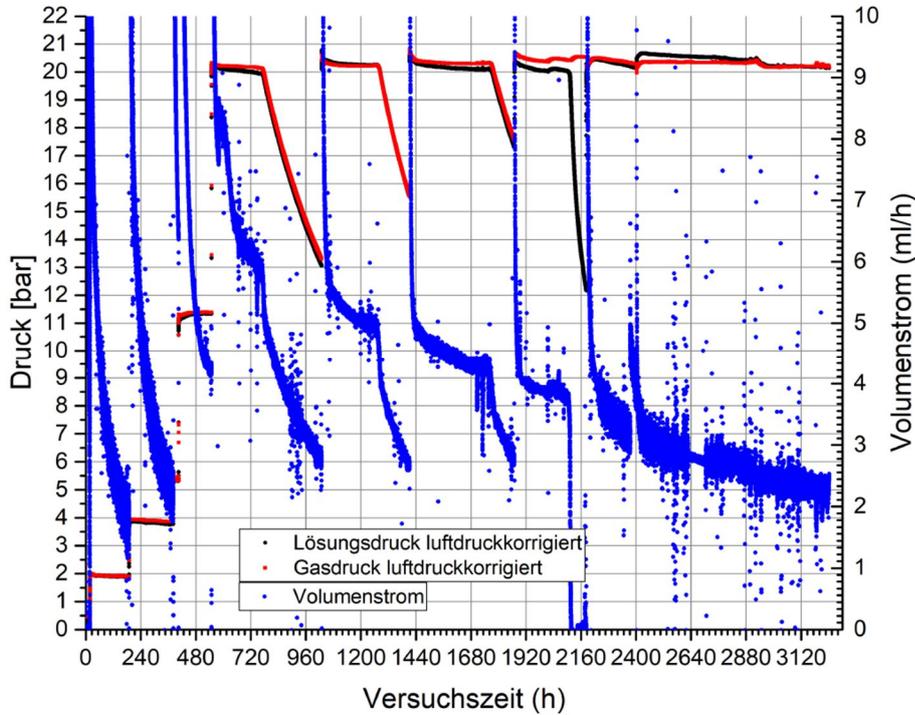


Abbildung 30: Ganglinien Lösungsdruck (schwarz)+ Gasdruck (rot) für Druckbeaufschlagung, Volumenstrom (blau)

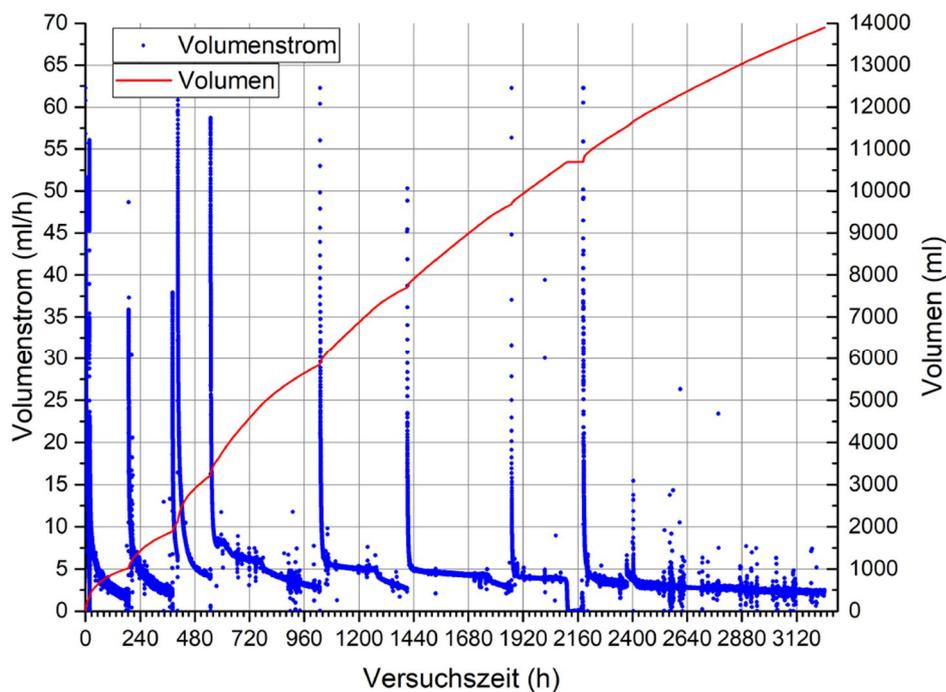


Abbildung 31: Ganglinien Volumenstrom (blau) und aufsummiertes Lösungsvolumen (rot)

Während der Druckerhöhung von 0,15 bar auf 11,30 bar in den Druckstufen 1 bis 8, Versuchsdauer bis ca. 650 h, stellte sich ein Volumenstrom von ca. 8-9 cm<sup>3</sup>/h ein. In den Druckstufen 9 bis 15, im Zeitraum ab 650 h bis 3300 h Versuchsdauer, wurde das Bauwerk mit konstantem Druck von 20 bar beaufschlagt. Am Ende des Versuchsabschnittes (3300 h) stellte sich ein Volumenstrom von ca. 2,2 cm<sup>3</sup>/h ein.

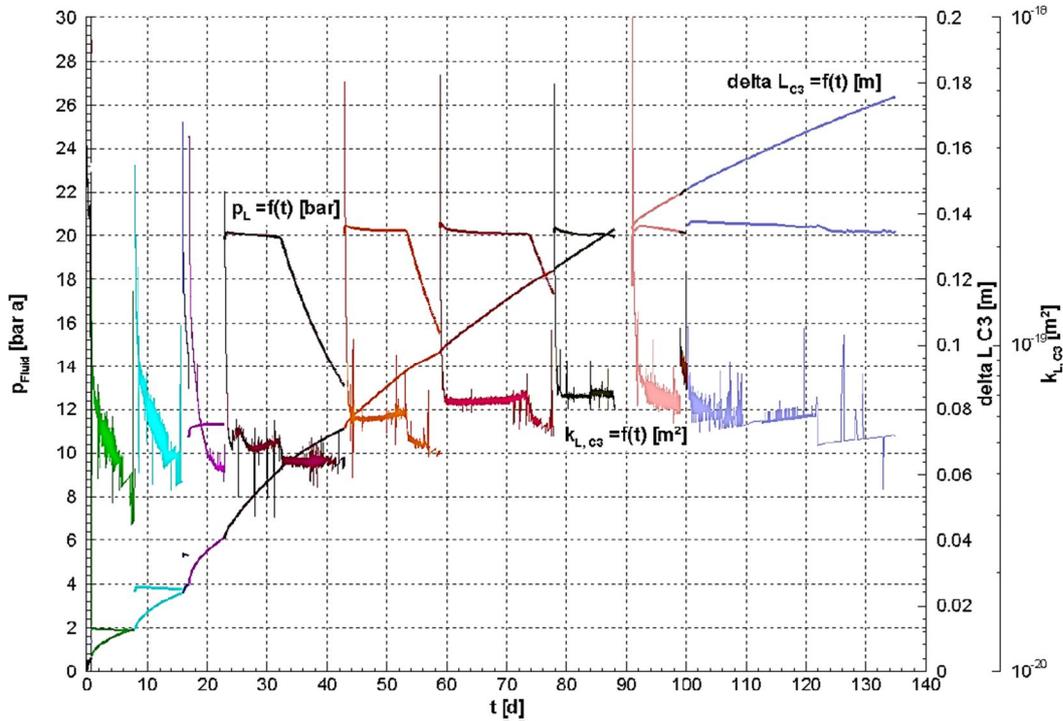


Abbildung 32: Ganglinien abgeschätzte strömungstechnisch wirksame Bauwerkslänge ( $\Delta L_{C3}$ ), Lösungsdruck ( $p_L$ ) und Bauwerkspermeabilität ( $k_{L,C3}$ )

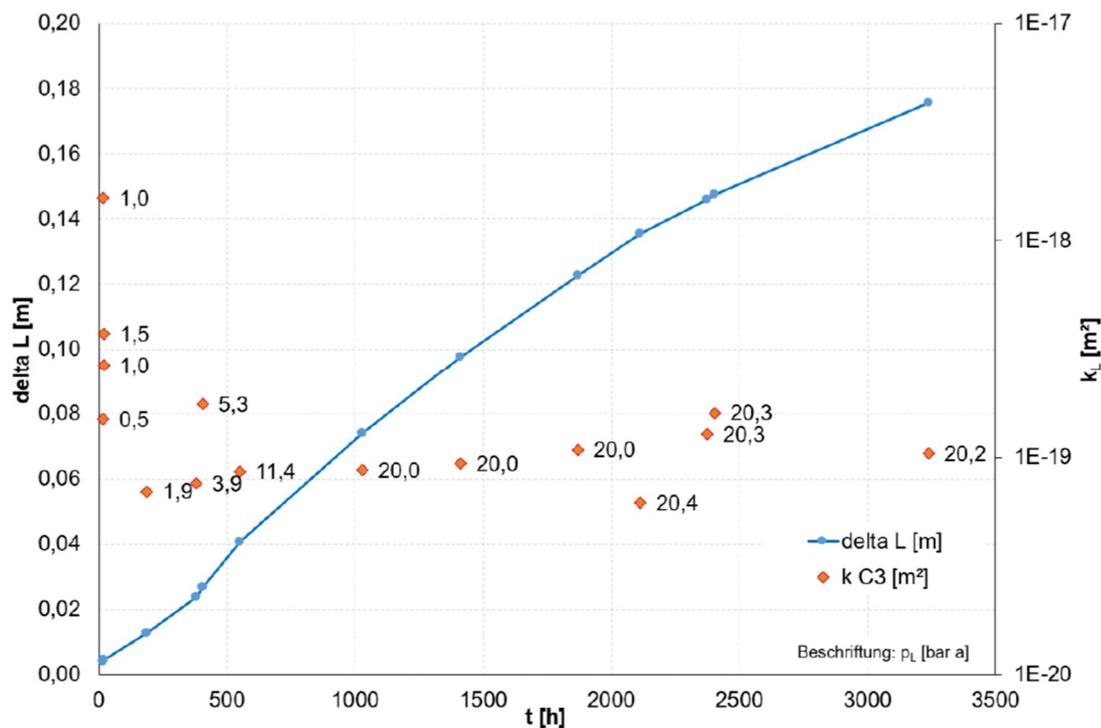


Abbildung 33: Lösungspermeabilität ( $k_L$ ) und Ganglinie der strömungstechnisch wirksamen Bauwerkslänge ( $\Delta L_{C3}$ ), Beschriftung der Lösungspermeabilität mit dem wirkenden Lösungsdruck ( $p_L$ )

Aus den Ergebnissen der Druckbeaufschlagung mit gesättigter NaCl-Lösung wurde auf der Basis des verbrauchten Lösungsvolumens und der Bilanzierung des theoretisch aufgefüllten Porenraumes (Annahme einer vollständigen Lösungssättigung) die strömungstechnisch wirksame Bauwerkslänge abgeschätzt und der Berechnung der Lösungspermeabilität zugrunde gelegt. Die zeitabhängige Entwicklung der strömungstechnisch wirksamen Bauwerkslänge ist in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt. Auf der Grundlage der Druckganglinie und der abgeschätzten strömungstechnisch wirksamen Bauwerkslänge wurde die effektive Lösungspermeabilität mit gesättigter NaCl-Lösung für das Bauwerk abgeschätzt. Am Ende der Druckbeaufschlagung, Drucketappe 15, wird eine strömungswirksame Bauwerkslänge von 0,18 m und eine Lösungspermeabilität von  $1,4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  ermittelt.

Nach Abschluss der Druckbeaufschlagung mit Salzlösung erfolgte eine zusätzliche strömungstechnische Erkundung des Bauwerkes. Zur Ermittlung der effektiven in-situ-Gaspermeabilität des MgO-Betons C3 wurde von der luftseitigen Oberfläche eine senkrechte Bohrung bis in 1,50 m Teufe in den MgO-Beton gestoßen. Innerhalb dieser Bohrung wurde an 4 Messpunkten die in-situ-Gaspermeabilität ermittelt. Die Druckbeaufschlagung mit Gas ergab eine effektive Gaspermeabilität von  $5,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  bis  $7,9 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . In Abbildung 34 sind diese Ergebnisse in Abhängigkeit von der Bohrungsteufe dargestellt. Die ermittelte effektive Gaspermeabilität des MgO-Betons C3 ordnet sich in die Werte der laborativ ermittelten Gaspermeabilität ein. Im Zuge der Druckbeaufschlagung wurde von den installierten Sensoren keine Druckreaktion aufgezeichnet.

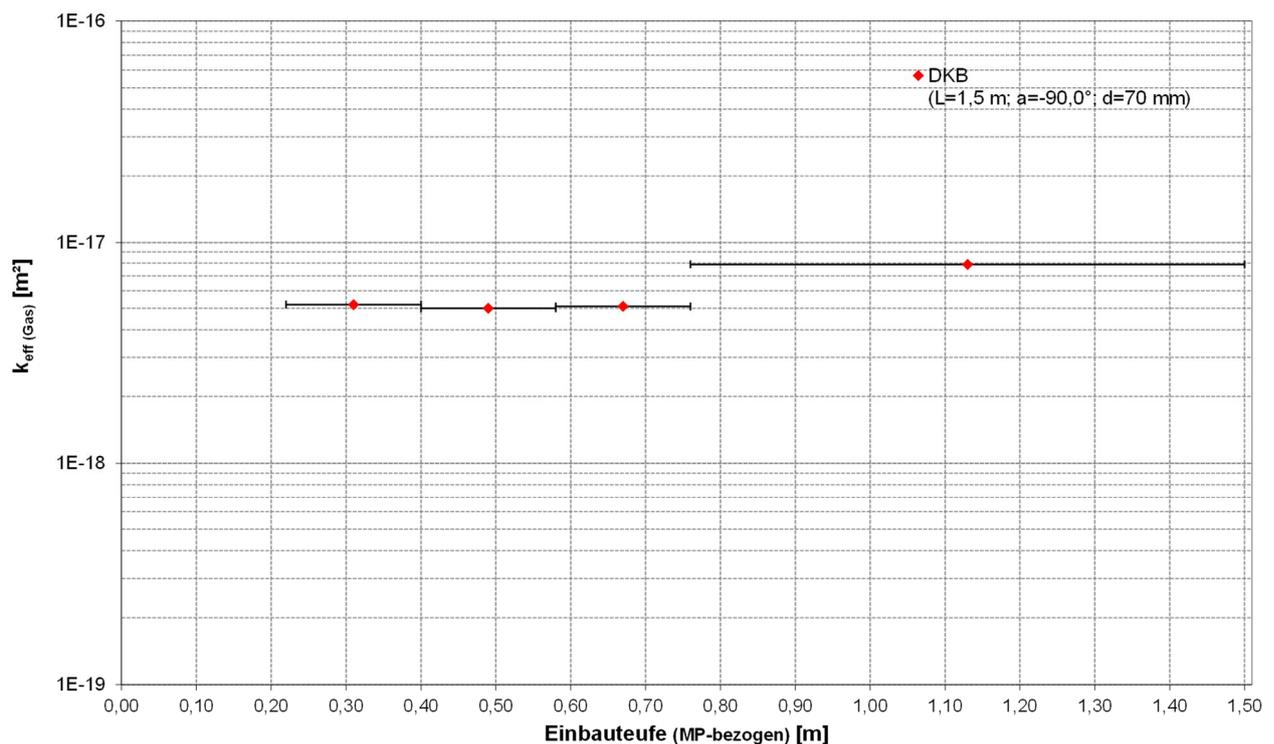


Abbildung 34: In situ ermittelte Gaspermeabilität im Bauwerk in Abhängigkeit von der Bohrungsteufe

## 2.3 Zusammenfassende Wertung zum Arbeitsschritt 4.3

Die Rezeptur für den verwendeten C3-Ortbeton wurde im Vorhaben „*Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs*“ entwickelt. Der Baustoff wurde im AP4 des Vorhabens ELSA - Phase 2 im halbtechnischen Maßstab in situ untersucht. Versuchsbegleitend wurden im Labor das mechanische und hydraulische Verhalten sowie die zeitliche Entwicklung des Phasenbestands untersucht. Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse aus den Versuchen aus dem Arbeitsschritt 4.3 gewonnen werden:

- Der MgO-Baustoff auf Basis der C3-Rezeptur mit der 3-1-8-Bindemittelphase konnte erfolgreich im halbtechnischen Maßstab in situ angewendet werden. Versuchsbegleitend wurde die einaxiale Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit des Baustoffs nach den gängigen Normen bestimmt. Der Baustoff entwickelte dabei Festigkeiten, die für einen möglichen großtechnischen Einsatz ausreichend sind, jedoch unterhalb der Festigkeiten des A1-Baustoffs und D4-Ortbetons liegen. Die Festigkeitswurde nach normüblichen 28 Tagen geprüft. Die Aussagekraft der Ergebnisse nach 28 Tagen ist eingeschränkt, da der Phasenbildungsprozess zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist.
- Im Laufe der Versuche entwickelte sich ein radialer Expansionsdruck von über 5 MPa. Dieser hohe Druck führte zu einem kraftschlüssigen Verbund zwischen Baukörper und Gebirge entlang der Kontur. Die Kontaktfuge wurde hierdurch „geschlossen“. Eine gesonderte Vergütung der Kontur beispielsweise durch Injektionen ist daher für diesen Baustoff nicht notwendig.
- Die integrale Permeabilität des Systems (Bauwerk, Kontaktfuge, Gebirge) wurde in der Größenordnung von  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  für Gas bestimmt. Die Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung mit gesättigter NaCl-Lösung ergab unter der Annahme einer strömungswirksamen Bauwerkslänge von 0,18 m eine Lösungspemeabilität von  $1,4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ . Das hydraulische Verhalten ist somit günstig für eine Anwendung des Baustoffs als Widerlager mit gleichzeitiger Dichtfunktion.

### **3 VEGÜTUNG DURCH INJEKTIONEN (AP 4.4)**

Zu diesem Arbeitsschritt wurden keine halbtechnischen Versuche durchgeführt, da keine erfolgsversprechende Versuchsanordnung über die Ergebnisse teils parallelaufender Vorhaben hinaus gefunden wurde. Theoretische Ansätze zu diesem Arbeitsschritt werden im Teilbericht zum AP 3 behandelt.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Freyer, D.; Gruner, M.; Popp, T. (2015): „*Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs*“, Freiburger Forschungshefte, Serie E15 Naturwissenschaften, TU Bergakademie Freiberg, 2015, ISBN 978-3-86012-8
- Knabe, Ph. (2019): „*Vergleich der Druck- und Zugfestigkeit unterschiedlicher MgO-Betonrezepturen*“, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Studienrichtung Bergbau, Studienarbeit TU Bergakademie Freiberg
- Königer, F.; Brandelik, A.; Schuhmann, R. (2003): „*Feuchtemesssystem für saline Umgebung*“, In Kolloquium mit Workshop "Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis", Karlsruhe
- Königer, F.; Kemper, G.; Stacheder, M.; Emmerich, K.; Brandelik, A.; Schuhmann, R.; Nüesch, R. (2006): „*TDR als Monitoringsystem von Verschlüssen untertägiger Lager für gefährliche Abfälle*“, In Berichtsband zum Workshop Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis 2, Karlsruhe, 2006
- Kudla, W.; Glaubach, U. und Gruner, M. (2010): "*Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke*", Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussbericht FKZ 02C1124, 2010
- Kudla, W.; Schreiter, F.; Gruner, M.; Jobmann, M.; Bollingerfehr, W.; Müller-Hoeppe, N.; et al. (2013): „*Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1*“, Abschlussbericht, TUBAF & DBETEC, Freiberg, 2013